



Agencia
Nacional de Minería



CCRR[®]
Comisión Colombiana de
Recursos y Reservas Minerales

Guía de buenas prácticas para la
exploración y estimación
de recursos y reservas de

carbón



GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA EXPLORACIÓN Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS DE CARBÓN -GBPC-

AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA

LUIS ÁLVARO PARDO BECERRA
Presidente

FERNANDO ALBERTO CARDONA VARGAS
Vicepresidente de Seguimiento, Control y
Seguridad Minera

FABIO ANTONIO GUTIERREZ CAMACHO
Coordinador Grupo de Evaluación de Estudios
Técnicos

COMISIÓN COLOMBIANA DE RECURSOS Y RESERVAS MINERALES – CCRR®

MÓNICA SALDARRIAGA ECHEVERRI
Presidente

AUTORES

Cesar Augusto Cabrera Angarita -Ing. de Minas

Holman Ricardo León Martínez- Ing. de Minas

Jhon Carol Manosalva Barrera - Ing. Geólogo

Andrés I. Montoya Palacio - Ing. Minas y
Metalurgia

Cesar Mauricio Vega Díaz- Ing. de Minas

Wilson Ferney Vélez-Giraldo, Ing. Geólogo

APORTES TÉCNICOS

Julian Ernesto Chaparro Rojas – Ing. de Minas

Cristina Dávila Bolívar - Ing. Geóloga

Alonso Torres - Ing. de Minas

Carlos Vargas - Ing. Geologo

Eliberto Balaguera - Ing. De Minas

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las empresas Carbocoque S.A.S., Jhon T. Boyd por su apoyo a la elaboración de la presente guía y a las empresas OMINCA SAS y TRANCORA S.A.S: por las imágenes aportadas.



Bogotá, agosto de 2024

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN.....	11
2 CONTEXTO DE LOS DEPÓSITOS DE CARBÓN EN COLOMBIA.....	13
2.1 Producción y características del carbón en Colombia.	13
2.2 Recursos y Reservas de carbón	15
2.3 Usos del carbón.....	17
3 EXPLORACIÓN.....	19
3.1 Planeación	19
3.1.1 Responsabilidad Social Empresarial (RSE)	19
3.1.2 Identificación de interesados	20
3.1.3 Identificación de Titularidad, accesos y permisos.....	20
3.1.4 Base topográfica	21
3.2 Almacenamiento y preservación de información	23
3.3 Base de datos.....	23
3.4 Revisión bibliográfica	25
3.5 Propiedades adyacentes	25
3.6 Análisis de imágenes de sensores remotos	26
3.7 Cartografía geológica.....	26
3.7.1 Puntos de control en superficie	27
3.7.2 Puntos de control en túneles.....	29
3.7.3 Datos estructurales.....	29
3.8 Exploración geofísica.....	31
3.9 Técnicas de perforación	32
3.9.1 Registros geofísicos	33
3.10 Muestreo.....	35
3.10.1 Diseño de muestreo.....	38
3.10.2 Métodos de muestreo	39
3.11 Localización de la información	43
3.12 Aseguramiento y Control de la calidad -AC/CC-	44
3.13 Cadena de custodia.....	46
3.13.1 Preservación de muestras.....	47
3.14 Métodos analíticos	47

4	ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES.....	50
4.1	Calidad de los datos y pruebas de laboratorio.....	51
4.1.1	Base de datos.....	51
4.1.2	Densidad de la información.....	53
4.2	Modelo geológico.....	53
4.2.1	Dominios de estimación.....	55
4.2.2	Métodos de construcción de dominios.....	57
4.3	Análisis Exploratorio de Datos.....	61
4.4	Técnicas de estimación.....	62
4.4.1	Métodos convencionales.....	62
4.4.2	Métodos geoestadísticos.....	63
4.5	Validación del modelo.....	64
4.6	Categorización de recursos.....	65
4.7	Declaración de recursos.....	70
4.8	Revisión por pares.....	73
4.9	Evaluación de riesgo.....	73
5	FACTORES MODIFICADORES.....	75
5.1	FACTORES TÉCNICOS.....	76
5.1.1	Factores geológicos.....	77
5.1.2	Factores Mineros.....	79
5.1.3	Infraestructura.....	85
5.1.4	Accesibilidad al sitio.....	86
5.1.5	Mano de obra disponible.....	86
5.1.6	Infraestructura de soporte.....	86
5.1.7	Seguridad.....	86
5.1.8	Procesos de beneficio.....	89
5.2	Factor Ambiental.....	89
5.2.1	Plan de cierre y abandono.....	90
5.3	Factor social.....	91
5.4	Factores económicos.....	92
5.4.1	Estudio de mercado (especificación del producto, mercado internacional vs mercado nacional).....	95
5.4.2	Modelo económico.....	96
5.4.3	Análisis de sensibilidad.....	98
5.5	Factores legales.....	99
5.6	Otros factores.....	100

6	ESTIMACIÓN DE RESERVAS.....	101
6.1	Calidad de carbón.....	101
6.2	Proceso de estimación.....	102
6.3	Optimización de Reservas.....	105
6.4	Categorización.....	106
6.5	Validación.....	107
6.6	Evaluación de riesgos del proyecto.....	107
6.7	Revisiones hechas por pares.....	107
6.8	Documentación.....	107
6.9	Declaraciones de Reservas de carbón.....	108
6.10	Discusión de la confianza relativa.....	109
6.11	Reconciliación.....	110
7	REPORTES.....	112
7.1	Objetivo del reporte.....	112
7.2	Descripción del proyecto.....	112
7.3	Localización.....	113
7.4	Salidas gráficas.....	114

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Zonas carboníferas de Colombia. Modificado del Servicio Geológico Colombiano.	14
Figura 2. Composición de la oferta energética por escenario.	18
Figura 3. Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades.	30
Figura 4. <i>Integración de registros geofísicos y comparación con logueo litológico.</i>	34
Figura 5. Muestreo de carbones y su implicación para definición de secciones de trabajo.	37
Figura 6. Consideraciones importantes para la toma de muestras.	38
Figura 7. Tipos de muestras de carbón.	39
Figura 8. Tipo de muestreo con intercalaciones (Parting)	42
Figura 9. Tipo de muestreo con incrementos verticales (Plays)	42
Figura 10. Resumen del proceso de estimación de recursos	50
Figura 11. Despliegue de mantos mediante grillas (grids)	54
Figura 12. Ejemplo de visualización de un depósito de carbón (modelo geológico)	55
Figura 13. Ejemplo de separación (Split) y bifurcación del manto A	55
Figura 14. Bifurcación y pinchamiento manto de carbón	56
Figura 15. Superficie o grid 3D generado con información de perforación.	57
Figura 16. Levantamiento topográfico 3D de labores mineras subterráneas	58
Figura 17. Ubicación 3D de puntos de control y muestreo en labores bajo tierra.	59
Figura 18. Grids o superficies 3D generados con datos de labores mineras.	59
Figura 19. Categorías de Recursos Minerales y Reservas Mineras	66
Figura 20. Clasificación de recursos de carbón en proyectos de mediana minería.	67
Figura 21. Vista de planta y perfil de la clasificación de Recursos Minerales.	68
Figura 22. Efecto "Spotted dog" en la categorización de recursos minerales, modificado de JORC (2014).	68
Figura 23. Resultado al analizar y minimizar el efecto "spotted dog".	69
Figura 24. Factores Modificadores comunes en proyectos de carbón	76
Figura 25. Métodos de explotación.	80
Figura 26. Cálculo de modelo ROM – Estructural.	103
Figura 27. Cálculo de modelo ROM - Calidad.	104
Figura 28. Ejemplo de declaración de reservas de carbón.	108
Figura 29. Equema del proceso de Reconciliación.	111

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Consolidado de Recursos y Reservas Minerales de Carbón en Colombia para el periodo 2018-2023 (Millones de Toneladas-Mt).	15
Tabla 2. Características de puntos de control de calidad y puntos de observación de calidad.....	28
Tabla 3. Métodos geofísicos en exploración de carbón.	31
Tabla 4. Ejemplo de declaración de recursos de carbón. Fecha efectiva: diciembre 29 de 2022, Base: as receive (Ar).....	72
Tabla 5. Ejemplo de declaración de reservas minerales en proyecto de carbón. Fecha efectiva Diciembre 29 de 2022, base as received @ 12%.....	108

PALABRAS PRESIDENTE ANM

El carbón ha jugado un papel muy importante en la historia de la humanidad y particularmente en nuestro país; miles de familias dedicadas a la extracción y comercialización del mineral, su aporte a la economía local y a las exportaciones, y a la generación de energía, son hechos que no podemos dejar de lado.

Sin embargo, las actuales condiciones de deterioro ambiental a nivel global aunadas a las graves manifestaciones del fenómeno de cambio climático, han llevado al mundo a tomar decisiones que nos permitan continuar viviendo en el planeta tierra sin arriesgar la vida de las siguientes generaciones, entre ellas, reducir gradualmente la extracción y combustión de los combustibles fósiles, entre ellos, el carbón térmico.

La gradualidad implica que la extracción y uso del carbón térmico no desaparecerá de inmediato, se trata de un proceso paulatino. En este contexto, distintos gobiernos han establecido compromisos para eliminar las emisiones de CO₂ antes de 2050, mientras se avanza rápidamente en la transición que nos permita utilizar energías limpias para todas las actividades antrópicas que requieren de su uso.

No obstante, el caso del carbón siderúrgico es distinto, pues el mismo resulta ser un insumo fundamental para la producción de aceros y por ende, reviste suma importancia para avanzar en la reindustrialización de la economía y la transición energética. Colombia necesita avanzar en la reconstrucción de sus industrias básicas para alcanzar nuevos niveles de bienestar económico y social. En esta circunstancia, la cadena productiva construida por la Agencia Nacional de Minería (ANM) – carbón siderúrgico, coque y acero – se torna fundamental.

Para el Gobierno del Cambio, la descarbonización de la economía, el avance en el desarrollo económico y el bienestar social, son tareas fundamentales y por tanto la extracción de carbón y sus usos en la cadena productiva deben enmarcarse en el ordenamiento del territorio alrededor del agua, el cuidado de los ecosistemas y la gestión del cambio climático.

Esta nueva visión de la minería en Colombia que fue anticipada en el Plan de Gobierno del Pacto Histórico y posteriormente plasmada en el Plan Nacional de Desarrollo (PND 2022-2026), 'Colombia, Potencia Mundial de la Vida', ha dado forma a los diversos instrumentos que han sido recientemente expedidos por la autoridad minera nacional, así como ha orientado las diferentes actuaciones desarrolladas por esa institución en el marco de sus funciones.

Con la publicación, para comentarios de la ciudadanía, de la Política Minera Nacional - UNA NUEVA VISIÓN DE LA MINERÍA EN COLOMBIA en 2023 se puso de presente que garantizar la soberanía del Estado en representación de todos los colombianos sobre la propiedad de los minerales y el desarrollo planificado del sector, son los objetivos más importantes de esta nueva visión sectorial.

Complementan estos objetivos la aprobación de nuevas formas contractuales, la planeación territorial, la construcción de cadenas productivas, en cuya base están los

minerales estratégicos, para contribuir a los programas económicos del gobierno actual <re-industrialización de la economía y desarrollo agrícola, la estrategia de transición energética justa, y la construcción de infraestructura pública>, el respeto a los derechos de las comunidades étnicas, los derechos humanos, la participación ciudadana, y la articulación minero-ambiental ordenada por el Consejo de Estado en el fallo que dio origen a la expedición de la certificación ambiental, como requisito para el estudio de las propuestas de contrato de concesión ante la Agencia Nacional de Minería (ANM).

Esta tarea implica también la necesidad de avanzar en la aplicación de normas que permitan al sector adoptar mejores estándares en todas las fases del ciclo minero (exploración, construcción y montaje, explotación, y cierre).

Para cumplir con ese compromiso, la Agencia Nacional de Minería, que asumió el estándar propuesto por el Comité Internacional para el Reporte de Recursos y Reservas – CRIRSCO-, pone ahora a disposición del sector la Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas de Carbón, fruto de un importante trabajo de expertos del Grupo de Evaluación de Estudios Técnicos de la Agencia Nacional de Minería y profesionales competentes de la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR®).

El propósito de esta guía es proporcionar un valioso material de consulta para los profesionales del sector y los titulares mineros, sirviendo de apoyo para el desarrollo de los estudios geológico- mineros y la presentación de documentos técnicos, basados en principios de materialidad, transparencia e imparcialidad.

La estimación de recursos y reservas de conformidad con el estándar -CRIRSCO- permitirá a la autoridad minera tomar decisiones fundamentadas, para garantizar la planeación del sector, la soberanía sobre los minerales, y su disponibilidad para la reindustrialización de la economía, la transición energética, el desarrollo agrícola y la construcción de infraestructura.

Teniendo en cuenta que los minerales son propiedad del Estado por mandato constitucional, desde la ANM se busca que su administración contribuya al beneficio común, la preservación del ambiente sano y el respeto por la vida, con énfasis en la promoción de una mejora continua de los métodos y técnicas de extracción, en la generación de empleos formales y dignos, propendiendo por el bienestar de los colombianos.

PALABRAS PRESIDENTE CCRR®

Desde su constitución en el año 2018, la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales -CCRR® ha realizado grandes esfuerzos por promover las buenas prácticas en la industria minera colombiana mediante diferentes iniciativas, dentro de las cuales se destaca la elaboración y publicación de las Guías de Buenas Prácticas (GBP) para diferentes tipos de minerales, realizadas en conjunto y bajo el liderazgo de la Agencia Nacional de Minería (ANM).

Las GBP tienen como objetivo brindar a los profesionales del sector, herramientas sobre la mejor forma de desarrollar las actividades propias de las etapas de exploración y estimación de recursos y reservas minerales, teniendo en cuenta las particularidades que se pueden presentar en los diferentes minerales y tipos de depósitos. La aplicación de las GBP, en conjunto con la implementación del Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales (ECRR®), genera confianza y estandarización en la información geológico-minera, mejora el conocimiento sobre los recursos y las reservas minerales que contiene el país y atrae capital para el desarrollo y el crecimiento del sector.

En esta oportunidad, presentamos la Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas de Carbón (GBPC), una guía de gran importancia para el sector minero colombiano debido a la trascendencia que ha tenido el carbón en el país, siendo un insumo indispensable en diferentes industrias nacionales y un contribuyente al desarrollo de las regiones productoras.

Si bien la demanda del carbón a nivel mundial es incierta debido al esfuerzo que muchos países están realizando para lograr la descarbonización, no se puede negar que el carbón continúa y continuará siendo un mineral clave para Colombia y que juega un papel de gran relevancia como apalancador de la transición energética en nuestro país.

1 INTRODUCCIÓN

La Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas de Carbón (GBPC) es un compendio de recomendaciones aplicables a proyectos mineros de pequeña, media o gran escala. Corresponde a los profesionales evaluar la pertinencia de su aplicación en un proyecto específico.

Esta guía fue desarrollada conjuntamente por profesionales de la Agencia Nacional de Minería -ANM- y la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales -CCRR®. La GBPC está alineada con documentos similares publicados por la Agencia Nacional de Minería -ANM-, así como documentos publicados por otras comisiones de recursos y reservas (NRO's) que hacen parte del *Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards* (CRIRSCO). Su objetivo es promover la calidad de los datos obtenidos en las diferentes fases de un proyecto minero, desde la exploración, hasta la estimación de recursos y reservas minerales.

El concepto de “buena práctica” utilizado en esta guía, se basa en la siguiente definición:

Una buena práctica no es tan sólo una práctica que se define buena en sí misma, sino que es una práctica que se ha demostrado que funciona bien y produce buenos resultados, y, por lo tanto, se recomienda como modelo. Se trata de una experiencia exitosa, que ha sido probada y validada, en un sentido amplio, que se ha repetido y que merece ser compartida con el fin de ser adoptada por el mayor número posible de personas (FAO, 2013).

La ANM ha publicado cuatro guías de buenas prácticas: esmeraldas, materiales de arrastre, depósitos de placer y rocas y minerales industriales. Estas guías presentan recomendaciones generales que se aplican a diferentes yacimientos, con particularidades según su origen.

En la guía actual, enfocada a la exploración y estimación de recursos y reservas de carbón, se sigue una estructura similar a las guías anteriores. Describe buenas prácticas comunes, como la planeación de proyectos, presentada también en la guía de depósitos de placer. Para evitar repeticiones, esta guía resume los ítems aplicables al carbón y remite al lector a consultar otras guías para información más detallada.

La GBPC está estructurada en seis capítulos de manera que permita al lector seguir una secuencia lógica de buenas prácticas para la exploración, estimación de recursos y reservas de carbón. Cada capítulo comienza con un contexto general y presenta una serie de recomendaciones basadas en la experiencia de los autores, aportes de personas competentes en Colombia, y guías de buenas prácticas elaboradas por diferentes NRO's. Al final de cada capítulo se proporciona una lista de referencias adicionales que permiten al usuario obtener más información.

El objetivo de la GBPC es asistir a los profesionales y titulares del sector minero en Colombia, aunque estas prácticas pueden aplicarse en cualquier lugar. No obstante, las recomendaciones no deben confundirse con actividades de obligatorio cumplimiento según la normativa colombiana; deben entenderse como buenas prácticas que permiten al titular minero o propietario de minas tener mayor confianza al desarrollar un proyecto.

Se espera que un documento técnico elaborado bajo los lineamientos del ECRR® o algún otro estándar acogido por CRIRSCO cumpla con los principios de Materialidad, Transparencia e Imparcialidad, e incluya las buenas prácticas aplicables al proyecto en

particular. Esto facilitará su comprensión por el usuario final (inversionista, evaluador técnico u otro) y aumentará la confianza en la información proporcionada.

La Agencia Nacional de Minería (ANM) y la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales -CCRR® esperan que los profesionales que lideran la exploración y explotación de carbón seleccionen las buenas prácticas más adecuadas para sus actividades, adaptándolas al contexto específico de su proyecto. Esto contribuirá a construir relaciones positivas con las comunidades, reducir los impactos ambientales mediante una planificación adecuada, disminuir la incertidumbre del proyecto y lograr una operación exitosa que beneficie tanto a la empresa, como a las comunidades cercanas al proyecto.

2 CONTEXTO DE LOS DEPÓSITOS DE CARBÓN EN COLOMBIA

La minería de carbón ha sido fundamental para Colombia, debido a sus contribuciones a la economía, al desarrollo de las regiones productoras, a la matriz energética nacional y a su uso en la industria. Según (Minminas, 2020), en el quinquenio del 2016 al 2020 la minería del carbón representó en promedio, el 1% del producto interno bruto (PIB) nacional y el 16% de las exportaciones de Colombia. En 2019, generó cerca de 600 mil millones de pesos en impuesto de renta, 1,9 billones de pesos en regalías y generó 130.000 empleos. Estos aportes son aún mayores en las zonas productoras, como La Guajira y Cesar donde representa más del 35% del PIB Departamental y el 70% de las exportaciones. Además, el carbón provee el 7% de las necesidades energéticas del país (incluyendo energía eléctrica y consumo para la industria). Este mineral es insumo para industrias como la papelera, cementera, química, siderúrgica y de producción de coque. Lo anterior muestra la relevancia histórica y actual de la minería de carbón en el país y la trascendencia de las decisiones que se tomen a futuro sobre el desarrollo de este mineral.

A nivel mundial, el panorama es cambiante en cuanto a la demanda de carbón, como se ha evidenciado en los últimos años donde por diferentes factores, varios países se han visto avocados a reactivar el uso de carbón como fuente de energía, amparándose en su confiabilidad, lo que ha generado que en el año 2022 la producción de energía a partir de carbón aumente un 8% respecto a 2021.

Este panorama presenta tanto desafíos como oportunidades para Colombia. El país debe asumir el reto de integrarse en nuevos mercados y posicionarse como un productor con altos estándares tecnológicos, ambientales y sociales. Esto le permitirá competir con otros países productores, a la vez que participa en la meta nacional de llegar a la carbono neutralidad en 2050.

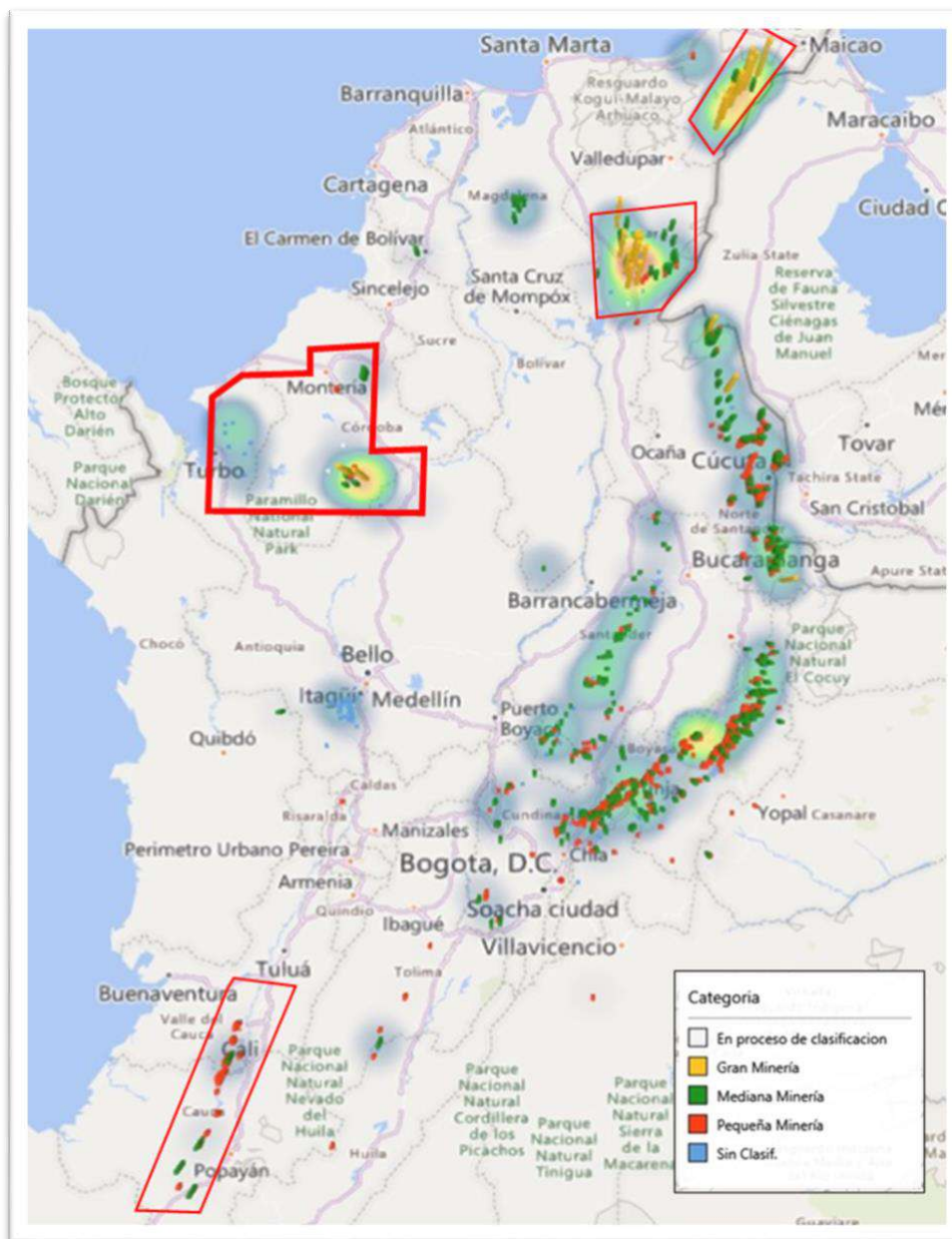
En este contexto, el Ministerio de Minas ha planteado la siguiente visión:

"La actividad minera de carbón en Colombia será competitiva, legal, segura y con altos estándares técnicos, ambientales, sociales y de relacionamiento con el territorio, apoyará los compromisos nacionales y mundiales de transición energética y apalancará la diversificación productiva de las regiones predominantemente productoras. La institucionalidad avanzará de manera dinámica en su fortalecimiento para permitir y promover que esto suceda."
Minminas, 2020

2.1 Producción y características del carbón en Colombia.

El Servicio Geológico Colombiano ha delimitado doce (12) zonas carboníferas en las cuencas sedimentarias de Colombia; con 1050 títulos mineros de carbón en todas sus modalidades (ANM, julio de 2024), con un 2% clasificado como gran minería, 24% en mediana minería, 64% en pequeña minería y el restante 10% se encuentra en proceso de clasificación. La distribución de los títulos mineros en las zonas carboníferas es mostrado en la Figura 1.

Figura 1. Zonas carboníferas de Colombia. Modificado del Servicio Geológico Colombiano.



Fuente: Elaboración propia.

A pesar del bajo porcentaje de representación de los títulos mineros de gran minería, estos han aportado históricamente alrededor de un 90% de la producción nacional. En el período comprendido entre el 2014 y el 2021 la industria del carbón ha producido un total de 637,2 millones de toneladas, que han generado un valor de 4.274 millones de dólares en regalías. (ANM, 2020).

Colombia cuenta con importantes reservas de carbón. De acuerdo con el reporte de Estadísticas de Energía Mundial 2020, elaborado por la multinacional energética BP, el

país cuenta con el 53% de las reservas probadas de carbón de Latinoamérica y el 0,6% de las reservas probadas mundiales de este mineral. Estas reservas posicionan al país como el undécimo en el mundo en reservas de carbón antracita y bituminoso.

De acuerdo con la Agencia Nacional de Minería (ANM), Colombia cuenta con 1.586 millones de toneladas de reservas de carbón, que le permitirían mantener su producción por al menos 20 años. Así mismo, de acuerdo con la valoración anual de estas reservas a corte 2019 reportada en el balance del país, estas reservas corresponden a 48 billones de pesos y tienen un peso del 77,3% en el total de reservas minerales del país.

2.2 Recursos y Reservas de carbón

Con la inclusión de los principios, definiciones y directrices de los estándares acogidos por CRIRSCO dentro de los términos de referencia para la elaboración y presentación de los documentos técnicos a la autoridad minera, la calidad y soporte de las estimaciones minerales ha mejorado en comparación con años anteriores. Lo anterior ha permitido incluir desde el 2018 las cifras de las estimaciones de recursos y reservas de carbón aprobados en los proyectos mineros por la autoridad minera en los diferentes inventarios nacionales (Tabla 1).

Tabla 1. Consolidado de Recursos y Reservas Minerales de Carbón en Colombia para el periodo 2018-2023 (Millones de Toneladas-Mt).

Año	Mineral	Departamento	Recursos Inferidos (Mt)	Recursos Indicados (Mt)	Recursos Medidos (Mt)	Reservas Probables (Mt)	Reservas Probadas (Mt)
2018	Carbón metalúrgico	Boyacá	65,00	207,00	119,00		0,23
		Cesar	499,54	851,06	2.029,50	311,20	1.212,16
	Carbón térmico	La Guajira	48,90	66,20	350,22	62,00	341,80
		Total (Mt)		613,44	1.124,26	2.498,72	373,20
2019	Carbón metalúrgico	Boyacá	33,08	85,85	77,53	9,99	
		Cesar	81,30	837,20	1.878,20	733,00	707,45
	Carbón térmico	La Guajira	600,00	1.250,00	3.250,00	140,00	200,00
		Total (Mt)		714,38	2.173,05	5.205,73	882,99
2020	Carbón metalúrgico	Boyacá	65,23	207,02	119,03	0,00	0,15
		Cesar	309,84	776,05	1.869,86	850,10	369,73
	Carbón térmico	La Guajira	2,43	91,21	410,11	94,22	280,62
		Total (Mt)		377,50	1.074,28	2.399,00	944,32
2021	Carbón metalúrgico	Boyacá	46,26	83,39	83,18	16,14	3,82
		Cundinamarca	50,01	38,47	1.177,16	12,19	6,07
		Norte de Santander	6,99	10,03	4,03	5,95	12,39
		Santander	11,57	23,45	8,46	8,07	4,41
	Carbón térmico	Boyacá	21,46	20,69	11,79	4,55	3,09
		Cauca	0,02	0,65	0,93	0,51	-
		Cesar	18,10	770,59	1.351,97	939,17	241,14
		Córdoba	756,80	385,61	234,49	64,40	44,59
	Cundinamarca	4,30	5,86	13,68	2,51	9,50	

Año	Mineral	Departamento	Recursos Inferidos (Mt)	Recursos Indicados (Mt)	Recursos Medidos (Mt)	Reservas Probables (Mt)	Reservas Probadas (Mt)
		La Guajira	8,53	88,37	383,34	131,40	223,97
		Norte de Santander	28,12	18,08	16,63	9,12	15,18
		Total (Mt)	952,16	1.445,19	3.285,66	1.194,01	564,16
2022	Carbón metalúrgico	Boyacá	153,11	79,80	62,17	29,01	26,78
		Cundinamarca	25,18	35,01	35,11	25,86	5,16
		Norte de Santander	10,32	26,59	24,72	17,30	15,14
		Santander	44,60	30,40	10,00	10,51	4,41
	Carbón térmico	Boyacá	62,28	55,07	27,42	14,63	5,68
		Cauca	0,02	0,65	0,93	0,51	
		Cesar	57,86	704,89	1.367,05	189,74	196,00
		Córdoba	722,04	345,07	186,37	67,69	44,76
		Cundinamarca	6,69	10,85	16,56	4,25	11,08
		La Guajira	9,45	100,00	449,04	138,60	186,78
		Norte de Santander	53,69	49,52	40,12	27,70	30,11
		Santander	33,29	65,88	22,86	9,76	21,29
	Valle del Cauca	10,71	3,25	3,75	1,97	1,17	
	Carbón antracítico	Santander	33,86	51,79	0,33	2,15	0,08
	Total (Mt)		1.223,10	1.558,77	2.246,43	539,68	548,44
2023	Carbón metalúrgico	Boyacá	157,82	81,44	62,76	37,15	26,19
		Cundinamarca	40,29	40,91	35,83	26,59	6,41
		Norte de Santander	57,36	32,16	29,63	21,86	19,63
		Santander	44,60	30,90	11,39	10,96	4,41
	Carbón térmico	Boyacá	59,89	54,34	28,34	17,28	6,09
		Cesar	405,37	730,86	1465,22	312,14	205,92
		Córdoba	722,04	345,07	186,37	67,69	44,76
		Cundinamarca	25,90	16,86	6,60	8,65	0,39
		La Guajira	54,10	214,27	646,13	212,60	126,80
		Norte de Santander	58,94	44,96	40,93	33,04	25,72
		Santander	7,87	26,28	4,28	9,76	1,85
	Valle del Cauca	5,60	2,79	2,78	0,80		
Carbón antracítico	Santander	33,86	51,79	0,33	2,15	0,08	
Total (Mt)		1.673,66	1.672,63	2.520,60	760,67	468,26	

Fuente: Agencia Nacional de Minería - Grupo de Estudios Técnicos (GET)

Para el periodo 2018-2020 las cifras de recursos y reservas de carbón disponibles en las estadísticas nacionales corresponden únicamente a las cifras reportadas por los proyectos de interés nacional (PIN), es así, como en la Tabla 1 se indica que para el periodo en mención se informaban recursos y reservas únicamente para los departamentos del Cesar, La Guajira y Boyacá.

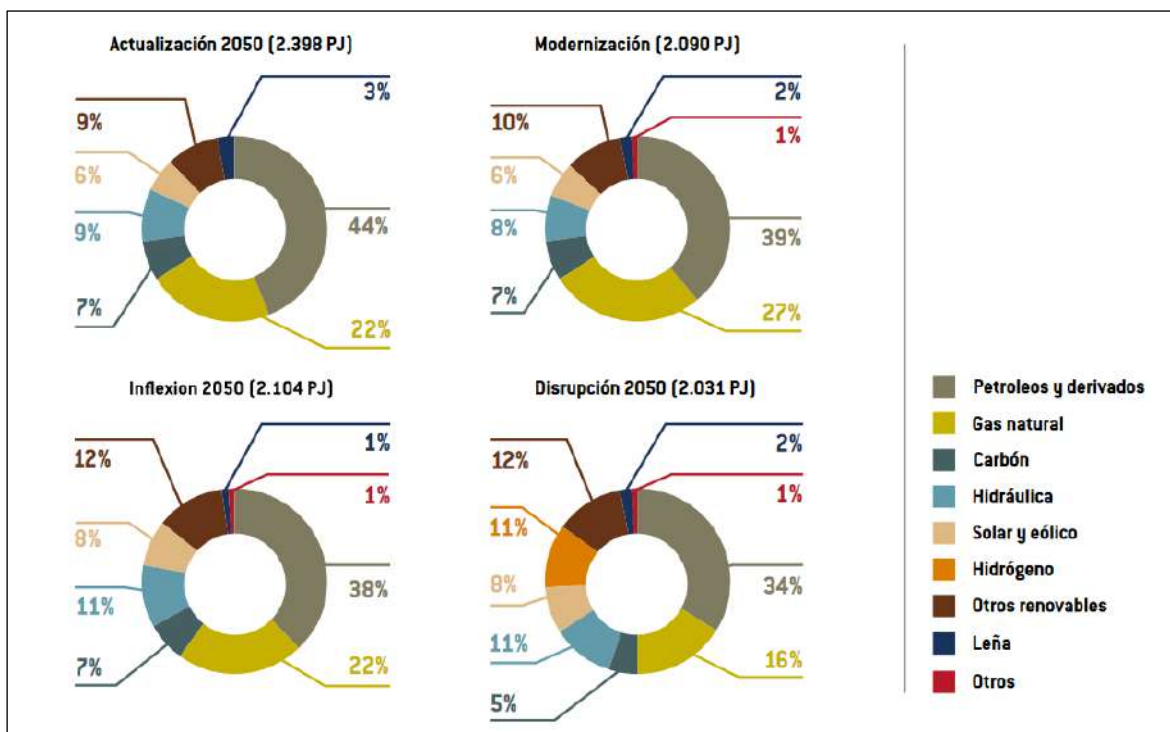
Después del año 2020 y con la implementación de políticas de gobierno, se exigió a los titulares de los proyectos mineros actualizar las estimaciones de recursos y reservas minerales bajo las directrices de los estándares CRIRSCO. Es así como posteriormente se han venido incluyendo cifras de proyectos mineros de carbón de gran, mediana y pequeña escala de los departamentos de Santander, Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, y el Valle del Cauca en los reportes nacionales de recursos y reservas minerales.

2.3 Usos del carbón

Colombia produce dos tipos de carbón: térmico y metalúrgico. El carbón térmico es usado como fuente de combustible, quemándose para generar vapor de agua, el cual es posteriormente usado para la generación de electricidad. Este tipo de carbón ha representado más del 90% de la producción del país desde el 2012 y ha sido mayoritariamente exportado. El 8% de la producción es usada para el consumo interno colombiano y proviene principalmente de los departamentos del interior del país. Por otro lado, Colombia produce carbón metalúrgico, cuyo uso principal es como reductor químico en algunos procesos industriales. Por ejemplo, en la industria siderúrgica el carbón metalúrgico, o su forma procesada, el coque, es usado para producir acero. En Colombia, la gran mayoría de carbón metalúrgico es exportado directamente o transformado en coque y posteriormente exportado.

El carbón es un insumo esencial para satisfacer las necesidades energéticas actuales y futuras de Colombia. De acuerdo con el Plan Energético Nacional 2020- 2050 (PEN), en 2019 las contribuciones de este mineral correspondían al 7% de la demanda energética nacional (Figura 2) y, según las proyecciones de los distintos escenarios contemplados en este documento, seguirá proporcionando entre el 5% y el 7% de las necesidades energéticas hasta el año 2050. La demanda de carbón se da principalmente para la generación de energía eléctrica y para suplir las necesidades energéticas del sector industrial, las cuales se mostrarán más adelante.

Figura 2. Composición de la oferta energética por escenario.



Fuente. Minenergía, UPME, 2020

En Colombia, los usos del carbón se pueden clasificar en uso térmico, uso siderúrgico y uso industrial. Los carbones de más alto rango como las antracitas, son usados como filtros, aislantes y briquetas (productos de la carbonización, para usos domésticos debido a la poca cantidad de materia volátil que contienen, o para usos industriales como el secado de arroz y demás productos agrícolas). Las semiantracitas y bituminosos bajos en volátiles son usados en termoeléctricas y calderas. Los bituminosos medios en volátiles, son usados para coquización y calderas. Los bituminosos altos en volátiles son usados en calderas, fábricas de ladrillos, térmicas y para la producción de gas, asociado a procesos de combustión como la gasificación y licuefacción.

Los procesos de carbonización incluyen la elaboración de briquetas o carbonización de baja temperatura, la gasificación del carbón para obtener hidrocarburos livianos como el etano y el propano, la licuefacción del carbón para transformarlo en gasolina, la carbonización de alta temperatura para obtener coque, la activación del carbón para conseguir carbones con alto poder de adsorción, la grafitización del carbón para obtener fibras de carbón y nanotubos y finalmente, la humidificación del carbón para adquirir materia orgánica para usos agrícolas.

3 EXPLORACIÓN

La exploración abarca las actividades necesarias para obtener información sobre la viabilidad de un proyecto con suficiente potencial de carbón para evaluar su desarrollo. Estas actividades pueden realizarse en áreas sin información previa de exploración, en áreas conocidas por la existencia de mantos de carbón, o en minas en explotación.

El objetivo de una exploración exitosa es la de estimar recursos y reservas de carbón; el éxito de un proyecto minero radica en un proceso de exploración ordenado y adecuado a las características del yacimiento. Es relevante incluir procedimientos y protocolos que aseguren la calidad de los datos obtenidos, de manera que estos datos cuenten con un grado aceptable de confianza para ser empleados en estimaciones posteriores y análisis sobre la viabilidad técnica y económica.

La exploración comprende las actividades y procedimientos que permiten determinar la presencia, extensión, calidad y continuidad del yacimiento. También incluye la evaluación de la complejidad estructural del yacimiento y la obtención de información sobre las condiciones geomecánicas e hidrogeológicas del macizo rocoso. Como resultado, se delimitan las áreas de mayor interés para estimar recursos minerales o áreas estratégicas para continuar la evaluación.

A continuación, se describen algunos ítems a considerar durante la exploración de carbón.

3.1 Planeación

La exploración es un proceso que es susceptible a diferentes variables económicas, sociales, ambientales y mercado regulatorias. Por lo tanto, desde la planeación debe establecerse claramente el objetivo. A partir de este objetivo se definen las actividades específicas, el cronograma y los recursos necesarios. La planeación debe considerar las características del proyecto, como ubicación, condiciones sociales y ambientales, para elaborar realizar un panorama de riesgos generales.

Recomendaciones

- Establecer el objetivo de la campaña de exploración.
- Elaborar un cronograma de actividades, incluyendo recursos (humanos y económicos)
- Definir un plan de comunicación y divulgación con actores interesados.
- Desarrollar procedimientos y protocolos que aseguren la calidad de los datos para estimaciones posteriores de recursos y reservas minerales.

3.1.1 Responsabilidad Social Empresarial (RSE)

La minería debe contribuir al desarrollo sostenible. Es fundamental difundir claramente los objetivos y alcances del proyecto minero a los interesados. La CIM recomienda, como principio básico de la participación de la comunidad, iniciar el proceso de consulta con la comunidad mucho antes de que comience el proyecto. Como el proceso tiene el objetivo de construir relaciones y confianza a través del entendimiento mutuo, las reuniones y eventos al inicio del proyecto son a menudo componentes claves para garantizar el éxito

de este. El profesional líder del proyecto o el grupo de profesionales, deben estar preparados para asistir a reuniones y eventos con la comunidad.

Recomendaciones

- Contar con profesionales idóneos que inicien los acercamientos con las comunidades en el área, los cuales deben comunicar asertivamente las características del proyecto.
- Hacer un sondeo de las razones más frecuentes de negación de permisos para así prevenir posibles rechazos.
- Consultar las plataformas de entidades estatales con información pública de zonas especiales o restringidas para minería (Anna Minería, SINA, RUNAP, etc).
- Revisar los planes de ordenamiento territorial o departamental y los POMCAS.
- Documentar los acercamientos con la comunidad y autoridades locales, así como los compromisos adquiridos por las diferentes partes.

3.1.2 Identificación de interesados

Todo proyecto minero debe tener mecanismos que le permitan identificar a las personas o grupos (organizaciones, comunidades, entidades) que pueden impactar o ser impactados por el desarrollo de cada una de las actividades mineras.

Una identificación rigurosa de interesados, desde la exploración, permitirá a la empresa encargada de desarrollar un proyecto minero, establecer mecanismos de comunicación que permita generar confianza con los interesados, de manera que se construyan relaciones de confianza a lo largo del tiempo, y se generen mecanismos de comunicación que permitan el flujo de información de forma directa.

Recomendaciones

- Identificar los diferentes grupos de interesados que deben tenerse en cuenta a lo largo de la vida del proyecto y actualizarlos periódicamente.
- Generar canales de comunicación con los diferentes interesados.
- Agrupar los interesados según su interés, influencia y participación en el proyecto.
- Elaborar un plan de seguimiento y comunicaciones con los interesados principales.

3.1.3 Identificación de Titularidad, accesos y permisos

En Colombia las actividades de exploración deben estar amparadas en un título minero (o el que haga sus veces), por lo que verificar que se cuente con la viabilidad legal desde el comienzo es necesario.

El acceso incluye permisos y acuerdos necesarios con comunidades locales y comunidades especiales (indígenas, negritudes), propietarios de predios. El profesional líder debe confirmar la ubicación de los límites de la propiedad, identificando los predios en los que se ubica, de manera que las actividades de exploración a realizar sean gestionadas en el momento adecuado.

Igualmente debe verificarse y validarse los diferentes permisos requeridos para adelantar actividades de exploración, como el cumplimiento de guías minero-ambientales o la obtención de permisos específicos, como es el caso de la perforación.

En la mayoría de los proyectos mineros, los permisos más sensibles son de carácter ambiental, social y jurídico; por lo cual, debe tenerse claro desde el principio del proyecto ante qué autoridades u organizaciones sociales deben tramitarse los permisos, cuál es el tiempo promedio de respuesta y, de ser posible, cuáles son las razones más frecuentes de negación de permisos, para establecer una estrategia que evite dicha negación. La identificación temprana de todos los permisos necesarios y la atención correspondiente a cada uno de ellos, facilita el flujo de las operaciones y evita incurrir en posibles costos adicionales que se presentan cuando no hubo previsión de las autorizaciones requeridas para las diferentes operaciones. (Valencia Suaza et al., 2022)

Recomendaciones

- Verificar que se cuente con acceso a las áreas clave para la exploración y explotación del proyecto.
- Concentrar los esfuerzos y recursos en las áreas donde es posible adelantar trabajos.
- Buscar el acceso a las áreas con restricciones pero que pueden ser significativas para el proyecto.
- Documentar los acuerdos obtenidos para los diferentes predios.

3.1.4 Base topográfica

La base topográfica representa el relieve del terreno y es la capa de información sobre la cual se ubican los datos geográficos del proyecto; por lo tanto, su calidad debe estar garantizada. La información de exploración de un yacimiento mineral debe estar plasmada sobre bases topográficas confiables, que reflejen las características fisiográficas del área, permitiendo un ajuste correcto de la información de campo (Valencia Suaza et al., 2022). En la planeación de las diferentes fases de exploración y explotación, es indispensable levantar la topografía a escala adecuada con su respectivo amarre a las redes de referencia (Red Geodésica Nacional, para el caso de Colombia) y determinar el método más conveniente (con sensores remotos o convencional), en términos técnicos y económicos.

Aunque en esta guía se aborda el levantamiento topográfico como parte de la planeación del proyecto, esta actividad debe estar presente en todas las etapas de desarrollo de la mina. El control de la superficie del terreno debe llevarse desde la exploración hasta la producción, y es insumo básico para la etapa de cierre de la mina para la reconfiguración geomorfológica y paisajística.

Sistema de proyección

Un proyecto minero requiere un sistema de proyección de coordenadas consistente desde el inicio, que permita ubicar toda la información producida durante las diferentes etapas en la propiedad (CIM, 2018). La empresa tiene autonomía para determinar el sistema de proyección que más convenga a sus intereses, pero en el caso de documentos técnicos presentados a las autoridades estatales, debe consultarse el sistema que exige la normatividad vigente de cada entidad.

Cuando existe información geográfica previa con un sistema de coordenadas diferente del sistema a emplear en el proyecto, la información debe ser transformada o proyectada al sistema de coordenadas definido antes de ser utilizada en otras actividades.

Recomendaciones

- Levantar la topografía del área de interés de acuerdo con las necesidades del proyecto y con el debido amarre a las redes de referencia.
- Incluir mojones en el levantamiento topográfico para materializar en terreno los puntos de control que facilitan el amarre de los sistemas.
- Verificar la precisión del método de levantamiento.
- Documentar la metodología del levantamiento topográfico, especificando los instrumentos utilizados, el procesamiento de la información y la precisión vertical y horizontal alcanzada con el método.
- Verificar la calibración de los equipos topográficos.
- En Colombia, el IGAC ofrece las bases cartográficas de la mayor parte del territorio Nacional en escala hasta 1:25 000. Teniendo en cuenta que, en un título minero, no todo el terreno alberga depósitos de carbón, el profesional encargado de exploración debe determinar, de acuerdo con las necesidades del proyecto, qué áreas del título deben ser levantadas con mayor detalle y qué áreas pueden quedar con la cartografía básica del IGAC o la que haya sido seleccionada en su lugar.
- En las áreas donde existen o se planifica hacer perforaciones, es necesario lograr una georreferenciación vertical (Z) muy precisa, ya que el espesor de los estratos, mantos y la profundidad de estos son relevantes dentro de los procesos de modelamiento y estimación de recursos y para la planeación minera; un error en la elevación genera un efecto progresivo que puede derivar en una incorrecta estimación de los recursos y reservas.
- La base topográfica debe incluir todos los objetos de infraestructura, drenajes, relieve, límites geográficos, entre otros, que permitan la comprensión de las características del relieve del área y la infraestructura disponible.
- Establecer procedimientos claros para la migración de información cartográfica entre diferentes sistemas de coordenadas.
- Verificar el sistema requerido por las diferentes entidades gubernamentales a las cuales la empresa está en la obligación de suministrar información.
- Evaluar si el sistema de coordenadas exigido por las autoridades es conveniente también para el proyecto, de ser así, la mejor práctica es tener toda la información georreferenciada a dicho sistema, de esta manera, se evitan reproyecciones o reprocesamiento de la información.
- Determinar las coordenadas de puntos en común o mojones que estén presentes físicamente en la propiedad: ejemplos de dichos puntos en común pueden incluir mojones de pozos de perforación, mojones del IGAC o características geográficas específicas.
- Para propiedades en la etapa de prospección, deben establecerse marcas permanentes como un punto de referencia para el sistema de coordenadas de la propiedad. Deben hacerse descripciones detalladas de los métodos y procedimientos para su marcación y localización (CIM, 2018).
- En caso de contar con información en diferentes sistemas de coordenadas, definir el procedimiento de transformación o proyección de coordenadas antes de iniciar con las transformaciones.

3.2 Almacenamiento y preservación de información

Uno de los principales activos con los que cuenta una empresa que tiene proyectos en etapas de exploración está asociado a la información obtenida durante las diferentes actividades de exploración realizados, por lo que un adecuado almacenamiento y preservación de la información genera aumento en el valor de la compañía.

Recomendaciones

- Conservar los archivos de soporte como son: libretas de campo, formatos, reportes escritos, mapas de campo, fotografías, certificados analíticos, entre otros.
- Definir una estructura de almacenamiento de la información que sea de fácil uso.
- Realizar auditorías al almacenamiento de la información.
- Determinar el periodo más conveniente para almacenamiento de la información, de acuerdo con las necesidades del proyecto.
- Se ha de asegurar que la información quede en manos del proyecto o titular minero y evitar que sea extraída o custodiada por personas con participación temporal en el proyecto.
- Establecer perfiles de usuarios y acceso a la información.

3.3 Base de datos

La base de datos es una herramienta tanto de almacenamiento como de análisis de información que permite compilar en un solo lugar, la mayoría de los datos considerados para el análisis de resultados de exploración y para las estimaciones de recursos y reservas, así como en la reconciliación de resultados durante la operación. La información puede ser de dos tipos: datos observados y medidos o datos interpretados (CIM, 2018).

Las bases de datos deben estar diseñadas de manera que la información se presente en una secuencia lógica desde el momento de la captura de esta en campo, para luego llevarla al registro digital, de manera que se faciliten su entendimiento y posterior manejo y administración. Se deben hacer todos los esfuerzos necesarios para obtener datos precisos y confiables desde el comienzo (Valencia Suaza et al., 2022).

La selección de la herramienta (*software*) más conveniente para el almacenamiento de datos desde el inicio del proyecto facilita la administración de los datos. Para este propósito existen en el mercado programas muy sofisticados con posibilidades de diseño de perfiles de usuario, gran capacidad de almacenamiento, con opción de trabajo remoto y otras herramientas que facilitan el uso, seguridad y disponibilidad de los datos. Algunas herramientas de uso libre también ofrecen muchas posibilidades para la administración de los datos (Valencia Suaza et al., 2022).

La selección de la herramienta más conveniente está determinada por las necesidades y recursos del proyecto, pero independientemente de la opción escogida para la administración de los datos, debe procurarse un manejo cómodo, ágil y con la menor manipulación posible de la información; además deben establecerse protocolos para almacenamiento, revisión, actualización, validación y corrección de los datos, así como de respaldo de la información. Dichos protocolos deben estar al día y disponibles para todos los usuarios de la base de datos (Valencia Suaza et al., 2022).

La estandarización en el registro de la información asegura que todos los responsables de alimentar la base de datos almacenen información con la misma estructura durante el desarrollo del proyecto. Los datos deben ser lo suficientemente detallados para lograr el nivel de comprensión deseado para cada fase operativa. La variedad y el alcance de los formularios individuales deben proporcionar colectivamente una imagen actualizada de la perspectiva en cada etapa de su desarrollo. Tenga en cuenta que, si bien es ventajoso utilizar las mismas hojas de datos sin cambios en un programa, es posible que se necesiten algunos ajustes. La etapa de muestreo también es una etapa de aprendizaje y es posible que sea necesario realizar alguna revisión para garantizar que los métodos seleccionados funcionen y proporcionen toda la información requerida (Macdonald, 2007; Valencia Suaza et al., 2022).

Algunas consideraciones a tener en cuenta para el diseño de la base de datos se presentan a continuación:

- **Especificaciones técnicas:** se deben definir las herramientas (*software* y *hardware*) para gestionar la información, sistemas operativos y lenguajes de programación con los que se pueda migrar la información con facilidad a nuevos sistemas y aplicaciones a medida que avanzan los requerimientos técnicos del proyecto.
- **Sistemas de nomenclatura:** definir un sistema de nomenclatura para la toma de información que permita realizar el seguimiento y la correlación de la misma a lo largo de la exploración, estimación de recursos y reservas. Estos sistemas permiten que todo el equipo de trabajo use los mismos parámetros en la recolección y almacenamiento de datos.
- **Usuarios:** se deben definir el perfil de los usuarios que tendrán acceso y los correspondientes niveles de autorización para la manipulación de la base de datos. Se recomienda generar diversos grupos de interés basados en las necesidades del proyecto.
- **Datos de almacenamiento:** la base de datos debe ser diseñada para soportar los diversos tipos de archivos que se generan en el proyecto.

Recomendaciones

- Elaborar protocolos de manejo de la base de datos y divulgarlos oportunamente.
- Tener procedimientos sistemáticos para la recolección de información.
- Incluir anotaciones acerca de los supuestos en los campos sin información.
- Diseñar la base de datos acorde con las necesidades del proyecto.
- Establecer las relaciones entre los diferentes datos.
- Diferenciar datos crudos de datos interpretados.
- Definir perfiles de usuario con responsabilidades y limitaciones específicas.
- Cargar los datos con la menor manipulación posible. En este sentido, la recomendación es realizar las acciones necesarias para evitar el trabajo manual, y en caso de que este sea inevitable, seleccionar muy bien al personal que ha de hacer dicho trabajo y establecer protocolos de chequeo para detectar posibles errores de digitación.
- Realizar chequeos periódicos de los datos y validación de los mismos.
- Realizar las debidas correcciones en caso de errores en los datos y documentar los cambios realizados.
- Respalda periódicamente la base de datos en un lugar seguro y con accesos restringidos solo para los usuarios autorizados.

- Documentar los cambios realizados a la base de datos, estableciendo fecha, responsable del cambio, modificaciones aplicadas a la base de datos, y las implicaciones que tiene sobre los datos existentes.
- Verificar y dejar muy claras las unidades que se manejarán para los diferentes datos numéricos.
- Ingresar dos veces y de forma independiente los datos sensibles.
- Realizar auditorías periódicas a la base de datos.

3.4 Revisión bibliográfica

La recopilación de información de trabajos anteriores ofrece un punto de partida para la planeación de las diferentes fases del proyecto y facilita el diagnóstico de la información que es necesario capturar; por lo tanto, ayuda en la programación de actividades prioritarias para la toma de datos.

Los antecedentes históricos incluyen, pero no se limitan a, información relevante de los cambios de titularidad del área, trabajos desarrollados en el área, prospecciones geológicas previas, cartografía geológica, programas de muestreo, resultados de laboratorio, prospecciones geofísicas, programas de perforación, calidad del carbón, bases de datos, datos de producción, porcentajes de recuperación, reportes de recursos y reservas y delimitación de zonas explotadas en la propiedad y sus alrededores, por minería formal e informal.

Los resultados de la recopilación de información son una base para orientar los programas exploratorios. La revisión bibliográfica de la información cartográfica, geológica y minera de la zona, es fundamental para generar un diagnóstico del estado de conocimiento del área de interés. En Colombia han sido identificadas cuencas carboníferas en las que se han desarrollado diferentes trabajos de exploración con el objetivo de conocer la secuencia estratigráfica, principales características de los mantos de carbón, características estructurales, entre otra información, esta información debe revisarse cuidadosamente.

Recomendaciones

- Recopilar los documentos referentes a los diversos temas que deben abordarse en la exploración (geología, geomorfología, hidrogeología, muestreos, entre otros);
- Realizar un filtro de la información útil para el proyecto, así como diferenciar entre los datos que serán usados como referencia y los que serán incorporados a las bases de datos del proyecto.
- Estructurar los datos seleccionados de acuerdo con los protocolos determinados para ello, y verificar y validar los datos que se incorporarán a las bases de datos.
- Construir una base de registro de la información relevante de cada documento revisado.
- Tomar información de fuentes confiables.
- Dar los créditos a la información obtenida de terceros.

3.5 Propiedades adyacentes

Propiedades adyacentes son todas aquellas áreas circundantes del título o títulos objeto del estudio que puedan tener relación con la mineralización de interés. El objetivo de identificar las propiedades vecinas es diagnosticar el potencial geológico del área y

evaluar la posibilidad de la presencia de depósitos similares en áreas aledañas que puedan continuar hacia la propiedad minera (ECRR®, 2018).

Si las propiedades adyacentes o cercanas tienen una importancia relevante para el proyecto, entonces su ubicación y la relación con el depósito del proyecto deben incluirse en los mapas y en las descripciones (ECRR®, 2018).

El conocimiento de las propiedades vecinas también da un marco del desarrollo de infraestructura asociado a la minería e indirectamente de la aceptación de la actividad minera en un área determinada, cuando existe o ha existido actividad extractiva en la zona. En los casos en los que no hay evidencia de minería en la región, el análisis de las propiedades adyacentes puede evidenciar el potencial de la zona, en términos de yacimientos por descubrir.

Recomendaciones

- Resumir la historia minera del área ya que ésta ofrece una idea de la favorabilidad geográfica y económica de la zona para proyectos mineros.
- Identificar los trabajos de minería tradicional en la zona.
- En caso de que las hubiere, ubicar las zonas con pasivos ambientales para determinar su impacto en el proyecto.
- Revisar las plataformas de información pública y gubernamental para identificar los títulos y solicitudes adyacentes al área.
- En los casos en los que sea posible, identificar los problemas o dificultades que hayan tenido los propietarios de áreas adyacentes para desarrollar sus proyectos, esto con el fin de anticiparse a posibles dificultades similares que puedan darse en el título.
- Documentar adecuadamente las fuentes de información consultadas para análisis de propiedades adyacentes y citar debidamente la información.

3.6 Análisis de imágenes de sensores remotos

El análisis de imágenes como fotografías aéreas, imágenes de satélite, imágenes de radar, entre otras, permite identificar geoformas, cambios morfológicos, variaciones texturales, cambios en vegetación, sistemas de drenaje, entre otros; así como rasgos asociados a los depósitos de carbón (Valencia Suaza et al., 2022).

El uso de imágenes de sensores remotos facilita el análisis y evaluación de áreas extensas de manera remota, así como la identificación de los principales rasgos estructurales que pueden incidir en la continuidad de los mantos de carbón, como son cambios en la disposición estructural de las unidades o estructuras como fallas y plegamientos.

Recomendaciones

- Emplear imágenes de sensores remotos del área a escala y resolución apropiadas.
- Definir unidades homogéneas.
- Identificar las zonas más adecuadas para desarrollar los trabajos en campo.

3.7 Cartografía geológica

Un conocimiento suficiente de la geología del yacimiento determinará la densidad de los datos necesarios para definir la confiabilidad de las estimaciones. El entendimiento de la

geología del yacimiento debe ser el factor más importante y el punto de partida en la clasificación y estimación de los recursos minerales.

Los resultados de la cartografía geológica local se representan en mapas con la distribución espacial de las distintas unidades geológicas, perfiles geológicos preliminares que muestran el posible comportamiento del yacimiento a profundidad, columnas estratigráficas que muestren la ubicación de los mantos de carbón, continuidad, contactos, características de los respaldos, geometría y continuidad; así como con los principales rasgos estructurales y tectónicos (fallas, lineamientos, estratificaciones) cuando estos son identificables (Valencia Suaza et al., 2022).

Por las características de los depósitos de carbón, es relevante obtener información de discontinuidades, no solamente en los mantos de carbón, sino también en los respaldos de los mismos, información que es de utilidad durante la explotación, así como en la evaluación de la geotecnia e hidrogeología del yacimiento.

La caracterización geológica del yacimiento para depósitos de carbón debe incluir, al menos, las siguientes consideraciones:

- Entorno geológico regional.
- Estructura del yacimiento, incluido el buzamiento de las capas, las fallas, los pliegues, entre otros.
- Comparación con los proyectos vecinos, incluida la comprensión de las similitudes y diferencias geológicas, y los peligros potenciales encontrados anteriormente en la región.
- La naturaleza de los mantos de carbón, incluyendo si los mantos son gruesos y continuos, o si se encuentran múltiples mantos delgados y si existen abundantes divisiones, etc.
- Influencias postdeposicionales, incluida la profundidad de la meteorización, las discordancias, movimientos en masa, entre otros.
- Propiedades geotécnicas del carbón y de las otras capas de interés y su influencia en el método de extracción propuesto.
- Composición, clasificación y su repercusión en los parámetros de calidad y en los posibles productos del carbón.
- Características geográficas y relación entre las características estructurales y deposicionales, en particular con respecto a la variabilidad topográfica, los sistemas fluviales, la meteorización y la oxidación.

Durante la cartografía geológica es relevante registrar puntos de observación de los mantos de carbón, tanto para calidad como espesores. En áreas en las que existe información de explotaciones subterráneas, es relevante contar con esta información, teniendo en cuenta las condiciones de seguridad.

3.7.1 Puntos de control en superficie

Acorde con la guía australiana para la estimación y clasificación de recursos de carbón (Guidelines Review Committee, 2014), se debe contar con puntos de control que permitan contar con información respecto a la cantidad (espesor, continuidad) o calidad del carbón; cada punto debe diferenciarse claramente y presentarse en los planos y columnas manto por manto. En la **Tabla 2** se presentan las principales características de estos puntos.

Tabla 2. Características de puntos de control de calidad y puntos de observación de calidad.

<i>Punto de control de calidad</i>	<i>Punto de observación de cantidad</i>
<p>Se obtiene a partir de resultados de análisis de muestras obtenidas a partir de afloramientos en superficie, trabajos subterráneos, muestras de núcleos de perforación con un nivel aceptable de recuperación para ser consideradas representativas del manto.</p> <p>Deben adquirirse los datos pertinentes del análisis del carbón para determinar la naturaleza del carbón y los productos potenciales para los puntos de observación de la calidad del carbón. Si es necesario beneficiar el carbón para obtener la mezcla de productos deseada y/o se requieren parámetros de calidad adicionales para confirmar su idoneidad, los datos de rendimiento y de calidad de los productos pertinentes deberán incluirse en los criterios de los puntos de observación de la calidad del carbón. En caso contrario, deberá justificarse la ausencia de tales datos.</p>	<p>Un punto de observación para la evaluación de la cantidad se obtiene normalmente mediante mediciones de exposiciones superficiales o subterráneas o de intersecciones de perforaciones. El espesor y la ubicación del manto deben ser inequívocos. Los registros de mantos encontrados en pozos sin recuperación de núcleo pero soportados por los registros geofísicos pueden ser considerados como puntos de observación de cantidad.</p> <p>Los puntos de observación para la estimación de la cantidad no se utilizarán necesariamente para la evaluación de la calidad del carbón, por lo que el distanciamiento y la ubicación de cada uno de ellos deberán indicarse por separado.</p>

Fuente: Modificado de (Guidelines Review Committee, 2014).

Los puntos de control permiten determinar la presencia de carbón sin ambigüedades, corresponde a secciones con estratos con carbón, en ubicaciones conocidas y debidamente registradas en coordenadas Este y Norte, en los cuales se obtiene información sobre el carbón mediante observación, medición (in situ) y/o pruebas (muestreo). (Guidelines Review Committee, 2014)

- Los puntos de control tienen diversos grados de confiabilidad y pueden incluir afloramiento en superficie, en trabajos subterráneos, núcleos de perforación, registros geofísicos de pozo y fragmentos de perforación representativos en sondeos sin recuperación de núcleo (Guidelines Review Committee, 2014).
- Los límites de confianza de los recursos deben determinarse fusionando los límites de confianza de la cantidad (toneladas) con los límites de confianza de la calidad del carbón. Los yacimientos sin datos sobre la calidad del carbón no pueden considerarse recursos, ya que no existen datos para establecer el valor relativo necesario para la prueba de perspectivas razonables (Guidelines Review Committee, 2014).
- En la mayoría de los depósitos de carbón, se tienen más puntos de control para la cantidad del carbón que puntos de control de calidad. Como resultado, los puntos de observación de calidad del carbón generalmente se consideran el principal delimitador de las categorías de recursos. Sin embargo, hay depósitos en los que la variabilidad de la cantidad es mayor que la variabilidad de calidad. Esto incluiría depósitos altamente fallados o estructuralmente complejos. En

estos casos, la confianza y los límites de los recursos pueden ser delimitados por los puntos de observación de la cantidad (Guidelines Review Committee, 2014).

3.7.2 Puntos de control en túneles

Las observaciones dentro de la mina se pueden realizar rápidamente y deben hacerse con un espaciado constante. Por lo general, las únicas herramientas necesarias para las observaciones en la mina son un levantamiento topográfico de la mina, cinta métrica y brújula.

Las observaciones deben realizarse en cada intersección. Sin embargo, los puntos de observación se pueden aumentar dependiendo de la precisión deseada. Una observación debe ser lo más detallada posible porque puede ser fácil cuestionar los datos más adelante si parecen incompletos. Algunas de las características que deben describirse durante la cartografía de los túneles son todas las litologías en paredes, techos y pisos. Cualquier característica como fallas, cambios en la elevación del carbón, levantamiento del piso, fracturas, presencia de agua, estrías de falla, diaclasas, deben trazarse en el mapa de observación.

3.7.3 Datos estructurales

Para el buen desarrollo de una cartografía enfocada a la exploración de carbón, se debe tener en cuenta como principio fundamental la toma de datos estructurales en los mantos de carbón y los respaldos de estos, lo que permite llevar un control geológico y geotécnico para la futura explotación, considerando que esta información permite mantener la seguridad en las excavaciones, detectando a tiempo las zonas de falla principales.

La observación del terreno requiere el conocimiento, entre otros, de la geología estructural, de las propiedades de las rocas, de las aguas subterráneas y tensiones del subsuelo, así como la interacción de todos estos factores. Las características y parámetros geométricos de los planos de discontinuidad, basadas en la toma de datos estructurales (rumbo y buzamiento) influyen en la cuantificación de las distintas situaciones o estados geomecánicos. En la Figura 3 es mostrado, de forma esquemática, la información a recopilar durante los levantamientos de datos estructurales.

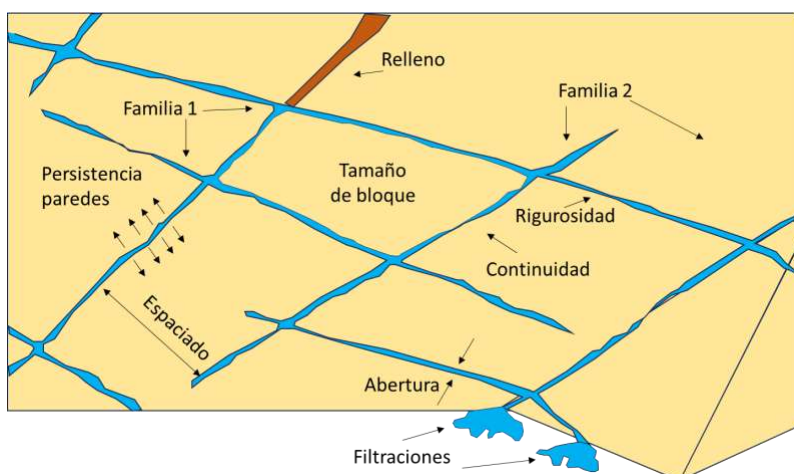


Figura 3. Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades

Fuente: Modificado de Hudsonm (1989), tomada de González de Vallejo et al (2004).

Estos datos deben ser relacionados con la estabilidad de la excavación y presentados en plantas y perfiles geológicos-geotécnicos, que muestren las condiciones geológicas identificadas. El seguimiento cartográfico a partir de la toma continua de datos estructurales aporta los criterios básicos para definir el sostenimiento, avance y desarrollo de las labores subterráneas; igualmente en las explotaciones a cielo abierto permite evaluar las condiciones de estabilidad apropiadas para para la explotación minera.

Recomendaciones

- Definir una escala de trabajo adecuada para la cartografía geológica, acorde con la etapa del proyecto y el nivel de detalle que se busca obtener.
- Utilizar bases topográficas actualizadas y validadas, a escala adecuada y con el sistema de coordenadas definido para el proyecto.
- Describir los afloramientos de los yacimientos de carbón y unidades litológicas en el área del proyecto empleando una leyenda y/o códigos para la descripción geológica común, que sea compatible con información que se obtenga en etapas posteriores de logueo de apiques, trincheras o perforaciones.
- Levantar columnas estratigráficas a escala adecuada, identificando la ubicación de los mantos de carbón, características de las rocas de los respaldos.
- Asegurar que los profesionales trabajen con los protocolos específicos para la cartografía geológica.
- Obtener información hidrológica / hidrogeológica (puntos de agua, niveles freáticos, caudales)
- Es recomendable, en la medida que se explora y si los resultados son prometedores, levantar la información de flora, fauna, ciénagas, arqueológica, entre otra, que facilite el manejo ambiental del proyecto y la obtención de permisos por parte de las autoridades correspondientes.
- Mantener los registros de información.

3.8 Exploración geofísica

La exploración geofísica permite obtener información que mejore la confianza en la continuidad de los mantos de carbón, como es el caso de datos en profundidad ajustados a interpretaciones sísmicas en 2D y 3D.

Existen diferentes métodos de prospección geofísica aplicables a la exploración de carbón; con aplicación en la identificación de fallas geológicas, mapeo litológico, evaluación geotécnica, detección de vacíos. La gama de técnicas que se pueden emplear es extensa e incluye registro geofísico de pozos, la reflexión sísmica (2D y 3D), resistividad, electromagnetismo, entre otras. (Hatherly, 2013).

La elección del método geofísico depende de factores como el entorno geológico, la profundidad de los mantos de carbón y los objetivos específicos del proyecto. La combinación de varios métodos geofísicos a menudo proporciona una comprensión más completa de las condiciones del subsuelo, en la Tabla 3, se relacionan algunos métodos geofísicos de campo de uso común en exploración de carbón, los métodos de registros eléctricos se describen en el capítulo sobre perforaciones.

Tabla 3. Métodos geofísicos en exploración de carbón.

Método	Parámetro medido	Principal aplicación
Sísmica de Reflexión	Velocidad de onda	Identificación de estructuras (fallas, pliegues), correlación de mantos
Sísmica de Refracción	Velocidad de onda	Identificación de estructuras (fallas, pliegues), correlación de mantos
GPR		Identificación de estructuras (fallas, pliegues), correlación de mantos
Geofísica en pozos exploratorios	Densidad, gamma, resistividad, inclinación	Identificación de espesores de estratos (incluyendo carbón), intercalaciones

Fuente: Elaboración propia.

Recomendaciones

- Contar con un modelo geológico del depósito, en el que se tenga identificada la secuencia con la posición estratigráfica de los mantos de carbón que permita realizar un diseño adecuado de la adquisición.
- Documentar el proceso de adquisición, procesamiento e interpretación (espaciamiento, tamaño, equipos empleados, condiciones de adquisición) y cualquier otro parámetro que al variar pueda influir o cambiar los resultados.
- Conservar los datos originales (*raw data*) de la adquisición.

- Validar con información directa proveniente de afloramientos, perforaciones, apiques, entre otros de manera que permitan tener resultados con mayor precisión.
- Integrar la información geológica con los resultados de la geofísica.

3.9 Técnicas de perforación

Al terminar la etapa de exploración de superficie y si se ha alcanzado la viabilidad para continuar con la exploración del subsuelo, se debe contar con información que identifique la posición y disposición estructural de los mantos de carbón, los cuáles son la base del plan de perforación.

Si la información, la estructura y los resultados de calidad inicial indican que el carbón es de interés económico, entonces la siguiente etapa en la exploración será la ubicación de los sitios de perforación para proporcionar datos en aquellas áreas entre afloramientos de carbón conocidos y en áreas donde no se han localizado afloramientos pero en las que se cree que se encuentra el carbón.

La ubicación espacial del sitio de perforación con sus coordenadas: este, norte y profundidad debe tener la mayor precisión posible, pues los datos obtenidos de las perforaciones requieren de un correcto amarre espacial para brindar confianza en los datos y estimaciones.

Perforaciones tricono (Openhole)

El objetivo con este tipo de perforación es determinar la profundidad y el espesor de los mantos de carbón, así como las características de los estratos asociados.

Para la mayoría de los pozos perforados en el área principal de interés, se utilizan plataformas de perforación rotativas. Estas plataformas tienen buenas tasas de penetración, un costo relativamente bajo y son móviles. Proporcionan los medios más económicos de perforación de pozos abiertos a poca profundidad (hasta 400 m) de yacimientos de carbón. Los pozos de exploración suelen ser verticales, pero dependiendo de las características estructurales del área se pueden perforar pozos inclinados.

Perforación Corazonada

La perforación corazonada se realiza con el objetivo de obtener muestras de carbón fresco (brindando la posibilidad de obtener parámetros de la calidad del carbón), así como la descripción de las características litológicas de la secuencia sedimentaria asociada con los mantos de carbón.

La recuperación del núcleo de roca es facilitada por un segundo tubo de metal no rotativo dentro de la perforación. El núcleo pasa a este segundo tubo y está protegido de daños. Esto se llama barril de núcleo de doble tubo. Se pueden obtener recuperaciones de núcleo aún mejores mediante un barril de núcleo de triple tubo, mediante el cual se coloca un tubo de metal liso adicional, dividido longitudinalmente, dentro del segmento interno no giratorio del barril de núcleo de doble tubo.

Descripción de perforaciones (Core logging)

Las perforaciones, apiques y demás obras requeridas para adquirir datos, son métodos que implican una inversión y un esfuerzo, por lo cual, vale la pena registrar la mayor cantidad de datos posible que pueden encontrarse en estas obras.

El registro de información, también conocido como *logueo*, es necesario para la estimación de recursos y reservas. Éste debe incluir una descripción cuidadosa y detallada de los estratos identificados a lo largo de la perforación. El registro de cada sitio caracterizado permite establecer correlaciones entre los diferentes estratos sedimentarios con los cuales se genera la geometría del depósito y se realizan las estimaciones subsecuentes.

Para garantizar un registro completo, se recomienda diseñar formatos de captura de datos que sean acordes con el tipo de obra (trinchera, apique, perforación), así como elaborar los protocolos necesarios (ver numeral 2.9). Los formatos diligenciados y la información capturada en los mismos deben ser almacenados correctamente.

La información básica que se obtiene de apiques, trincheras o perforaciones incluye el identificador de la obra, la localización (coordenadas, E, N y cota), longitud, profundidad, dimensiones de la obra (diámetro en el caso de perforaciones), espesor de estratos, granulometría, composición, presencia del mineral de interés, identificación de las muestras tomadas, entre otros.

Debido a que la perforación de núcleos es una parte costosa del programa de exploración, los núcleos que se obtienen deben describirse con el mayor detalle posible, particularmente en los mantos de carbón, así como sus respaldos al techo y piso. La recuperación total del núcleo (TCR) se define como la proporción del núcleo recuperado con respecto a la longitud total del tramo perforado. La ejecución del núcleo es la longitud reportada por el perforador a medida que penetra la profundidad real, esto incluye tanto el núcleo sólido como el núcleo no sólido (Valentine & Norbury, 2011).

Recomendaciones

- Registrar el porcentaje (%) de recuperación de cada perforación.
- Realizar una descripción geológica y geotécnica de las perforaciones.
- Complementar la descripción litológica con registros geofísicos (eléctricos) de las perforaciones.
- Realizar la medición de la orientación (survey) de las perforaciones.

3.9.1 Registros geofísicos

Los registros geofísicos de pozo pueden contribuir en aumentar la confianza en la comprensión de los atributos físicos de los mantos de carbón de una zona (posición, profundidad y espesor, etc.). También pueden contribuir, de forma más limitada, a aumentar la confianza en la variabilidad y continuidad de determinadas propiedades químicas básicas.

En las perforaciones de exploración de carbón, los registros geofísicos de pozo se realizan de forma rutinaria para ayudar a identificar las litologías intersectadas y los mantos de carbón. Cuando las condiciones de la perforación lo permiten, estos registros (en particular el gamma natural, la densidad y caliper) pueden utilizarse para realizar

estimaciones razonablemente precisas de los límites superior e inferior (techo y piso) de los mantos de carbón intersectados. Esto los hace especialmente útiles en perforaciones en las que no se ha extraído ningún testigo y también cuando el espesor no puede determinarse de forma fiable a partir de la longitud de los testigos recuperados.

Cuando se toman muestras de carbón para pruebas analíticas en pozos en los que se han extraído testigos de los mantos de carbón, los registros geofísicos (en particular, las combinaciones de registros de densidad/caliper) también pueden utilizarse para determinar con mayor seguridad las zonas de pérdida significativa de testigos. Los registros geofísicos son también una herramienta invaluable para ayudar en las correlaciones estratigráficas y de mantos de carbón en los estudios de yacimientos carboníferos, tanto a escala regional como a un nivel más localizado de "yacimiento" o mina.

Algunas respuestas de los registros geofísicos, en particular los registros de densidad, gamma, densidad neutrón y sónico pueden correlacionarse con resultados de pruebas físicas realizadas en laboratorio obtenidas a partir de muestras de testigos de sondeos. De este modo, pueden establecerse relaciones entre, por ejemplo, la resistencia de la roca determinada en laboratorio y la velocidad sónica. Estas herramientas geofísicas responden a la densidad de la roca, el espaciado de las fracturas, la resistencia de la roca y la porosidad. Los registros geofísicos más especializados, como los registros de buzamiento y los registros de escáner óptico o Acoustic Televiewer, pueden utilizarse para medir la orientación estructural de las capas y mantos y la identificación de rasgos estructurales. En la Figura 4 es mostrado un ejemplo de registro eléctrico en un proyecto de carbón, que incluye: Caliper, resistividad, potencial espontáneo, gamma natural y densidad, en el cual se identifica un manto de carbón.

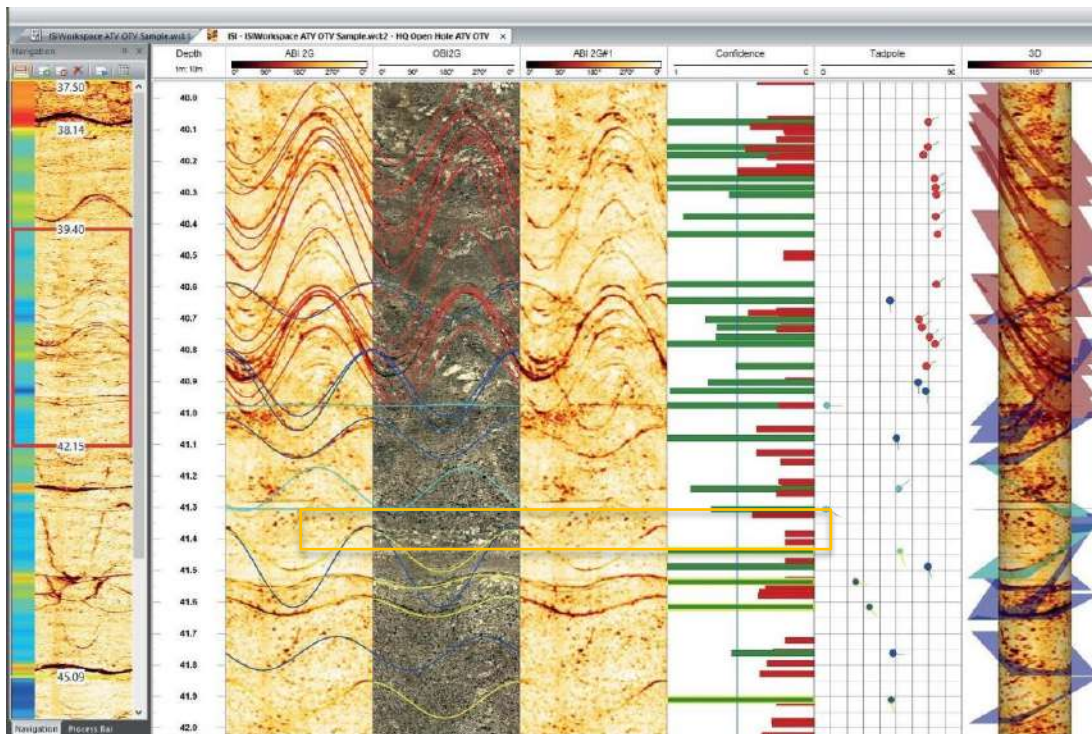


Figura 4. Integración de registros geofísicos y comparación con logueo litológico.

Fuente: Proyecto San Carlos - Inversiones Nueva Colonia

Recomendaciones

- Materializar los sitios de perforación por medio de mojones
- Identificar los permisos y guías ambientales a seguir en la ubicación de plataformas de perforación.
- Contar con procedimientos y protocolos para la descripción de los apiques, trincheras o perforaciones.
- Contar con simbología y tablas de referencia estandarizadas para registrar las características de los estratos y los sedimentos.
- Almacenar adecuadamente la información adquirida y establecer una periodicidad de alimentación de la base de datos.
- Definir el conjunto de registros eléctricos a realizar en cada perforación, considerando la información que se busca obtener. Considerar al menos la inclusión de registro de resistividad, potencial espontáneo, densidad, gamma natural y caliper.
- Una intersección del manto de carbón completa en un pozo no corazonado que haya sido registrada geofísicamente (al menos con registros de densidad y caliper) puede utilizarse como un punto de observación de estructura que permitiría utilizar ese punto a efectos de estimación/cálculo volumétrico.
- Se recomienda la "calibración" visual de las respuestas geofísicas con respecto a las litologías registradas en los sondeos con núcleo antes de considerar el uso de registros geofísicos de otros sondeos sin núcleo en otros lugares de la zona de evaluación, para garantizar que la interpretación de las respuestas geofísicas sea compatible con las litologías observadas en las perforaciones con núcleo.
- En los casos en los que las respuestas geofísicas se hayan calibrado con respecto a los análisis de calidad del carbón obtenidos en laboratorio, y cuando la reproducibilidad de un parámetro geofísico concreto (por ejemplo, el valor de cenizas o la densidad derivada del registro de densidad/caliper) se encuentre dentro de tolerancias aceptables, entonces ese parámetro de calidad del carbón derivado geofísicamente podría utilizarse para apoyar la continuidad de la calidad del carbón in situ. Sin embargo, los atributos de calidad del carbón derivados geofísicamente no incluirán ningún parámetro de coquización, ya que éstos sólo pueden determinarse mediante pruebas físicas de las muestras de carbón.
- Asegurar que se registre información de cada perforación, relacionada con: número de pozo, detalles de perforación de pozo abierto, diámetro del barrenado, tamaños y profundidades de revestimiento (si se utilizan), detalles de cada corrida, longitud del núcleo recuperado, ubicación del nivel piezométrico (en caso de identificarse) descripción de los estratos, detalles de las pérdidas de descarga y cambios de broca, tipo de broca, y detalles del equipo de perforación.

3.10 Muestreo

El objetivo de un muestreo de carbones es obtener una muestra representativa de una unidad de muestreo, de tal manera que la distribución y la proporción de sus variables físicas, químicas y petrográficas sean equivalentes a esa unidad de muestreo (ECOCARBON, 1995) y las normas ASTM D2234 M y ASTM D 7430-08.

Durante el muestreo no debe ahorrarse ningún esfuerzo en cuanto al cuidado y precisión de esta actividad, ya que de esto depende, en alto grado, el éxito de las subsiguientes actividades de preparación y análisis de muestras, siguiendo metodologías aprobadas y

con los procedimientos adecuados para ser protegidas de la contaminación y posibles cambios químicos (ECOCARBON, 1995).

Un muestreo adecuado permite evaluar, entre otros, los siguientes resultados:

1. Caracterizar física, química, petrográfica y tecnológicamente los carbones.
2. Conocer la variabilidad de los parámetros de calidad analizados.
3. Planificar las etapas de desarrollo y producción de proyectos mineros.
4. Definir usos industriales y tecnológicos del carbón.
5. Realizar contratos de compraventa.
6. Identificar problemas de tipo ambiental durante la producción, manejo, procesos de beneficio y utilización del carbón.

Las muestras son porciones representativas de un cuerpo de material, que son obtenidas para pruebas y análisis, con el fin de evaluar la naturaleza y composición del cuerpo original; estas muestras son obtenidas por métodos aprobados y con las medidas necesarias para ser protegidas de la contaminación y posibles cambios químicos (Thomas, 2020).

Dichas muestras deben diferenciarse de aquellos materiales obtenidos de manera que no son representativas de las características del carbón del cual han sido tomadas. Estos materiales aún pueden ser útiles, pero deben considerarse como especímenes en lugar de muestras (Pryor 1965).

El muestreo de carbón puede realizarse como parte de un programa de exploración en áreas en las que se busca determinar si la calidad y cantidad de carbón es suficiente para continuar con actividades de exploración a mayor detalle, como parte de un programa de desarrollo de mina, o como muestras de rutina en minas tanto a cielo abierto como subterráneas para garantizar que la calidad del carbón que se extraerá cumple con las necesidades del mercado.

El muestreo es una actividad imprescindible en la industria del carbón, la cantidad de dinero involucrada en el negocio de la explotación, procesamiento, venta y uso de carbón, dependen de resultados analíticos, lo que exige que el muestreo se realice utilizando metodologías aceptadas por la industria, de manera que se garantice la representatividad de los resultados, controlando los posibles errores durante el muestreo, custodia y posterior análisis. Los posibles errores introducidos en cada etapa son aditivos, es decir, el error total asociado con los resultados analíticos es la suma de los errores desde el muestreo, preparación de la muestra y análisis.

Las muestras de carbón pueden obtenerse de afloramientos en superficie, mantos de carbón expuestos en trabajos a cielo abierto y/o subterráneos y de núcleos de perforación. En el proceso industrial, se toman muestras de mantos de carbón ROM (run-of-mine), contenedores de transporte de carbón y acopios de carbón (Thomas, 2020).

Estas muestras pueden ser tomadas en condiciones variables, particularmente referente al clima y topografía, por lo que es esencial que cada muestra tomada sea representativa de las características del carbón, ya que proporcionará los datos básicos de calidad sobre los cuales se tomarán las decisiones para continuar con la exploración, invertir en nuevos desarrollos o realizar cambios en la producción de la mina (Thomas, 2020).

Las mejores prácticas de muestreo exigen que las muestras se tomen de forma que representen la variabilidad geológica; solo un muestreo adecuado permite entender esta variabilidad. A menudo, el análisis de muestras no se atiene a este principio, sino que comprende muestras o muestras compuestas cuya variabilidad interna en un intervalo

corto queda enmascarada por la toma de muestras en intervalos más amplios o por la combinación de intervalos (a veces discontinuos) (Figura 5).

La decisión de permitir que estos datos sean utilizados como punto de control de calidad depende de si la muestra es representativa o no, según el sentido en que se utilizará el análisis.

Por ejemplo, no es adecuado tomar los resultados obtenidos de una muestra compuesta para asignarle las características de calidad a cada capa por separado, sin embargo, puede ser válido afirmar que los valores del análisis son representativos de una unidad combinada.

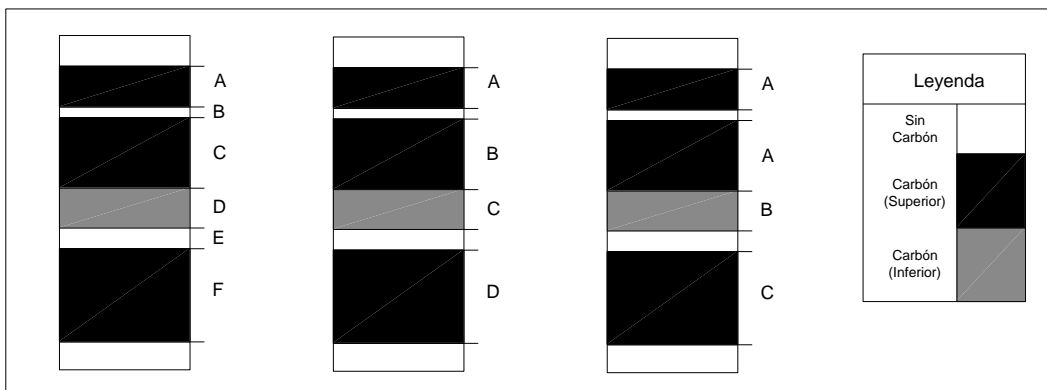


Figura 5. Muestreo de carbones y su implicación para definición de secciones de trabajo.

Fuente: Modificado de (Guidelines Review Committee, 2014).

Recomendaciones:

- Es importante tener en cuenta que la pérdida potencial de material dentro de una muestra puede ser crítica, independientemente del porcentaje relativo perdido. La muestra analizada debe ser representativa del material in situ dentro del intervalo de interés. Los datos geofísicos de profundidad deben usarse para confirmar la ubicación y la naturaleza de cualquier pérdida de núcleo en los mantos de carbón.
- Se requiere una buena recuperación de muestras para que sean representativas y es importante identificar y documentar lo que se considera aceptable para la recuperación de muestras. Las pérdidas inaceptables deben identificarse y, en su caso, la muestra debe rechazarse como punto de observación. La recuperación de masa calculada (a partir de la masa de la muestra bruta, la densidad relativa, el diámetro del núcleo) se puede utilizar para identificar errores de medición de campo. Se debe considerar la integridad de la muestra y su impacto en la distribución del tamaño de partícula.
- En el diseño de los programas de muestreo y ensayo del carbón es necesario tener en cuenta el tamaño máximo de la muestra y la masa disponible para realizar los ensayos necesarios.
- Lo ideal sería que el muestreo se efectuara utilizando los datos recogidos a nivel de capa para todo el manto de carbón. Esto proporcionará una mejor comprensión de los controles geológicos sobre las características de calidad del carbón. El muestreo no debe controlarse mediante criterios de minería, ya que

los parámetros pueden cambiar en el futuro, dependiendo de factores como la economía o las especificaciones del producto del cliente.

3.10.1 Diseño de muestreo

Un adecuado muestreo permite realizar una buena caracterización físico-química de los carbones, planificar las etapas de desarrollo y producción de los proyectos mineros, definir los usos e identificar problemas relacionados con el medio ambiente durante las etapas de producción, manejo y procesos de beneficio. Previo al inicio del programa de muestreo se debe considerar los siguientes aspectos:

- Objetivo del muestreo
- Material a ser muestreado
- Cantidad de muestra a tomar
- Análisis requeridos
- Precisión requerida
- Aspectos logísticos requeridos
- Tipo de muestra requerida
- Zonas / intervalos a muestrear y malla propuesta
- Datos a tomar para cada muestra
- Procedimientos de recolección de datos
- Método de análisis
- Equipos a emplear durante el muestreo

En la Figura 6 se presenta un flujograma con algunos ítems importantes que se recomienda considerar en la ejecución de un muestreo.

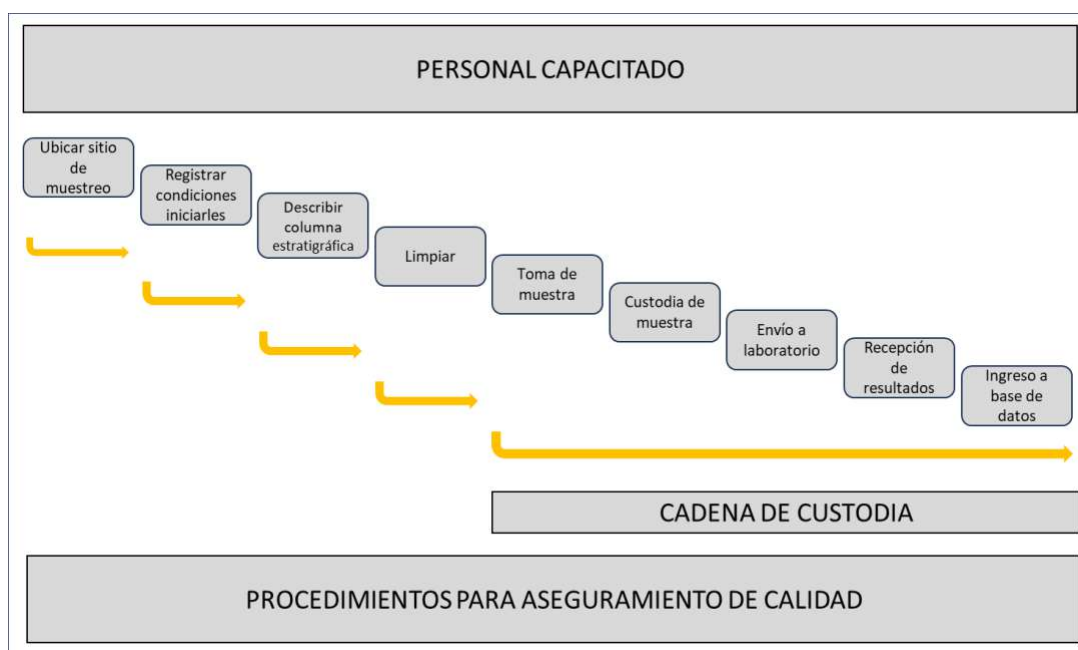


Figura 6. Consideraciones importantes para la toma de muestras

Fuente: autores

Recomendaciones

- Plantear una toma de muestras que sea representativa para el área del depósito y acorde con la fase de trabajo del proyecto.
- Seleccionar una técnica de muestreo acorde con las características específicas del yacimiento.
- Rotular las muestras de manera clara, que permita su identificación sin lugar a equivocaciones. Dicho rótulo debe realizarse en material que sea perdurable, resistente al agua y que no se borre, es conveniente pegarlo al menos en dos sitios diferentes del empaque.

3.10.2 Métodos de muestreo

Acorde con las características y etapa en la que se encuentre el proyecto minero es posible seleccionar el método de muestreo que suministre información de la mejor manera.

Una vez definido el tipo de muestreo, existen diferentes métodos aplicables a los yacimientos de carbón, tales como: muestreos en canal, apiques, perforaciones y durante la operación minera (Ver Figura 7).

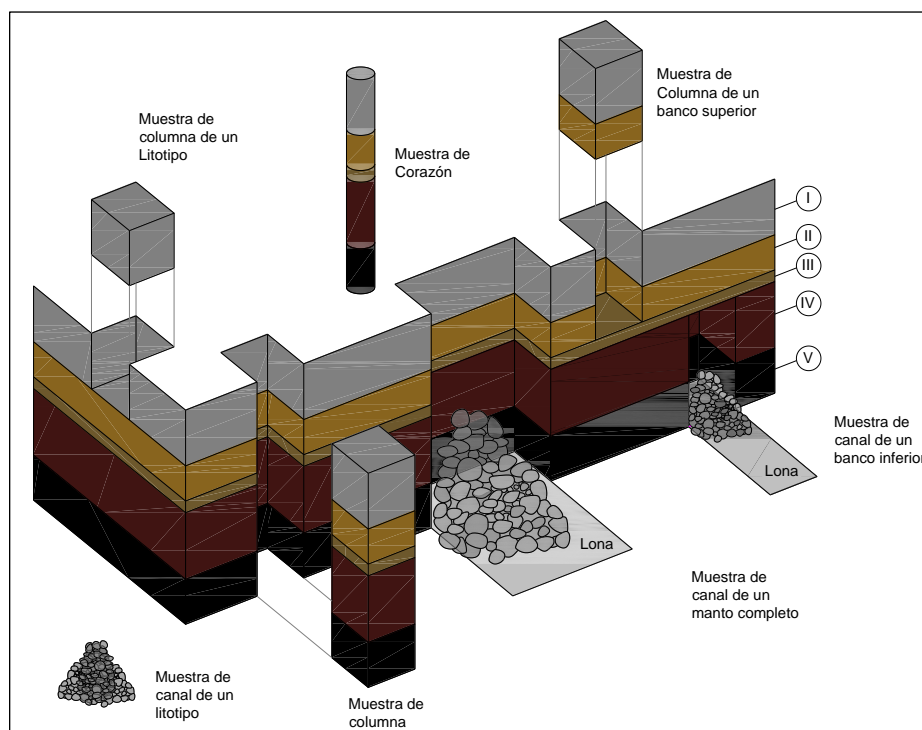


Figura 7. Tipos de muestras de carbón.

Fuente: ECOCARBON, 1995

Muestreo de afloramiento

Se toma de un manto de carbón cuando aflora, mediante trincheras, apiques y túneles. En este caso, el carbón muestreado se encuentra expuesto a las condiciones atmosféricas durante un largo tiempo, por lo que la meteorización puede extenderse desde la superficie expuesta hacia el interior del mando por varios metros.

Muestreo de columna

A partir de esta muestra de columna, se puede realizar un muestreo detallado de cada capa o unidad litológica, lo que permite realizar correlaciones dentro de la columna.

Muestreo de canal

La muestra de canal se toma a partir de un corte uniforme y perpendicular a la estratificación. Son muestras de volumen de carbón triturado que incluye el espesor total del manto, y deben ir acompañadas de muestras de los respaldos, techos y pisos de cada manto de carbón (Ver Fotografía 1)



Fotografía 1. Muestreo de canal en carbones.

Fuente: Cortesía Carbocoque

Este tipo de muestreo se realiza sobre un frente fresco de carbón en una mina en producción, tal y como se observa. En este muestreo se deben considerar los siguientes pasos mínimos:

- Ubicar el sitio de toma de muestras.

- Describir, registrar y levantar la columna estratigráfica con la ubicación del manto de carbón, incluyendo descripciones geológicas, características macroscópicas del carbón, posición de las intercalaciones tipo de respaldo, piso y techo.
- Realizar un canal mediante corte uniforme y continuo.
- Obtener una superficie lo más regular posible.
- Limpiar la superficie a muestrear hasta una profundidad de 5 cm como mínimo, en caso de estar meteorizado el manto de carbón, se debe profundizar a criterio del geólogo.
- Extender sobre el piso una lona de tamaño y calibre apropiado, sobre la cual caerá la muestra, buscando con esto aislar la muestra de la humedad y las impurezas.
- Cuando se presenten intercalaciones se sugiere proceder de la siguiente manera:
 - Para mantos con intercalaciones menores de 10 cm de espesor, se deberá muestrear conjuntamente con el carbón.
 - Para mantos con estériles mayores a 10 cm y menor a 60 cm se deberá muestrear separadamente el carbón.
 - Para mantos con respaldos mayores a 60 cm se analizarán como respaldos, pues se debe considerar como dos mantos diferentes.
- Utilizar etiquetas para las muestras.
- Empacar la muestra de forma adecuada y marcarla cuidadosamente.
- El peso de la muestra debe estar entre 10 kg y 30 kg, según lo indique el laboratorio.
- Registro fotográfico.
- En la medida de lo posible, dejar muestra testigo.

Muestreo de perforación

Este muestreo incluye las muestras de núcleos y muestras de ripios. Las muestras de núcleos se obtienen mediante la perforación con taladro, con diámetro de muestra entre 1 y 3 pulgadas, por el espesor del manto de carbón. Este tipo de muestras da información importante sobre sus componentes, posición original y orientación. Las muestras de ripio, se obtienen con taladros de brocas tricónicas, el cual tritura la muestra en partículas finas. Este tipo de muestreo no se recomienda para la realización de análisis físicos y químicos, debido principalmente a la alta mezcla de carbón con roca. Por el contrario, se usa para obtener información del espesor y la profundidad de los mantos de carbón y de los estratos de estériles.

La definición de protocolos de muestreo debe hacerse en función de las características estructurales y litológicas de los mantos identificados dentro del proyecto. A continuación, se muestran varios ejemplos para la toma de muestras dentro de perforaciones con recuperación de núcleos de un proyecto de mediana minería.

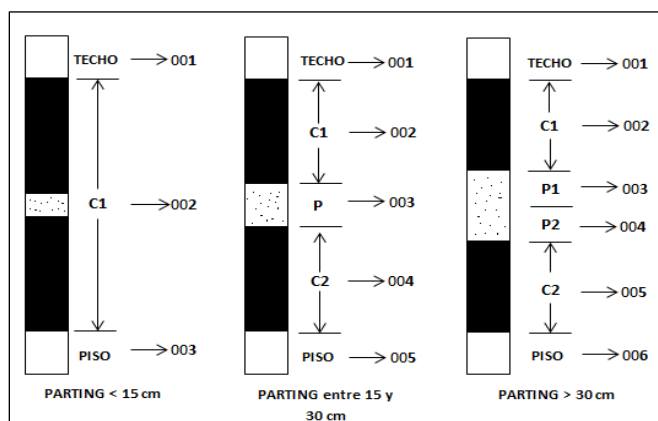


Figura 8. Tipo de muestreo con intercalaciones (Parting)

Fuente: Proyecto San Carlos - Inversiones Nueva Colonia

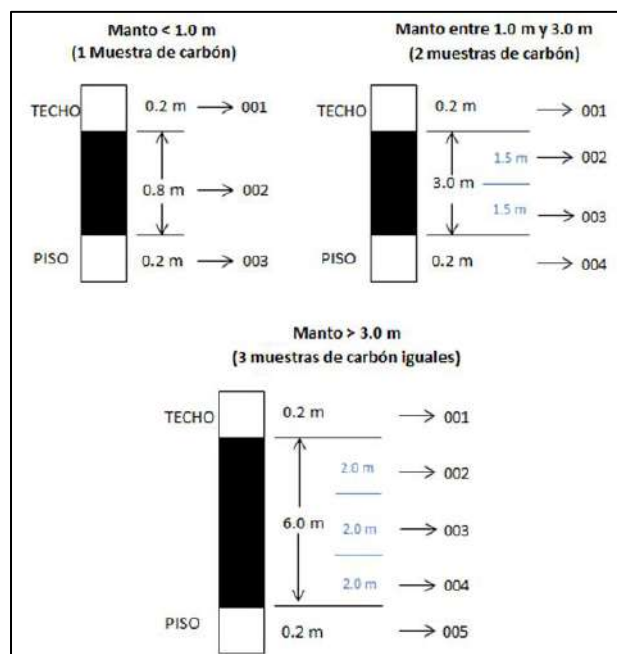


Figura 9. Tipo de muestreo con incrementos verticales (Plays)

Fuente: Proyecto San Carlos - Inversiones Nueva Colonia

Muestreo durante la operación minera

Este sistema de muestreo depende de la forma como el carbón es muestreado: si es muestreado de un flujo móvil en una banda, de un flujo móvil discontinuo, en un punto de descargue de un flujo en movimiento continuo o de una banda parada. De esta manera, el tipo de muestreo de producción puede realizarse en bandas transportadoras, volquetas, camiones y vagones o en barcos y pilas. También debe considerarse la

realización del muestreo para el control y determinación de calidades en frentes de avance (inclinados, niveles, tambores, galerías, entre otros).

Recomendaciones

- Adecuar el espacio para el manejo de la muestra.
- Tomar las acciones necesarias para evitar pérdida y contaminación de la muestra.
- Disponer de toda la documentación e insumos necesarios para registrar los datos e identificar las muestras (formatos, rótulos).
- Las herramientas para toma de muestras deben estar limpias, de manera que no haya riesgo de contaminación.
- Capacitar al personal en toma de muestras.
- Usar metodologías estandarizadas para la toma y preparación de las muestras de carbón.
- Cuando no se tenga la certeza de que el análisis presentado para un intervalo de muestreo representa la sección de trabajo definida, deberá tenerse en cuenta durante la evaluación de la confianza.
- Procurar mantener la muestra en condiciones similares a donde fue tomada (Especialmente en el empaque para preservar las condiciones de humedad originales)
- Antes de emprender un programa de muestreo, se deben definir los siguientes aspectos:
 - El material que hay que muestrear.
 - La cantidad que se va a recolectar.
 - Los análisis requeridos.
 - La precisión deseada.
 - La logística necesaria durante la operación.

3.11 Localización de la información

La localización de un punto de control, asociado a puntos de cantidad o de calidad, es única en el espacio (a no ser que se trate de muestras duplicadas), por lo que deben tomarse todas las medidas necesarias para garantizar que su ubicación en las tres dimensiones tengan la precisión requerida, de forma tal que puedan emplearse correctamente en una posterior estimación de recursos y/o reservas.

Para las muestras tomadas en trabajos subterráneos, se debe contar con una metodología adecuada para la ubicación de las mismas, que involucre el correcto amarre entre los trabajos subterráneos y la topografía del proyecto, así como un adecuado levantamiento subterráneo.

Recomendaciones

- Emplear un sistema de coordenadas único para la localización de muestras en el proyecto.
- Evaluar la precisión de los sistemas de posicionamiento global (GPS) a emplear en el proyecto, así como verificar la calibración, configuración y las condiciones operativas de los equipos utilizados.
- Realizar un amarre entre los trabajos subterráneos con topografía de superficie.

- Dejar mojones de referencia para las perforaciones.
- Preservar los archivos nativos para la localización de información, en el caso de GPS, mantener *tracks* y *waypoints*.
- Registrar el tipo de equipo con el cual se tomaron los datos de localización.
- Marcar cada sitio de toma de información e identificarlo con el código de la estación.
- Registrar los datos de localización de la estación en los formatos definidos para tal fin (análogo o digital).
- Diligenciar la información de localización completamente en campo, apoyado sobre mapas topográficos del área y en caso de realizar algún ajuste, dejarlo descrito en la libreta o formato. Localizar espacialmente las muestras en campo sobre los mapas (impresos o digitales) de manera que se valide la ubicación correcta.
- Evaluar la opción de verificar la ubicación del punto de muestreo con apoyo de imágenes de sensores remotos.

3.12 Aseguramiento y Control de la calidad -AC/CC-

El control de la calidad de los datos analíticos generalmente se conoce en la industria minera como Aseguramiento de Calidad y Control de Calidad (AC/CC) o Quality Assurance / Quality Control (QA/QC) por su definición en inglés. Implica la cuantificación y el monitoreo sistemático de la exactitud y precisión de las muestras (es decir, repetibilidad) y diagnósticos oportunos de errores de muestra e identificación de fuentes de error (Abzalov, 2011).

La información de QA/QC debe considerarse y evaluarse para todos los datos utilizados para la estimación de recursos y reservas. Los datos históricos requieren una validación que puede incluir, en la medida de lo posible, la reubicación de los datos históricos en el campo, el nuevo muestreo y ensayo de muestras históricas de perforación y su envío a un laboratorio con materiales de referencia certificados. Los datos históricos de los sondeos de perforación deben respaldarse con los barrenos de perforación y el muestreo recién completados. En este contexto, "histórico" significa datos adquiridos por operadores anteriores de la propiedad (CIM, 2019).

En general, un programa de recolección de datos debe tener medidas de control de calidad integradas en el protocolo analítico normal de muestreo-submuestreo. El monitoreo regular de los ensayos por parte de un laboratorio independiente se considera una buena práctica. Se deben documentar los resultados del programa de QA/QC, una descripción de los criterios de aprobación/reprobación, y las acciones tomadas para abordar los resultados que están fuera de los límites de aprobación/reprobación del programa de QA/QC. Cuando se utilice un método analítico indirecto, los resultados deberán validarse con muestras físicas. Los programas de QA/QC deben estructurarse para incluir todos los atributos de ley informados en la declaración de recursos minerales y también deben incluir la evaluación de cualquier elemento perjudicial. Cuando la precisión se indique cuantitativamente, el método de cálculo deberá indicarse claramente y deberá indicarse el tipo de muestra (pasta, duplicados de campo, etc.) a la que se aplica la precisión (CIM, 2019)

Los resultados del programa de QA/QC deben revisarse y evaluarse al recibirlos para que cualquier error y discrepancia pueda abordarse de manera oportuna. Las discusiones sobre las prácticas y procedimientos de QA/QC se han presentado en Long (1998), Abzalov (2011) y Roden & Smith (2014) (CIM, 2019).

Corresponde a los protocolos establecidos para los procedimientos involucrados en el muestreo, análisis y almacenamiento de datos en las operaciones mineras que buscan garantizar la veracidad de la información recolectada.

El Aseguramiento de la Calidad (QA) comprende las actividades preestablecidas y sistemáticas que garantizan que un proceso alcanza un grado de calidad aceptable, se establece con el fin de prevenir posibles problemas que puedan ocurrir en un proceso. El Control de la Calidad (QC) tiene como objetivo la detección de problemas que ocurren, aún con protocolos de QA; por lo tanto, el QC permite evaluar la calidad realmente alcanzada con las actividades de aseguramiento de calidad (Simón, 2013).

Una buena práctica es tener una persona responsable del QA/QC, quien defina los protocolos para los procesos y actividades que los requieran, coordina el trabajo con laboratorios (interno y/o externo), prepara reportes mensuales sobre el desempeño del QA y propone las acciones correctivas en caso de detección de problemas. Establecer los protocolos relacionados con todas las actividades del muestreo antes de ejecutar dichas actividades, contribuye a la disminución de errores a partir de la anticipación de estos.

Se puede aplicar una variedad de procedimientos para evaluar el error en las diferentes etapas de captura de datos. Esto requiere la implementación de sistemas QA/QC rigurosos y documentados para evaluar la medición, realizar una evaluación y determinar la importancia de cualquier error. Las siguientes técnicas deben considerarse en el desarrollo de protocolos QA/QC:

- Procedimientos de trabajo documentados
- Capacitación y acreditación del personal que toma medidas
- Pruebas repetitivas de estándares conocidos a lo largo de los ciclos normales de captura de datos.
- Evaluación de mediciones estándar y en blanco a lo largo del tiempo
- Pruebas de duplicados por partes independientes
- Auditorías independientes

Los duplicados se utilizan para evaluar la precisión de los resultados analíticos, ya sea que provengan de inspección visual o de otros ensayos de laboratorio. Se entiende por precisión la habilidad de repetir consistentemente los resultados de una medición en condiciones similares (Simón, 2013).

Recomendaciones

- Diseñar un programa adecuado de QA/QC con sus debidos protocolos.
- Mantener el anonimato de las muestras de control, es decir, el analista o laboratorio no requieren saber si la muestra es normal, estándar, blanco o duplicado.
- Llevar un adecuado registro de las muestras de control en la base de datos.
- Revisar y analizar periódicamente los resultados de las muestras de control, de manera que se puedan identificar posibles errores y proponer ajustes al proceso.
- Generar reportes periódicos de los resultados de exactitud y precisión, que incluyan gráficos de correlación entre resultados de muestras originales y duplicados y de exactitud de los estándares.
- Evaluar la precisión de los laboratorios.

- Documentar los resultados del programa QA/QC, una descripción de los criterios de aprobación/error y las acciones realizadas para abordar los resultados que están fuera de los límites de aprobación/error del programa QA/QC (CIM, 2019).
- Efectuar un primer control de los datos sobre la calidad del carbón para confirmar la concordancia entre los intervalos de muestreo y los intervalos litológicos.
- Los datos pueden filtrarse, clasificarse, analizarse estadísticamente, trazarse de forma cruzada (por ejemplo, densidad relativa frente a cenizas, valor calorífico frente a cenizas) y visualizarse (por ejemplo, histogramas de rangos de valores) para comprender los datos y verificar si hay errores.
- Debe confirmarse que todas las muestras tomadas se han analizado con arreglo a las normas de ensayo pertinentes.
- Es necesario confirmar la base del análisis de todos los parámetros y utilizarla de forma coherente cuando se combinen los datos.
- Los datos sobre la calidad del carbón pueden requerir normalización cuando la exploración ha estado en curso durante varios años y se han adoptado diferentes enfoques de muestreo y trabajo de prueba a lo largo del tiempo.
- Incluir muestras de duplicados.

3.13 Cadena de custodia

La cadena de custodia corresponde al conjunto de medidas y procedimientos que deben adoptarse para garantizar la integridad de las muestras y sus resultados, desde la toma en campo hasta su transporte y entrega al laboratorio. Se considera que una muestra está bajo custodia cuando se conocen el responsable, el estado y la ubicación de esta.

En la cadena de custodia deben establecerse de manera clara los roles y responsabilidades de los actores involucrados en las diferentes etapas, incluyendo toma, envío, transporte y entrega de muestras al laboratorio.

Una cadena de custodia cumplida de manera adecuada permite generar confianza respecto a que los resultados que se obtengan no han sido influenciados por manejos inadecuados.

La cadena de custodia se plasma en protocolos que incluyen, entre otros, los formatos para registro de los responsables de la muestra en cada tramo, las condiciones que debe cumplir el empaque para asegurar la integridad de la muestra, el formato de requerimiento al laboratorio analítico y, en caso de que sean necesarios, los sellos de seguridad que deben llevar las muestras individuales o los lotes.

Un formato de cadena de custodia deberá incluir, como mínimo la fecha del procedimiento, el consecutivo de las muestras del lote, el sello de seguridad del lote (en caso de que lo hubiere), la cantidad de muestras que componen el lote, el nombre y firma de quien entrega y quien recibe la muestra y el lugar donde se entrega la muestra.

La cadena de custodia busca obtener la certificación del producto mediante el seguimiento, haciendo referencia a todos los pasos de una cadena de suministro que toma posesión del producto, incluidos los mineros, transportistas, exportadores, procesadores y fabricantes.

De esta manera, proporciona un registro de la secuencia de entidades que tienen la custodia de los materiales a medida que se mueven a través de una cadena de suministro que permite la capacidad de rastrear un material hasta su origen.

Esta certificación de cadena de custodia por lo general requiere que los productos de fuentes certificadas se identifiquen y se separen de los productos no certificados, y que los procedimientos sean en el lugar, para controlar la identificación y segregación de estos productos.

Recomendaciones

- Se recomienda que cada responsable de recibir y entregar las muestras verifique la cantidad de unidades recibidas y entregadas, la integridad de los empaques y de los sellos de seguridad (si los hay) y la coherencia entre los datos de los formatos de transporte y requerimiento de laboratorio.
- Concientizar al personal relacionado con el manejo de las muestras, acerca de la importancia de la cadena de custodia y de su impacto en la confiabilidad de los resultados.
- Identificar los diferentes recorridos que hace la muestra, la susceptibilidad a la contaminación en cada paso y las diferentes medidas a tomar para asegurar su integridad.
- Cuando sea necesario, utilizar sellos de seguridad para el transporte de muestras en los diferentes recorridos.
- Registrar el nombre y firma de todas las personas involucradas en la manipulación y transporte de las muestras, en formatos diseñados para tal fin y almacenar debidamente dichos formatos como parte del seguimiento del recorrido de la muestra.

3.13.1 Preservación de muestras

En la mayoría de los casos, las muestras de canal y núcleo se requerirán inmediatamente para el análisis de laboratorio; sin embargo, hay circunstancias en las que se toman muestras de carbón duplicadas para referencia futura. Por lo general, las capas de canal se dividen en dos o los núcleos se dividen y se retiene la mitad.

Si las muestras duplicadas se van a almacenar, esto presenta un problema: la exposición del carbón al aire permitirá que la oxidación tenga lugar durante el almacenamiento y dará lugar a resultados de calidad anómalos cuando se analicen en una fecha posterior. El procedimiento habitual para evitar la oxidación de las muestras es almacenarlas bajo nitrógeno o en agua.

3.14 Métodos analíticos

La comerciabilidad de los carbones depende de su calidad. Esto determinará si se venderán como carbón térmico o metalúrgico, carbón de primera calidad o de menor calidad. Los requisitos de los clientes varían considerablemente, desde aquellos que aceptarán un amplio espectro de calidades de carbón hasta aquellos que requieren carbón para un propósito especializado y han establecido especificaciones restringidas para el carbón. El productor de carbón, es decir, la empresa minera, habrá evaluado el mercado potencial antes de desarrollar cualquier depósito, es decir, si el carbón a extraer es para exportación o uso local y si ésta comercialización tiene un beneficio económico.

La caracterización física y química de carbones, permite no solo clasificarlos y determinar su calidad, sino alcanzar un mejor manejo y planeación en la etapa de exploración, disminuir el impacto ambiental asociado y reducir los posibles daños en los equipos usados. Los análisis más comunes incluyen:

- Humedad: es la cantidad de agua contenida dentro y sobre la superficie del carbón. Altos contenidos de humedad afectan de manera negativa los sistemas de manejo y preparación del carbón, generando reducción en el rendimiento de los trituradores.
- Cenizas: corresponde al residuo no combustible que resulta de la descomposición de la materia inorgánica y orgánica en el proceso de combustión.
- Materias volátiles: son los productos que son liberados durante el calentamiento en forma de gases y vapores, excepto la humedad. Es un factor importante para el proceso de coquización.
- Carbono fijo: es el contenido de carbono elemental que se encuentra disponible para reaccionar un proceso.
- Poder calorífico: es la energía de combustión del carbono e hidrógeno en la fracción orgánica.
- Nitrógeno: es el único elemento del carbón que aparece solo en forma orgánica, sus concentraciones se encuentran entre el 1 y 2 %.
- Azufre: está presente en el carbón como azufre pirítico, orgánico y sulfato.
- Carbono e hidrógeno: determina los porcentajes totales de carbono e hidrógeno en los carbones, incluye además el carbono de los carbonatos y el hidrógeno de la humedad y el agua de hidratación de los silicatos.

Es importante que antes de la toma de las muestras se establezcan los análisis a realizar, considerando incluir análisis para determinar contenidos de gas metano, determinación de gas absorbido, residual y gas total; análisis de cromatografía y preparación de muestras para huellas de fisión e isótopos estables, de manera que estos análisis sean insumos para el análisis de factores modificadores, no solamente técnicos, de marcado, sino también, de seguridad.

Dentro de los métodos analíticos usados para distinguir los carbones según su comportamiento en los usos comerciales, sus características estructurales y sus componentes microscópicos y macroscópicos, se encuentran:

- Dilatometría: cubre las pruebas de laboratorio a gran escala para tener información sobre la expansión y contracción de un carbón o mezclas de carbones durante la carbonización en condiciones específicas.
- Plastometría: es la tendencia del carbón a fundirse o ablandarse, llegando al estado líquido al ser calentado, dando una medida relativa del comportamiento plástico del carbón.
- Índice de hinchamiento: se mide el incremento en volumen de un carbón cuando se calienta sin restricción bajo condiciones específicas. El incremento del volumen estaría asociado con las propiedades plásticas del carbón.
- Fusibilidad de cenizas: cubre la observación de las temperaturas a las cuales los conos preparados de cenizas de carbón o coque alcanzan y pasan por ciertos estados de fusibilidad y fluidez, cuando se calientan a velocidades específicas en atmósferas controladas oxidantes y reductoras.
- Petrografía: se encarga de estudiar los diferentes grupos macerales, tales como vitrinita, inertinita y exinita, estableciendo con más precisión, el comportamiento del carbón en sus diferentes aplicaciones.

Más información

- A Standardized Coal Resource/Reserve Reporting System for Canada. Paper 88-21, Geological Survey of Canada, 1989.
- Australian Guidelines for the Estimation and Classification of Coal Resources. 2014
- Essentials of Mineral Exploration and Evaluation. Chapter 9. Sampling and Analysis. Gandhi, S., & Sarkar, B. Elsevier, 2016.
- Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, CIM, 2019.
- EXPLORACIÓN GAS METANO ASOCIADO AL CARBÓN. ÁREA ÚMBITA-RONDÓN. SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. DICIEMBRE 2014
- Geophysical methods of prospecting for and exploration of metallic, non-metallic and coal deposits. Kužvart, M., & Böhmer, M. 1986.
- Geophysics of Coal, Coal Geology, Third Edition. Larry Thomas
- Manual de Suministro y Entrega de la Información Geológica Generada en el Desarrollo de Actividades Mineras. SGC, ANM, 2019.
- Methods for Sampling and Inorganic Analysis of Coal. U.S. Geological Survey Bulletin 1823. 1989
- Near-Surface Geophysics. Butler, J. 2005.
- Sample and Evidence Management. Environmental Protection Agency, EPA, U.S, 2016.
- Sampling Errors and Control of Assay Data Quality in Exploration and Mining Geology. Abzalov, Marat, 2014.

4 ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES

El objetivo de la estimación de recursos es integrar los resultados de la exploración e interpretación geológica del yacimiento con los datos de muestreos, de manera que se obtenga una estimación de la distribución del cuerpo y sus características de calidad. Sin embargo, la solidez de la estimación depende de la confiabilidad en los datos de entrada, el soporte que estos tengan, la transparencia con que se procesen y analicen estos datos, transparencia que depende en gran medida de la experiencia y destreza del profesional idóneo que realiza la estimación.

En esta guía se sigue la definición de recurso mineral descrito en el ECRR® (2018), que establece un recurso mineral como:

Concentración u ocurrencia de un material sólido con interés económico, en o sobre la corteza terrestre, de tal forma, cantidad, tenor o calidad, que hay perspectivas razonables para una eventual extracción económica. La ubicación, cantidad, calidad, continuidad y otras características geológicas de un Recurso Mineral son conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencias y conocimientos específicos, incluyendo el muestreo.

En la fase de estimación de recursos se utiliza toda la información adquirida en las actividades de las fases previas (**Figura 10**) y se generan nuevos insumos para las fases subsecuentes.

Recomendaciones

- Definir claramente la zona o zonas a las cuáles se les realizará la estimación de recursos en el área de la concesión minera.
- Declarar todos los supuestos y limitaciones tenidos en cuenta en la estimación de recursos.
- Establecer una fecha efectiva para la estimación y declaración de recursos.

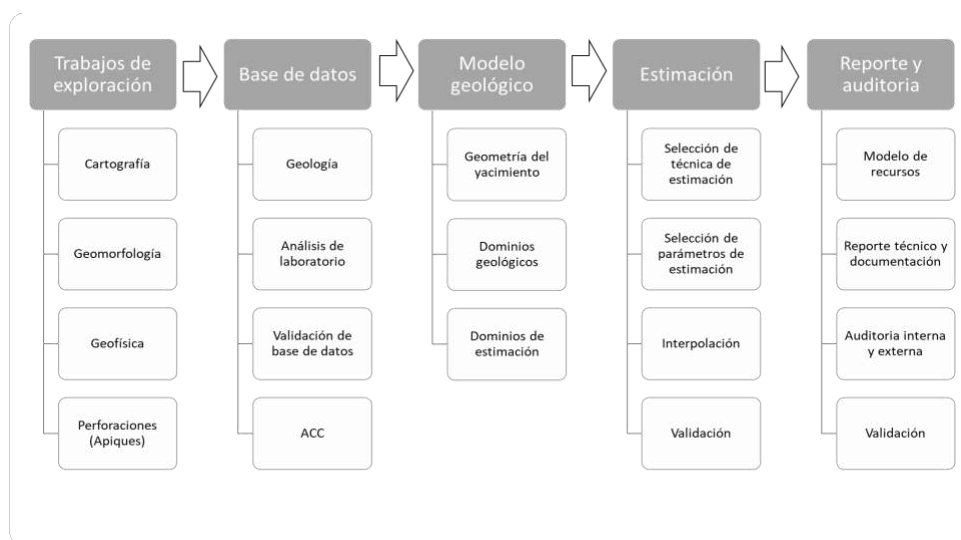


Figura 10. Resumen del proceso de estimación de recursos

Fuente: Modificado de Vargas, n.d.

4.1 Calidad de los datos y pruebas de laboratorio

Un modelo geológico y posterior estimación de recursos y reservas será tan bueno como los datos que lo soportan, puesto que el modelo más elaborado solamente produce resultados confiables si la información de entrada lo es.

En tal sentido, se busca establecer la calidad de los datos obtenidos, de manera que permita responder preguntas como: ¿Hay datos suficientes?, ¿Se tomaron las medidas necesarias para tener datos precisos y libre de sesgos? Según (Hanson, 2014), dado que los datos son sistemáticamente diferentes a los valores reales, el sesgo debe ser eliminado a todo costo en todas las estimaciones de recursos y reservas minerales, por esta razón, se sugiere tener en cuenta los siguientes aspectos:

4.1.1 Base de datos

El término base de datos de recursos se ha utilizado a menudo y de manera amplia; en la mayoría de casos se asocia con aquellos datos en los que se basa una estimación de recursos. La definición no debe limitarse a los archivos de datos y ensayos de laboratorio, por ejemplo, sino que debe incorporar detalles de todos los datos recopilados e información relevante para su interpretación.

En un proyecto de carbón la base de datos es el resultado de actividades de cartografía de superficie, levantamiento subterráneos, perforaciones con o sin recuperación de núcleos complementados con registros geofísicos.

No se puede subestimar la importancia de comprender la historia de los datos, incluyendo los procesos de toma, transferencia, validación, conversión y almacenamiento, así como el tiempo necesario para comprender a fondo los datos, identificar errores y limpiarlos.

Recomendaciones

- Antes de emplear la base de datos para una estimación, asegurarse de haber pasado por un control de calidad.
- Las perforaciones, el levantamiento topográfico y otros datos geográficos deben validarse para confirmar que se ha utilizado el datum topográfico y el sistema de referencia geográfico correcto. Hay que tener en cuenta la precisión de los métodos de prospección utilizados, además de cotejar la ubicación espacial (x,y,z) collares de perforación, bocaminas, apiques y demás información geográfica con la base topográfica para identificar ubicaciones anómalas.
- Los sondeos no siempre son verticales, como se supone en muchos programas de prospección de carbón. Es necesario comprobar las desviaciones de los sondeos y tener en cuenta la falta de información adecuada sobre los sondeos durante la estimación y la elaboración de informes.
- Es importante tener en cuenta que la pérdida potencial de material dentro de una muestra puede ser crítica, independientemente del porcentaje relativo de pérdida. La muestra analizada debe ser representativa del material in situ dentro del intervalo de interés. Los sondeos geofísicos de perforación deben utilizarse para confirmar la ubicación y la naturaleza de cualquier pérdida de testigo en los mantos de carbón.

- Se requiere una buena recuperación de la muestra para obtener muestras representativas, es importante identificar y documentar lo que se considera aceptable como recuperación de la muestra. Las pérdidas inaceptables deben identificarse y, en tal caso, la muestra debe rechazarse como punto de observación.
- A la hora de diseñar los programas y actividades relacionadas con el muestreo del carbón, hay que tener en cuenta el tamaño de la muestra y la cantidad disponible para realizar los ensayos requeridos.
- Lo ideal sería que el muestreo se llevara a cabo utilizando los datos recogidos a nivel de intervalos para toda el manto de carbón. Esto permitirá comprender mejor los controles geológicos sobre las características de calidad del carbón. El muestreo no debe estar controlado por criterios mineros, ya que los parámetros pueden cambiar en el futuro, dependiendo de factores como la economía o las especificaciones del producto del cliente.
- Los métodos de muestreo, la preparación de las muestras y los protocolos de análisis deben revisarse minuciosamente para identificar posibles fuentes de error que puedan dar lugar a problemas de precisión y exactitud de los datos.
- Hay que tener muy en cuenta la historia del almacenamiento de las muestras, así como su manipulación desde el campo hasta el análisis final. La oxidación tiene una gran importancia en la pérdida temprana de las propiedades de coquización; el secado repercute en las propiedades geomecánicas, la humedad del carbón y la densidad; y la congelación y la manipulación de las muestras repercuten en la distribución del tamaño de las partículas.
- Debe realizarse una comprobación inicial de los datos de calidad del carbón para confirmar la concordancia entre los intervalos de muestreo e intervalos litológicos.
- Los datos pueden filtrarse, clasificarse, analizarse estadísticamente, representarse en gráficos cruzados (por ejemplo, densidad relativa frente a cenizas, valor calorífico frente a cenizas) y visualizarse (por ejemplo, histogramas de rangos de valores) para comprender los datos y comprobar si hay errores.
- Debe confirmarse que todas las muestras tomadas han sido analizadas según las normas de ensayo pertinentes.
- Es necesario confirmar la base de análisis de todos los parámetros y utilizarla de forma coherente cuando se combinen los datos.
- Los datos sobre la calidad del carbón pueden requerir una normalización cuando la prospección se ha prolongado durante varios años y se han aplicado diferentes métodos de muestreo y ensayo a lo largo del tiempo.
- Todas las mediciones realizadas contienen algún error estadístico (error de observación). El error no se refiere a una equivocación, sino más bien es la desviación entre el valor medido y su valor real. El error se produce durante todo el proceso de recogida de datos. Es importante que se comprendan estas diversas formas de error y cómo pueden producirse y tratarse en la elaboración de informes. Pueden producirse errores en:
 - Muestreo;
 - Medición de datos;
 - Gestión de datos;
 - La interpretación;
 - Estimación; y

- Elaboración de informes.
- Se pueden aplicar diversas técnicas para evaluar el error en todas las formas de captura de datos. Para ello es necesario aplicar sistemas rigurosos y documentados de QA/QC para evaluar la medición, llevar a cabo la evaluación y determinar la importancia de cualquier error. Las siguientes técnicas deben tenerse en cuenta a la hora de desarrollar protocolos de QA/QC:
 - Prácticas de trabajo documentadas.
 - Formación y acreditación del personal que realiza las mediciones.
 - Pruebas repetitivas de patrones conocidos a lo largo de los ciclos normales de captura de datos.
 - Evaluación de las mediciones de estándares y blancos a lo largo del tiempo.
 - Pruebas de duplicación realizadas por partes independientes.
 - Auditorías independientes.

4.1.2 Densidad de la información

La densidad de información hace referencia a la cantidad de información disponible para la estimación de recursos en un área determinada.

La densidad de información tiene una relación directa con la complejidad geológica del yacimiento, es decir, a mayor complejidad, mayor densidad de información debe tenerse. Es importante tener en cuenta que la densidad de información está asociada con el riesgo del proyecto, a menor información, mayor riesgo.

En el desarrollo de los trabajos de las diferentes etapas del proyecto minero, debe hacerse una discusión acerca de la suficiencia en la información para reportar unos resultados que sean confiables.

Recomendaciones

- Revisar la base de datos previo al inicio de la estimación, de manera que se corrobore que cuenta con la información necesaria y suficiente para la estimación.
- Revisar la integridad y coherencia de los datos.
- Chequear si existen datos faltantes en la base de datos antes de proceder con la estimación.
- Revisar los soportes o certificados para los resultados de laboratorio.
- Definir si se hace necesario adquirir datos adicionales para la estimación, realizar re-muestras o reanálisis de muestras.
- Emplear la mayor cantidad de información disponible en la elaboración del modelo geológico, estimación de recursos y estimación de reservas.

4.2 Modelo geológico

Para la estimación de recursos debe contarse con un modelo geológico que permita establecer la forma, ubicación, tamaño y distribución de calidades del depósito de carbón, lo cual se obtiene de la integración de todos los datos relevantes generados en las fases previas del proyecto.

Un modelo geológico es una representación que refleja la interpretación geológica del yacimiento. Antes de construir el modelo, hay que conocer bien la geología, ya que ello permitirá seleccionar la técnica de modelización más adecuada para el yacimiento.

Algunos de los errores comunes en la estimación de los recursos están asociados a un entendimiento erróneo de la geometría del yacimiento; es por esto por lo que el profesional líder debe estar tranquilo en cuanto a la interpretación de la geometría, el control geológico y la continuidad del depósito determinados para elaborar el modelo geológico.

Generalmente, el modelo geológico se representa en tres dimensiones a través de: bloque diagramas, grillas (grids) o sólidos (wireframes); también, dependiendo del tipo de método seleccionado para elaborar el modelo, pueden emplearse representaciones en dos dimensiones, tales como perfiles, que luego son unidos para generar un esquema en tres dimensiones (Figura 11 y Figura 12).

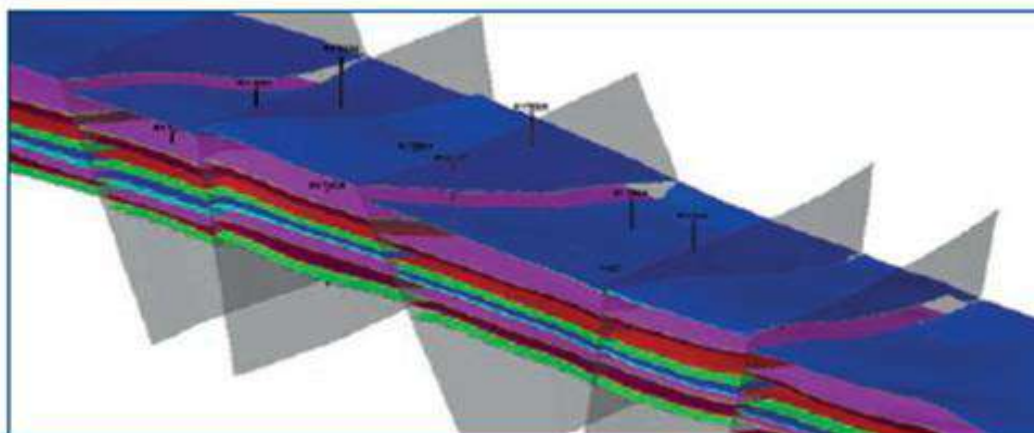


Figura 11. Despliegue de mantos mediante grillas (grids)

Fuente: Manual Minex – Dassault Systemes 2018.

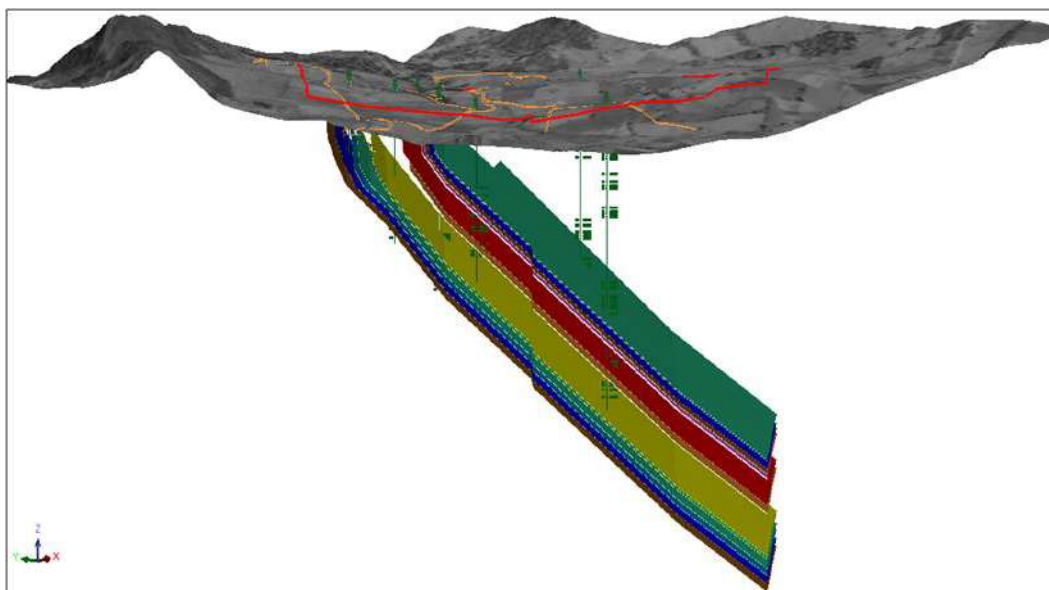


Figura 12. Ejemplo de visualización de un depósito de carbón (modelo geológico)

Fuente: Cortesía Carbocoque

4.2.1 Dominios de estimación

Los yacimientos de carbón son típicamente heterogéneos con variaciones laterales y verticales en sus características químicas, estratigráficas, litológicas, estructurales y otras. Es importante definir las áreas del yacimiento que tienen características similares, las anteriores son definidas como dominios geológicos.

Dentro de las características para definir un dominio geológico pueden considerarse fenómenos como la separación (Splitting), bifurcación o unión de mantos, deformación estructural por pliegues o fallas, buzamiento de los mantos, intrusiones, efectos de la meteorización y tendencias en las calidades de los carbones, o por el análisis en conjunto de diferentes de ellas.

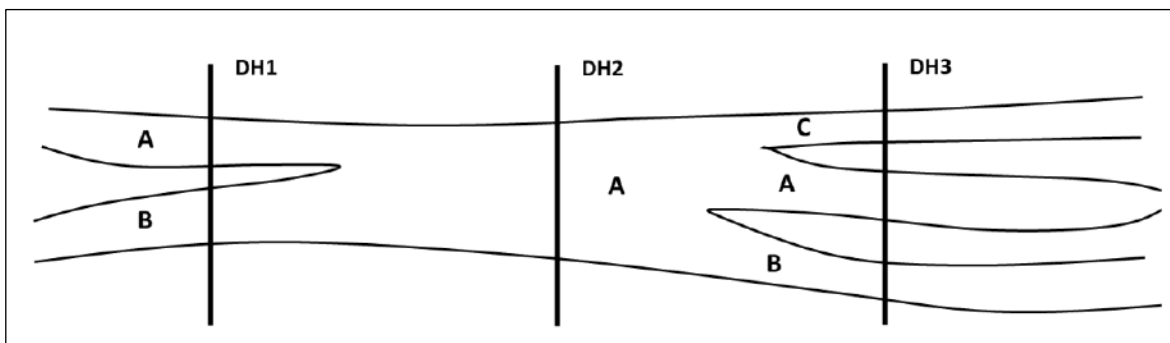


Figura 13. Ejemplo de separación (Split) y bifurcación del manto A

Fuente: *Manual Minex – Dassault Systemes 2018.*



Figura 14. Bifurcación y pinchamiento manto de carbón

Fuente: Proyecto San Carlos - Inversiones Nueva Colonia.

Los dominios pueden abarcar características que repercuten en la capacidad de extracción, la comerciabilidad o las perspectivas razonables dentro del yacimiento. El análisis y la modelización de los datos deben realizarse sobre la base de los dominios definidos.

Un yacimiento puede tener varios dominios geológicos, cada uno de los cuales puede requerir una densidad de datos diferente para proporcionar niveles similares de confianza en la estimación del tonelaje y/o la calidad (Guía JORC,2014).

Es importante considerar en la estimación de los recursos de carbón, aquellas zonas que al momento de la estimación no tienen una perspectiva de una eventual extracción económica definida. Dentro de las anteriores se pueden nombrar las siguientes:

- Zonas de quemas o clinkerización.
- Zonas con estabilidad geotécnica compleja.
- Zonas de alto tránsito de agua superficiales y subterráneas.
- Zonas con acumulación alta de gas de metano.

Las anteriores situaciones deberán ser estudiadas, analizadas, caracterizadas y zonificadas en la medida de lo posible mediante herramientas y técnicas científica que permitan definir el impacto dentro de la estimación del recurso.

La decisión de excluir las zonas descritas anteriormente de la estimación del recurso deberá ser analizada y discutida y registrada en los documentos técnicos por los profesionales de las áreas de geología y minería; si en definitiva, no existe la posibilidad

de extraer carbón desde el punto de vista técnico-económico, debe contemplarse la opción de no incluir estas áreas dentro de la estimación del recurso.

4.2.2 Métodos de construcción de dominios

Considerando la geometría tabular de los depósitos de carbón, la delimitación de los dominios de estimación generalmente se hace a través de superficies o grillas (grids) los cuales representan la bases, techos y espesores, superficies que son creadas por métodos de interpolación ya sean determinísticos o probabilísticos (Ver Figura 15).

La fuente de la información puede proceder de una campaña de perforación geológica, programas de exploración superficial, datos tomados en galerías o túneles mineros entre otros, ya que los anteriores se traducen en un conjunto de datos georreferenciados y por definición matemática pueden ser utilizados en este tipo de procesos.

Cuando existe una población robusta de datos provenientes de una campaña de exploración, lo más indicado es utilizar programas de modelamiento especializado que estén configurados para manejar grandes volúmenes de información, que permitan gestionar la información de forma sistemática y que permitan generar productos de forma rápida y ágil.

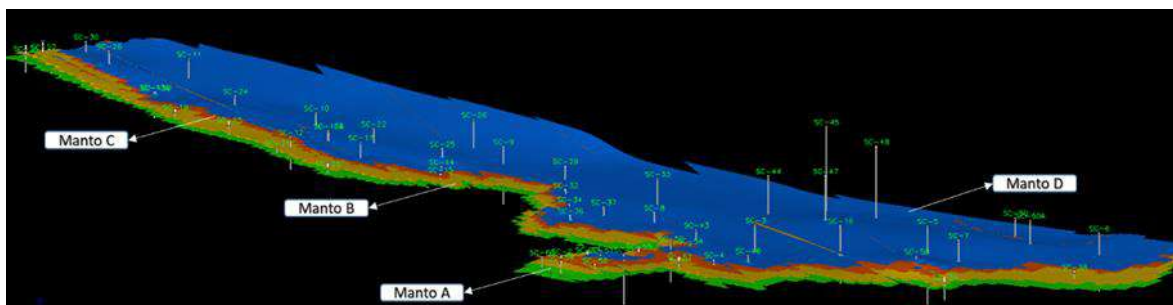


Figura 15. Superficie o grid 3D generado con información de perforación

Fuente: OMINCA S.A.S., 2020.

Los parámetros de configuración del software deben seleccionarse en función de la densidad, la distribución de los datos, las tendencias de los datos y la interpretación geológica local. La idoneidad de estos parámetros debe confirmarse mediante métodos cuantitativos. La consideración de los parámetros de modelización puede incluir:

- Selección del algoritmo de modelización.
- Selección del tipo de modelo.
- Resolución de la malla/tamaño del bloque.
- Vecindad de búsqueda.
- Interpolación entre datos.
- Extrapolación razonable de las tendencias de espesor y calidad del carbón.

La selección de los parámetros de modelamiento puede variar según la variable (por ejemplo, espesor, cenizas, materia volátil). El modelo geológico debe construirse de

forma que ofrezca la máxima flexibilidad para las opciones de planificación minera posteriores; sin embargo, esto puede estar limitado por los datos disponibles. La versión del modelo geológico utilizada para la estimación de los recursos debe conservarse.

Cuando se emplea la información capturada en túneles o galerías en la elaboración del modelo geológico, debe garantizarse la integridad, representatividad y calidad de la información, ya que la anterior afecta directamente los resultados que se generan dentro de los procesos de modelamiento, estimación y clasificación de recursos de carbón.

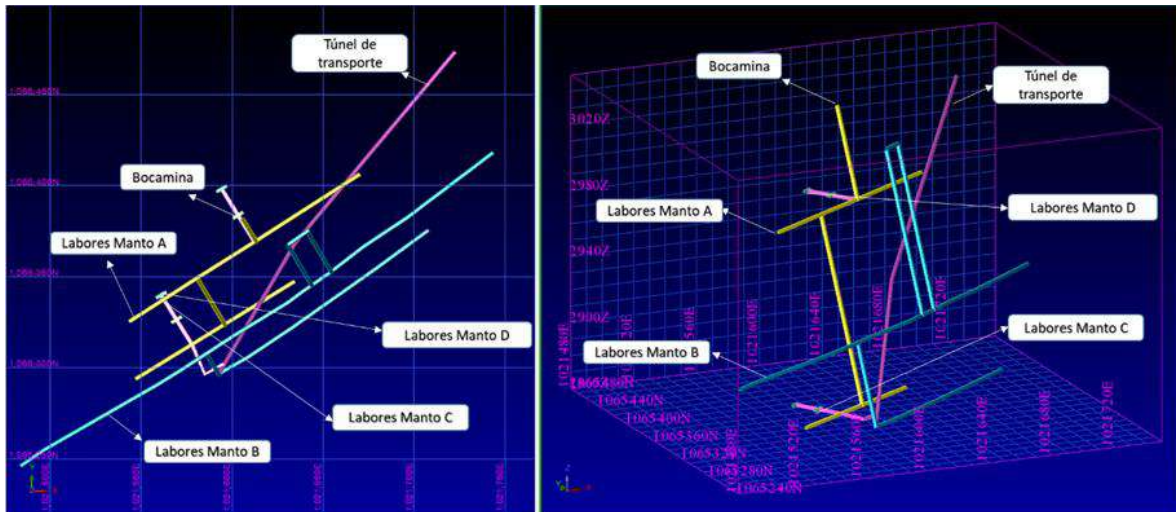


Figura 16. Levantamiento topográfico 3D de labores mineras subterráneas

Fuente: TRANCORA S.A.S., 2020.

Es importante georreferenciar adecuadamente los puntos de control tomados en los túneles ya que estos datos pueden ser utilizados en la elaboración del modelo y posterior estimación de recursos de carbón, como puntos de información del subsuelo, incluyendo datos como: litología a la base y techo, espesor, intercalaciones si las hubiere, los cuales son útiles en la construcción del modelo estructural y conjuntamente y de acuerdo con los protocolos establecidos realizar el respectivo muestreo que alimentará el modelo de calidad (Ver Figura 17).

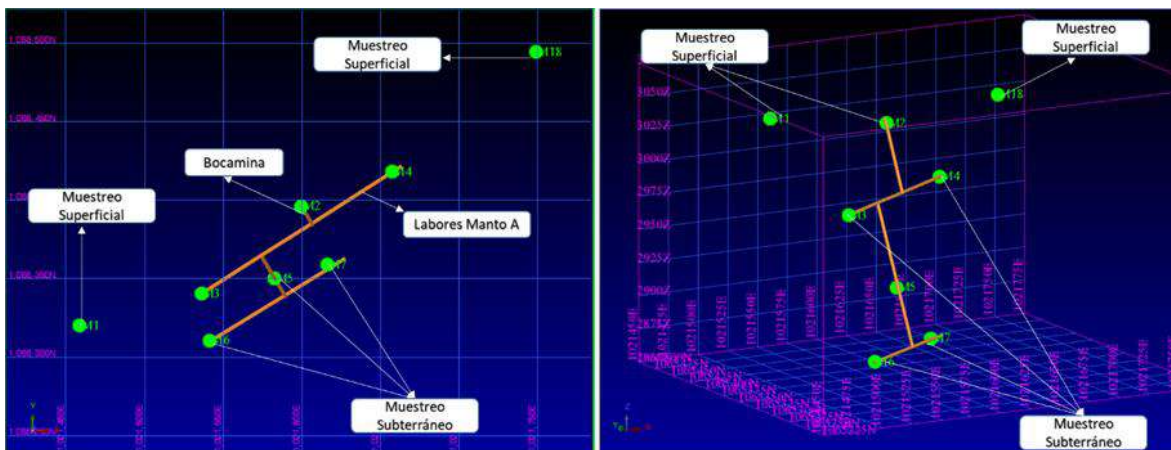


Figura 17. Ubicación 3D de puntos de control y muestreo en labores bajo tierra.

Fuente: TRANCORA S.A.S., 2020

En algunos casos, es posible incluir datos artificiales para crear un modelo geológico coherente con la interpretación geológica, éstos deberán identificarse claramente tanto en el modelo como en la documentación de apoyo. Dichos datos deben ser revisados y reevaluados a medida que se obtengan nuevos datos; ahora bien, el modelo geológico puede dividirse en varios dominios en función de la geología y la distribución de los datos, por lo anterior se debe tener cuidado en la extrapolación de tendencias a través de los límites de los dominios.

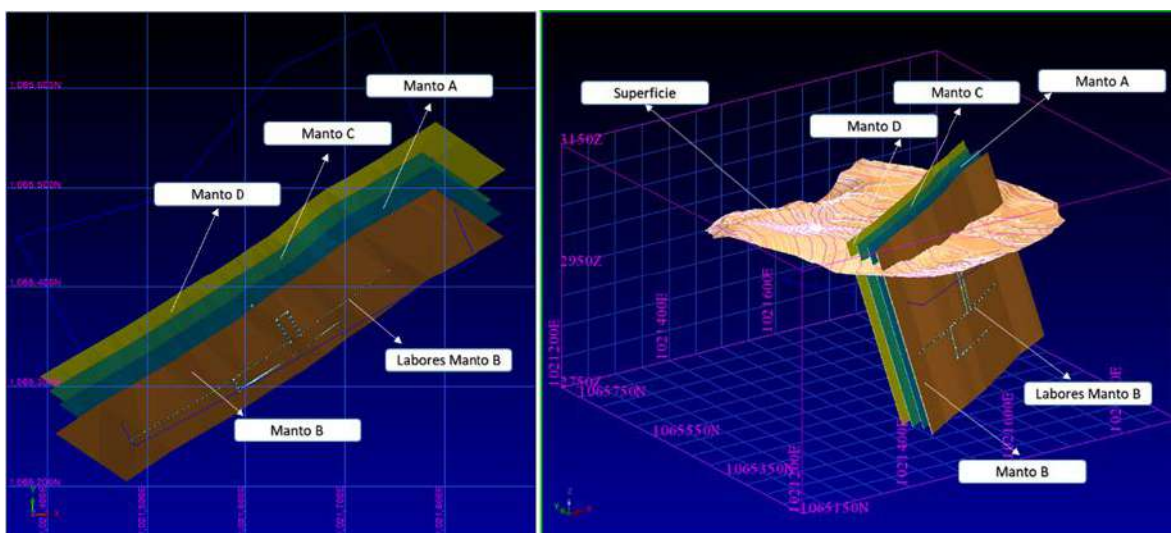


Figura 18. Grids o superficies 3D generados con datos de labores mineras.

Fuente: TRANCORA S.A.S., 2020

La continuidad de un manto de carbón y de sus características, tanto físicas como de calidad, se demuestra con mayor confianza entre los puntos de observación que fuera

del último punto de observación. Sin embargo, se considera que cierto nivel de extrapolación puede ser justificable si se explica con suficiente soporte para respaldar la continuidad del manto de carbón. En este caso se deben tener en cuenta las características conocidas del manto de carbón tanto a nivel regional como local y, específicamente, cuando existan buenos datos para apoyar la comprensión de su naturaleza. En todos los casos, será la confianza en las variables críticas la que determine el alcance de la extrapolación.

Cuando se sabe que el manto de carbón presenta un alto nivel de variabilidad, ya sea en las características físicas o en las variables de calidad, es difícil que pueda justificarse una extrapolación de una distancia significativa. Cuando se sabe que un manto de carbón es de carácter persistente y predecible, se puede justificar (también con pruebas) la extrapolación mesurada de un porcentaje de la distancia asignada al punto de observación.

En todos los casos, la transparencia y la materialidad exigen que se explique claramente la base sobre la que se extrapolan los recursos a estos límites.

Recomendaciones

- Emplear toda la información relevante para elaborar el modelo geológico (geofísica, imágenes de sensores remotos, trabajo de campo, trincheras, perforaciones, base de datos).
- Identificar dominios geológicos en el yacimiento.
- Dejar trazabilidad de los cambios que se generen en el modelo geológico, debido a nueva información, o interpretaciones actualizadas.
- Validar la información topográfica del modelo, de manera que se encuentre a una escala adecuada, que represente de manera aproximada las características del área y que garantice un amarre preciso en las tres dimensiones.
- Los datos introducidos en el modelo geológico deben verificarse como fiables y representativos de la geología antes de su construcción. Cualquier dato excluido del modelo geológico deberá documentarse, junto con la justificación de su exclusión. Hay que asegurarse de que la selección de datos no introduce sesgos en el modelo geológico.
- Revisar la consistencia entre la información de localización de las muestras y la topografía.
- Declarar los supuestos y restricciones que se tuvieron en cuenta en la elaboración del modelo.
- Definir métodos para la delimitación de los contactos (sólidos, superficies de triangulación, entre otros).
- Presentar mapas, perfiles o modelos en 3D que permitan visualizar los datos que soportan el modelo geológico, como ubicación de apiques, perforaciones, relaciones estratigráficas, niveles con mayores contenidos del mineral de interés, entre otros.
- El profesional líder debe asegurarse que los datos que soportan el modelo geológico se representen de manera clara en las tres dimensiones, teniendo cuidado de que el sistema de coordenadas sea suficientemente confiable.
- Es importante comprender los principios en los que se basa el software de modelamiento utilizado. Esto incluye comprender los pasos necesarios en el proceso de modelización y el orden en que deben completarse para garantizar que el modelo geológico final representa la interpretación geológica.

- Con el fin de garantizar la coherencia del proceso de modelización, debe establecerse un flujo de trabajo (es decir, la secuencia o los pasos definidos para generar el modelo). Este flujo de trabajo debe documentarse a efectos de materialidad, transparencia y auditoría.

4.3 Análisis Exploratorio de Datos

El Análisis Exploratorio de Datos (AED) ó EDA por sus siglas en inglés (*Exploratory Data Analysis*) es un paso que facilita el tratamiento y la interpretación de los datos de calidad del depósito. El AED corresponde a un conjunto de técnicas estadísticas que permiten examinar los datos para comprender su posible distribución, las relaciones existentes entre las variables analizadas, identificar errores y evaluar datos faltantes y/o valores atípicos. El análisis de datos puede incluir una gama de procedimientos estadísticos univariantes, bivariados y/o multivariantes aplicados a los datos para cada dominio de estimación definido.

Siempre que el método de muestreo del yacimiento haya permitido determinar la variabilidad de las características geológicas y de calidad del carbón, se obtendrá una estimación razonable y ajustada a la distribución de la población de los parámetros principales.

Dentro de las herramientas de análisis útiles para comprender estadísticamente el comportamiento de las características de los datos se encuentran los siguientes:

- Numero de muestras,
- Mínimos y máximos,
- Media y mediana,
- Desviación estándar,
- Varianza,
- Coeficiente de variación,
- Error estándar de la media,
- Límites de confianza.

Ahora bien, para ilustrar gráficamente la distribución de los datos, se pueden utilizar las herramientas como los histogramas (normal/logarítmico), diagramas de dispersión, cajas de bigotes (box-plot), gráficos de frecuencia acumulada, entre otras. Los anteriores deben soportar la comprensión y entendimiento del comportamiento de las características de los dominios de estimación definidos en el terreno.

Con los resultados de los análisis anteriores se establecen criterios para el tratamiento de datos anómalos y atípicos, delimitación de poblaciones de datos con características similares, tendencias de la población de datos y selección del estimador más adecuado.

Una buena práctica respecto a los datos anómalos y atípicos consiste en comprobar los resultados y determinar una causa probable de la anomalía, y por tanto de la adecuación de los datos, antes de inferir nada sobre el resultado de la muestra. El análisis de los datos debe realizarse antes de excluir (con justificación) tales muestras de la población (Guía JORC,2014).

Recomendaciones

- Realizar AED para cada nivel o dominio de estimación identificado.

- Presentar los resultados mediante resúmenes estadísticos (media, mediana, desviación estándar, etc.) y resúmenes gráficos (histogramas, diagramas de caja, gráficas de probabilidad). Las gráficas deben tener un título y/o leyenda con la información adecuada para interpretar los diagramas sin ambigüedades.
- Analizar los resultados empleando la visualización en perfiles o mapas con distribuciones de contenidos del mineral de interés.

4.4 Técnicas de estimación

La estimación del recurso implica la determinación más aproximada posible de la cantidad, calidad, ubicación, continuidad y otras características del mineral de interés. Dado que la estimación se realiza a partir de datos puntuales que se consideran representativos de zonas más amplias, la interpolación y extrapolación de datos siempre hacen parte de la estimación; sin embargo, éstas deben hacerse con base en criterios sólidos que garanticen la menor incertidumbre posible.

Las técnicas más conocidas para asignar el valor o valores de calidad a los mantos de carbón, son los métodos clásicos y los métodos geoestadísticos. En los últimos años, la Inteligencia Artificial (AI por sus siglas en inglés), a través de la técnica denominada *Machine Learning*, ha sido evaluada como otra posible técnica de estimación. La explicación profunda de estas técnicas está por fuera del alcance de esta guía, se invita al usuario a consultar los documentos especializados que se incluyen en la sección Más Información del presente numeral.

La selección de un método de estimación u otro, depende de varios factores como disponibilidad de datos, tipo de mineral, forma, dimensión y complejidad del depósito; cuanto más complejo el depósito, más refinado debe ser el método de estimación.

4.4.1 Métodos convencionales

Los métodos clásicos consisten en la construcción de bloques, áreas, polígonos, triángulos o secciones geométricas, a los que se les asignan las variables de calidad medias para la estimación de recursos; los parámetros de calidad se estiman a partir de la media aritmética o ponderada y se realiza una interpolación de las variables entre dos puntos contiguos de muestreo. Las áreas de influencia asumen continuidad en la mineralización entre intervalos de muestreo, por lo cual debe analizarse críticamente la conveniencia de estos métodos en los yacimientos de carbón, para minimizar el error en la estimación del volumen y calidades del depósito.

Estos métodos generalmente son manuales y empíricos y no son adecuados para depósitos con alta variabilidad de los parámetros de calidad o con complejidad estructural.

Entre los métodos clásicos más conocidos se encuentran: media aritmética, método de los perfiles, método de bloques geológicos, método de los polígonos, método de bloques de explotación, método de los triángulos y método de isolíneas. El profesional líder tiene la responsabilidad de seleccionar el método más conveniente según las características del depósito

En los métodos clásicos se puede aplicar estadística clásica para analizar posibles fuentes de error en el muestreo e identificar problemas en la estimación, incluyendo espaciamiento de muestreo y representatividad de las muestras.

4.4.2 Métodos geoestadísticos

Los métodos geoestadísticos requieren del uso de programas o software de modelamiento, los cuales permiten procesar gran cantidad de información en poco tiempo y tienen incorporados módulos para la aplicación de estadística o geoestadística para estimar las variables; los interpoladores más frecuentes que se encuentran en dichos programas son el kriging, inverso de la distancia y vecino más cercano, entre otros. En comparación con los métodos clásicos, las estimaciones hechas con software ofrecen menor posibilidad de errores en los cálculos, también permiten realizar la estimación en bloques pequeños, posibilitando un análisis más detallado del depósito.

El análisis geoestadístico proporciona un mecanismo para comprender y cuantificar la continuidad de una variable y el grado en que está correlacionada espacialmente. El proceso también puede proporcionar una evaluación de la geometría de los datos de la muestra, análisis de la cantidad ("soporte") de los datos y el volumen o área que se está estimando. La geoestadística proporciona una medida útil de la incertidumbre de una estimación. Para que el análisis geoestadístico sea fiable, es necesario considerar cuidadosamente la selección de los datos, su validación, la definición del dominio y la identificación de los datos críticos.

Dado que el carbón representa una mezcla heterogénea de constituyentes, existe una serie de parámetros de calidad del carbón que deben tenerse en cuenta para el análisis geoestadístico. Con múltiples variables, es necesario tener en cuenta los principales factores en la elección de las variables críticas. Debe considerarse la continuidad de las distintas variables al momento de determinar la influencia máxima de cualquier dato aplicado en la estimación. Cuando se evalúen numerosas variables, la variable crítica con mayor variabilidad deberá tener prioridad a la hora de determinar esta influencia máxima. Podría tratarse de un componente con un impacto económico negativo importante. En todas las circunstancias, el resultado geoestadístico debe racionalizarse con respecto a la interpretación geológica.

El profesional encargado de esta actividad, debe hacerlo en consulta con un geólogo con conocimiento en carbón que conozca y comprenda la interpretación geológica, las características del yacimiento y el conjunto de datos. Los resultados del análisis geoestadístico nunca deben aplicarse sin tener en cuenta otros factores de la estimación de recursos, como el método de extracción, la interpretación geológica y la fiabilidad de los datos.

Puede ser necesario dividir la zona del proyecto de acuerdo a los dominios de estimación definidos, consistencia estadística para el análisis variográfico y para el análisis geoestadístico. A menudo, las estimaciones pueden ejecutarse más fácilmente si se seleccionan los mismos dominios para todas las variables, pero debe tenerse en cuenta la validez geológica y geoestadística de ello. Si los controles espaciales de una variable son claramente diferentes de los de las demás, puede estar justificado el reconocimiento de dominios diferentes. Para que el análisis sea representativo, debe haber suficientes puntos de datos disponibles en cada dominio.

La variografía de las variables del carbón es difícil cuando no hay sondeos muy próximos entre sí, ya que la varianza de corto alcance (nugget/pepita) resulta difícil de definir y existe el riesgo de que se sobreestime la continuidad de la variable. Los variogramas modelados que se construyen con pocos datos corren el riesgo de subestimar o sobrestimar la continuidad de una variable, especialmente si esos puntos de datos están muy espaciados.

Los documentos deben explicar claramente los datos seleccionados para la construcción de los variogramas, cualquier operación de los datos y los dominios utilizados. Si se aplica un variograma a más de un manto de carbón, también debe realizarse una validación cruzada en esos mantos.

El variograma puede contribuir a definir las distancias de continuidad entre los puntos de observación. Aisladamente, no se considera apropiado, ya que no tiene en cuenta todos los demás factores necesarios que contribuyen a la confianza en la estimación, como las características de la muestra, la metodología de extracción, las características geológicas locales y la fiabilidad de los datos de la muestra. El uso exclusivo del variograma es arriesgado, en particular en el caso de variables con una alta varianza de pepitas y/o rangos cortos.

La recomendación es analizar cómo funcionan los interpoladores y cuál es su alcance, antes de decidirse por uno. Si los datos y las características del depósito lo permiten, se pueden hacer diferentes estimaciones con diferentes interpoladores para luego comparar los resultados.

La estimación geoestadística de los recursos minerales requiere investigar y modelar la estructura física y estadística del yacimiento. Los conceptos de continuidad y estructura en el yacimiento se plasman en semi-variogramas que se construyen durante este primer paso. El semivariograma es una forma sencilla de verificar la aplicabilidad de la geoestadística, el análisis de la superficie de tendencia o incluso la estadística clásica al depósito en cuestión. En resumen, la construcción de un semivariograma experimental debe ser un paso tan automático en la estimación de recursos como la construcción de un histograma (Clark, 1979). La segunda etapa del procedimiento es el propio proceso de estimación, que depende totalmente de los semivariogramas construidos durante la primera etapa.

Es necesario comprender que el uso de un software para la estimación no garantiza la calidad del resultado; el programa facilita los cálculos, visualización y manejo de los datos, pero los parámetros de estimación, la calidad de los datos y las restricciones de la estimación son determinadas por el profesional líder y el equipo responsable del modelamiento.

Recomendaciones

- Emplear una técnica de estimación que permita integrar la información de las diferentes muestras tomadas en el proyecto y que sea adecuada a las características propias del yacimiento.
- Revisar que la estimación sea coherente con los datos existentes.
- Presentar de forma clara los supuestos empleados en la estimación.
- Soportar la técnica de estimación seleccionada.
- Presentar los supuestos en cuanto a la continuidad del yacimiento.
- Tener en cuenta los factores que impactan en el modelo.

4.5 Validación del modelo

La validación del modelo geológico y de las estimaciones de calidad, permite tener mayor confianza en los resultados y facilita la detección de posibles inconsistencias en los procesos de modelamiento y estimación.

La validación del modelo geológico debe producirse en todas las fases del proceso de modelización y debe identificar y cuantificar los puntos fuertes y las limitaciones del modelo geológico. El uso previsto del modelo geológico debe quedar claro en la documentación, y debe confirmarse que el modelo geológico es adecuado para su propósito mediante una revisión por pares. El modelo geológico debe revisarse en caso de que se produzca un cambio sustancial.

Un modelo geológico debe representar la interpretación geológica del yacimiento. Algunas de las técnicas de validación más comunes pueden ser:

- Comprobaciones visuales de los datos.
- Secciones longitudinales y transversales.
- Generación de contornos estructurales.
- Construcción de isópacos o líneas de isovalores de calidad.
- Coherencia entre los interceptos de las perforaciones y las superficies generadas.
- Comprobaciones estadísticas entre los datos de la perforación y los del modelo.
- Conciliación con modelos anteriores.
- Validación del modelo en relación con el conocimiento y las tendencias geológicas locales.

Entre los problemas más comunes de los modelos geológicos que pueden afectar o comprometer las estimaciones de recursos se incluyen los siguientes:

- No comprobar los cálculos informáticos.
- Suavizar o complicar en exceso el modelo geológico.
- Carbón fantasma generado mediante procesos de modelización automatizados.
- Una interpretación geológica deficiente o la falta de comprensión de las zonas minadas.
- Cómo tiene en cuenta el modelo la ausencia de mantos en las perforaciones.
- Pérdidas de carbón generadas por el pinchamiento incorrecto de los mantos.
- Extrapolación irrazonable de las superficies modeladas.
- La manera de tratar las discordancias y otras superficies limitantes, como la meteorización y la topografía.
- Tratamiento de diferentes densidades de datos en el mismo modelo.
- No verificar los datos digitales con los datos originales.
- Cómo trata el modelo los datos compuestos y si se aplica la ponderación correcta a los cálculos compuestos.
- Suposiciones sobre la fiabilidad y exactitud de los datos.

Recomendaciones

- Utilizar varios métodos de validación que permitan hacer una comparación de los diferentes resultados y que guíen en los ajustes que deban hacerse en caso de que haya inconsistencias.
- Comparar la geometría estimada del yacimiento con la geometría identificada durante la explotación.

4.6 Categorización de recursos

Una vez realizada la estimación de los recursos, se procede con la categorización de acuerdo con el grado de confiabilidad de la información.

Los recursos minerales, se clasifican de acuerdo con el incremento de la confianza geológica del depósito en: Inferidos, Indicados y Medidos, términos que han sido establecidos por CRIRSCO y adoptados por la CCRR® en el ECRR® (Figura 24). Los recursos minerales inferidos tienen un menor nivel de confianza que los recursos indicados y éstos, a su vez, tienen un menor nivel de confianza que los recursos minerales medidos (ECRR®, 2018).

Para clasificar los recursos de carbón, debe realizarse una evaluación de la confianza en la estimación de todas las variables significativas. Es común que las categorías de clasificación (Inferido, Indicado y Medido) abarquen una gama de niveles de confianza. Los criterios utilizados para determinar esta confianza deben estar claramente documentados.

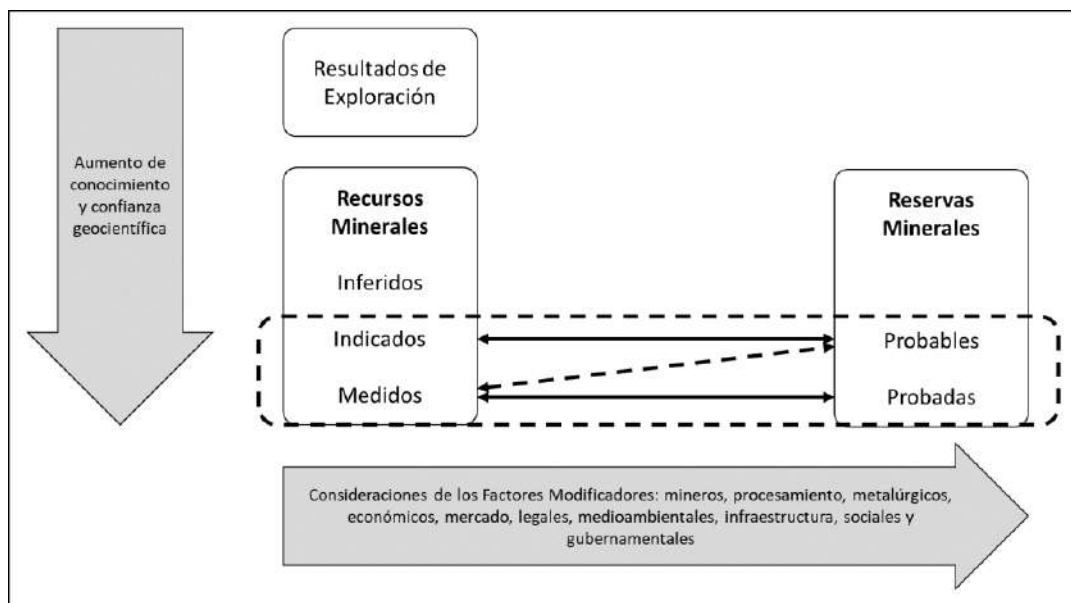


Figura 19. Categorías de Recursos Minerales y Reservas Mineras

Fuente: ECRR®, 2018.

Algunas de las formas más comunes de clasificar los recursos de un yacimiento de carbón, consiste en la aplicación de áreas de influencia a partir de puntos de observación, considerando puntos de observación como perforaciones, apiques, trincheras, afloramientos y labores mineras subterráneas. La delimitación de las áreas debe estar en función de la densidad de información de información, de la confianza en los datos (estructura y calidad) y del conocimiento geológico del depósito.

A continuación, en la Figura 21, se muestra la categorización de recursos de carbón en un proyecto de mediana minería, donde la clasificación se hizo a partir de áreas de influencias delimitadas a partir información proveniente de perforaciones, trincheras, apiques, y trazas de afloramiento. Nótese que las áreas con mayor densidad de información fueron categorizadas como recurso medido, seguidamente y con menor certeza geológica (menor densidad de información) las áreas definidas como recurso indicado y finalmente los puntos aislados demarcan los de recursos inferidos.

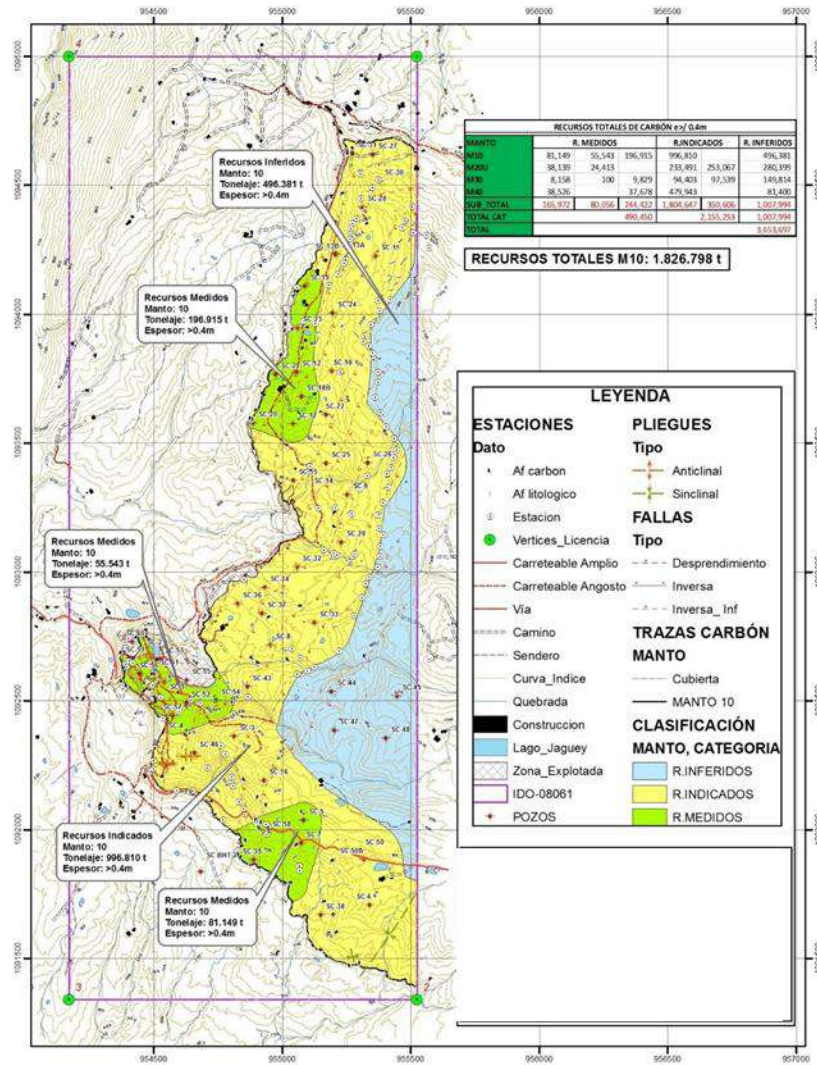


Figura 20. Clasificación de recursos de carbón en proyectos de mediana minería.

Fuente: Proyecto San Carlos- Inversiones Nueva Colonia.

En la siguiente imagen se muestra la clasificación de recursos de carbón en un proyecto de carbón de pequeña minería utilizando las categorías de los estándares CRIRSCO. Se observa que las áreas de clasificación de recursos de carbón están íntimamente relacionadas con la longitud, densidad y configuración de labores subterráneas realizadas sobre el manto de carbón.

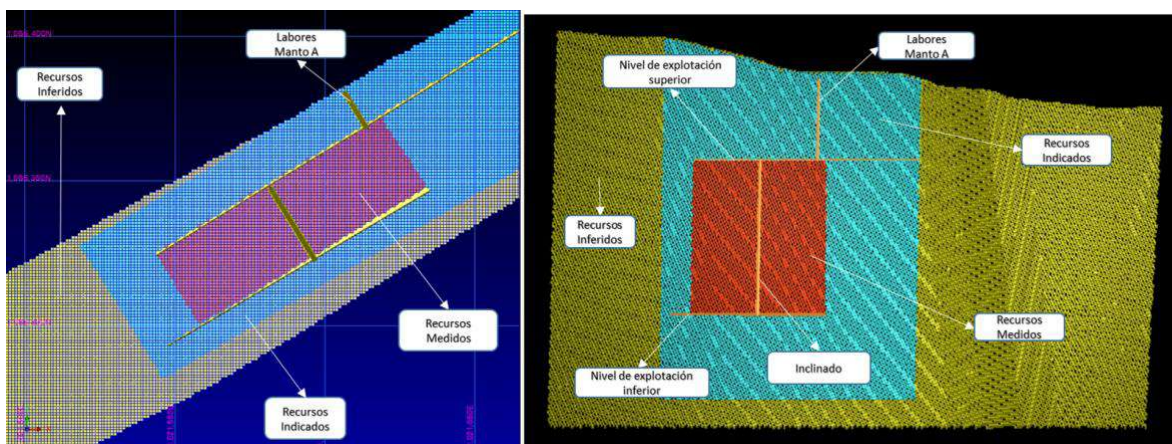


Figura 21. Vista de planta y perfil de la clasificación de Recursos Minerales.

Fuente: TRANCORA S.A.S., 2020.

Además de considerar aspectos como la densidad de información y la separación entre puntos de observación, pueden analizarse conjuntamente aspectos como la presencia de muestras (y su certeza en el dato obtenido) o de registros geofísicos en el caso de perforaciones para definir la clasificación de recursos de carbón.

En caso de realizar estudios geoestadísticos dentro del proceso de modelamiento y estimación de recursos de carbón, parámetros como la varianza de estimación, varianza de kriging y simulaciones condicionales pueden ser usadas en la clasificación de recursos de carbón.

El término "spotted dog" fue empleado por Stephenson et al (2006) para describir el modelo que resulta de la categorización de recursos minerales en el que se asocia la categoría únicamente a la presencia de pozos de perforación sin ninguna consideración respecto de la continuidad geológica en el depósito, como se muestra en la Figura 22

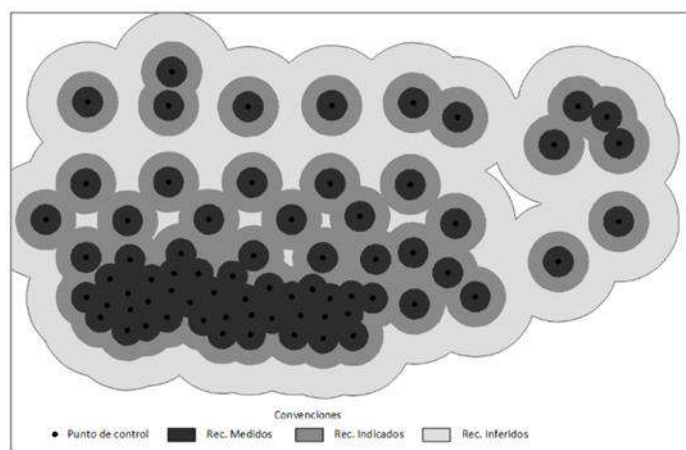


Figura 22. Efecto "Spotted dog" en la categorización de recursos minerales, modificado de JORC (2014).

Una mejor práctica esta asociada a la definición de áreas continuas alrededor de los puntos de información, permitiendo incluir áreas continuas en una misma categoría de recurso (Figura 23)

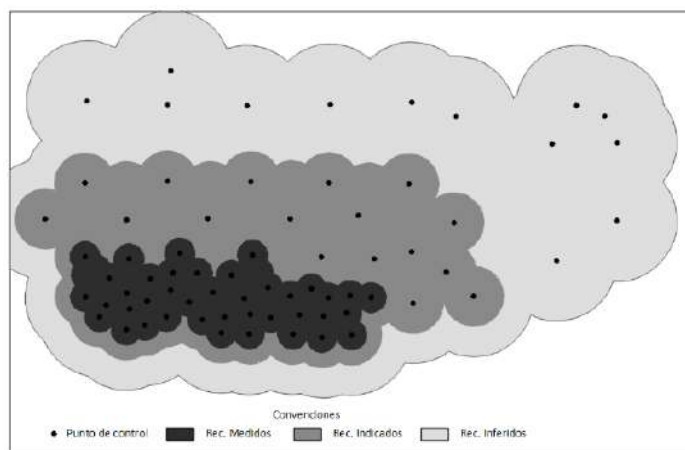


Figura 23. Resultado al analizar y minimizar el efecto "spotted dog".

Fuente: Guía JORC (2014).

La confianza en la delimitación de una zona clasificada como recurso medido, indicado o inferido disminuye cuando no existen puntos de observación adyacentes. Un punto aislado, dos puntos conectados o una línea de puntos en realidad no demuestran continuidad en las direcciones "X" y "Y" (a menos que haya datos de apoyo dentro del área de extrapolación).

No siempre hay suficiente confianza en las dimensiones "X" y "Y" para apoyar la clasificación de recursos medido o indicado entre cada punto de observación. Por consiguiente, no es válido trazar círculos dentro de la categoría de medidos o indicados alrededor de cada punto de observación.

Recomendaciones

- El profesional líder debe considerar la confianza en la estimación respecto a la geometría, continuidad, control geológico (densidad de información) y calidades para cada área establecida en una categoría específica. Siendo así, es de esperar, que los recursos medidos tengan un grado de incertidumbre bajo, respecto a estos aspectos.
- La selección de la categoría de confianza debe considerar la incertidumbre y el riesgo existente en la estimación de recursos minerales.
- Considerar criterios técnicos, económicos, ambientales para establecer los recursos.
- Para aquellos modelos de recursos minerales que se utilizarán como insumo para las fases de estimación de reservas minerales, se sugiere a los profesionales a colaborar con los ingenieros de minas que preparan las estimaciones de Reservas Minerales para seleccionar parámetros de estimación que sean compatibles con los requisitos de cada grupo. En la medida de lo posible, se anima a los profesionales a ajustar los parámetros de clasificación de los recursos minerales

a los límites prácticos de los métodos de minería potenciales (por ejemplo, haciendo coincidir los límites de la categoría de Recursos Minerales con los niveles de minería, los bordes de los rebajes o los límites de zona, cuando sea razonable hacerlo) (CIM, 2019).

4.7 Declaración de recursos

Un recurso de carbón no es simplemente una suma de todo el carbón perforado o muestreado, independientemente de la calidad del carbón, las dimensiones de extracción, la ubicación o la continuidad. Es una estimación realista del carbón que, en condiciones técnicas, económicas y de desarrollo supuestas y justificables, tiene más probabilidades de llegar a ser económicamente extraíble.

Para garantizar que la declaración de recursos minerales cumpla con el requisito de tener una *"perspectiva razonable para una eventual extracción económica"* (CCRR®, 2018), es esencial que los profesionales se aseguren de que los factores relevantes para la viabilidad técnica y económica estén actualizados, razonablemente desarrollados y se basen en prácticas generalmente aceptadas de la industria. Estos factores deben estar claramente definidos y reflejar el nivel de información, conocimiento acorde con la etapa de desarrollo de la propiedad minera al momento de la estimación. Aunque un estudio de alcance o "Scoping Study" puede servir de base para esa evaluación, el ECRR® no exige que se haya completado un estudio de alcance o "Scoping Study" para declarar un recurso de carbón.

Algunos factores clave para establecer la viabilidad técnica y económica son: selección del método de explotación en relación con el tamaño y geometría del depósito, recuperación prevista y volumen de producción, calidad del carbón, precio de venta y mercado asociado, áreas de exclusión/restricción para la minería del carbón, condiciones legales de la tenencia de la tierra. Las cifras de volumen y calidad deben citarse con un nivel de exactitud y precisión adecuado a la etapa del proyecto.

Es evidente que la prueba de las perspectivas razonables es sensible a los parámetros geológicos, geotécnicos y de calidad del carbón que se habrán investigado como paso previo al proceso de estimación. En algunos casos, la viabilidad de un yacimiento de carbón puede evaluarse comparando los parámetros conocidos con análogos de zonas cercanas. Sin embargo, rara vez es fácil evaluar correctamente el valor económico de un yacimiento de carbón sin al menos una apreciación básica de los costos de extracción y los ingresos probables que se recibirán. Estas cuestiones suelen considerarse durante el análisis de los recursos en colaboración con ingenieros y otros especialistas.

La GBPC no prescribe un enfoque específico para llegar a asunciones claves, o para determinar el nivel de detalle requerido, tampoco establece indicadores económicos específicos para determinar las perspectivas razonables de una extracción económica. En lugar de ello, se limita a indicar los factores que se recomienda considerar y documentar.

Es crucial realizar una evaluación que considere tanto los factores que influirían en los costos e ingresos, como aquellos que podrían impactar la operación del proyecto. Los atributos físicos del yacimiento y las características de beneficio son determinantes en los costos, mientras que atributos de la calidad del carbón influyen en su uso potencial, en la mezcla de productos y por tanto, impacta los ingresos. La licencia de explotación abarca factores reglamentarios, sociales, culturales, políticos y medioambientales, que pueden limitar o encarecer el desarrollo de la mina. Puede ser necesario consultar a expertos sobre estos factores.

Es necesario establecer y aplicar parámetros de corte realistas que consideren el escenario probable de extracción y uso potencial del carbón, basándose en la experiencia de operaciones similares. En los yacimientos con recursos tanto a cielo abierto como subterráneos, deben definirse los límites de extracción y las restricciones de espesor y calidad del carbón para cada método.

En un escenario potencial de explotación a cielo abierto, es importante tener en cuenta la relación de descapote, el espesor mínimo recuperable, el espesor máximo de las intercalaciones, la estabilidad de la pared alta, la profundidad de la meteorización, entre otros. Si se prevé beneficiar el carbón en bruto, los rendimientos de carbón limpio deben tenerse en cuenta en las consideraciones de corte, incluidos las relaciones de descapote. Puede ser conveniente considerar técnicas de optimización para examinar diversas opciones que apoyen una evaluación de los valores de corte.

En un escenario de minería subterránea, aspectos como la profundidad, presencia de fallas, espesor de los mantos, tamaño de la sección de trabajo, buzamiento del manto, propiedades físicas de las litologías del techo y de piso, hidrogeología, régimen de tensiones, contenido de gas, composición y permeabilidad, deben ser considerados. En los yacimientos subterráneos de varios mantos, la naturaleza y el espesor del material de intercarga puede ser una consideración crítica, ya que podría impedir la extracción de algunos de los mantos de carbón.

Deberán tenerse en cuenta los resultados de los estudios técnicos y económicos pertinentes. Siempre que sea posible y pertinente, deberá hacerse referencia a las explotaciones existentes en una región y un entorno geológico similares. Debe tenerse precaución si se aplican estrictamente los límites de calidad del carbón, incluido el porcentaje de cenizas y los elementos nocivos (por ejemplo, azufre y fósforo). Estos aspectos de la calidad deben tenerse en cuenta, pero pueden no ser lo suficientemente significativos como para declarar que dicho carbón no se considera un recurso. La incorporación de límites mineros, como la profundidad, la relación de descapote, el espesor minable mínimo (y máximo, si procede), los buzamientos de los mantos o el espesor de separación entre mantos, también debe tratarse con precaución.

Debe considerarse si el tonelaje y la calidad del carbón son suficientes para garantizar un rendimiento satisfactorio durante una vida de la mina. Si el tonelaje de carbón estimado no es suficiente para soportar una operación minera, esto puede impedir el potencial desarrollo de un proyecto, a menos que se puedan identificar otras alternativas (por ejemplo, potencial para aumentar el tonelaje, o sinergias o alianzas con otros proyectos adyacentes).

Un yacimiento de carbón puede estar alejado de los mercados actuales si se encuentra en una zona extremadamente remota desprovista de las infraestructuras pertinentes, y en la que el desarrollo potencial en un plazo razonable puede ser difícil de justificar.

Debe considerarse si todo el carbón es accesible para su exploración y/o desarrollo. Los recursos de carbón sólo pueden estimarse dentro de los límites de los derechos de exploración, desarrollo y explotación minera válidos en posesión de la empresa declarante, sus filiales o sus socios en empresas conjuntas.

Las zonas con restricciones de acceso a la superficie terrestre, como un parque nacional declarado o propuesto, normalmente se incluirían y el carbón de estas zonas se eliminaría de una estimación de recursos de carbón. También puede haber casos en los que el carbón adyacente o subyacente a grandes ríos, masas de agua almacenada, desarrollos urbanos o grandes infraestructuras, como líneas de ferrocarril, grandes puentes y carreteras, requiere una cuidadosa consideración y documentación en

términos de potencial desarrollo futuro de todo o parte del yacimiento. En estos casos (y siempre suponiendo que el carbón sea lo suficientemente atractivo y técnicamente posible de extraer) puede haber costos adicionales e impedimentos sociales o legales para la explotación minera. Es necesario considerar la determinación de si existen perspectivas razonables de que la explotación se lleve a cabo en el plazo establecido. Cualquier carbón de este tipo excluido de un recurso de carbón puede incluirse en el Inventario de carbón en un informe no público.

Tabla 4. Ejemplo de declaración de recursos de carbón. Fecha efectiva: diciembre 29 de 2022, Base: as receive (Ar).

MANTO	ESPESOR (m)	MEDIDOS (t)	INDICADOS (t)	INFERIDOS (t)	CENIZA (%)	MATERIA VOLÁTIL (%)	CARBONO FIJO (%)	FSI	AZUFRE (%)	PODER CALORIFICO (Btu/Lb)
M10	1,16	315.000			10,5	17,5	71,0	6,2	0,5	13.754,9
	0,85		994.500		9,3	18,2	71,6	6,7	0,5	13.991,5
	0,89			551.200	8,7	18,4	72,0	6,8	0,5	14.128,4
M20U	0,77	60.000			8,2	19,7	71,5	7,4	0,7	14.037,0
	0,75		506.100		8,7	19,2	71,5	7,4	0,7	14.121,1
	0,82			186.900	8,1	19,1	72,2	6,7	0,6	14.309,2
M30	0,48	16.000			24,8	18,1	48,8	5,3	0,7	10.081,3
	0,47		122.000		17,8	19,3	56,4	6,1	0,7	11.580,9
	0,47			131.500	29,7	18,2	45,9	4,3	0,9	9.578,3
M40	0,8	74.800			8,7	21,0	67,8	8,2	0,5	13.788,6
	0,64		538.100		7,4	20,7	69,4	8,3	0,5	14.011,3
	0,63			150.800	7,6	20,7	68,9	8,2	0,5	13.939,1
Total (t)	0,72	465.800	2.160.700	1.020.400	12,50	19,22	65,64	6,8	0,6	13.110,1

Recomendaciones

- El reporte de las cifras de tonelaje y calidad, debe reflejar la incertidumbre relativa de la estimación, redondeando a cifras significativas apropiadas.
- Declarar los recursos diferenciando carbón metalúrgico de carbón térmico, incluyendo espesor promedio, tonelajes y los principales parámetros de calidad.
- Indicar de manera explícita la base sobre la que se realiza la estimación de reservas de carbón.
- Apoyar el reporte de recursos de carbón con gráficas, mapas y perfiles que den claridad al lector respecto de la ubicación de las cantidades reportadas.
- Revisar la normativa vigente para Colombia, con respecto a las zonas de exclusión y exclusión de minería y demás condicionantes sociales, ambientales, arqueológicos, entre otros.

4.8 Revisión por pares

Es una buena práctica llevar a cabo una auditoría o una revisión por pares de la estimación de recursos, en particular cuando se trata de una estimación inicial o cuando se ha producido un cambio importante con respecto a estimaciones de recursos de carbón anteriores.

La mejor práctica incluye el uso de revisiones internas o, si es necesario externas, de la estimación de recursos minerales antes de la publicación de la declaración de recursos minerales al dominio público. De acuerdo con la (CIM, 2019), las consideraciones de la revisión deben incluir:

- Idoneidad de las perforaciones y de la base de datos de muestras.
- Idoneidad de los métodos analíticos y la representatividad de la muestra.
- Idoneidad de los dominios geológicos, los volúmenes de mineralización y los dominios de estimación.
- Adecuación del volumen/tonelaje de las zonas mineralizadas.
- Tratamiento de los valores atípicos.
- suficiencia y fiabilidad de los insumos, y supuestos subyacentes, incluida la unidad de minería selectiva.
- Metodología de estimación.
- Validación y selectividad del modelo de recursos.
- Criterios de categoría de confianza de recursos minerales.
- Criterios de notificación de recursos minerales.
- Declaración de recursos minerales y notas a pie de página adjuntas.

4.9 Evaluación de riesgo

Si bien la clasificación de los recursos minerales en las categorías de medidos, indicados o inferidos permite a los profesionales identificar el riesgo técnico en términos generales, la mejor práctica incluye la identificación y clasificación de los riesgos asociados con cada entrada de la estimación de recursos minerales.

La metodología aplicada, la categorización y el análisis deben estar bien documentados. Un posible enfoque consiste en utilizar una medida cuantitativa de la incertidumbre relacionada con un volumen de producción durante un período de tiempo determinado, acompañada de una declaración de confianza probabilística. El objetivo es ayudar a los profesionales a establecer los criterios de la categoría de confianza de recursos minerales, proporcionando así una comprensión de los diversos riesgos técnicos asociados con la estimación de recursos minerales.

Más Información

- A Discussion on Current Quality-Control Practices in Mineral Exploration. Simón A, 2011.
- Applied geostatistics (Vol. 28). Isaaks, E.,1990.
- Aseguramiento y Control de la Calidad en la Exploración Geológica. Simón A. Santiago, 2006.
- Assay Quality Assurance-Quality Control Program for Drilling Projects at the Pre-feasibility to Feasibility Report Level. Long, 2000.
- Comisión Colombiana de Recursos y Reservas, CCRR®, 2018. Assessing Uncertainty with Drill Hole Spacing Studies – Applications to Mineral Resources.

- Verly, Postolski y Parker. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014.
- Computing Reserves of Mineral Deposits : Principles and Conventional Methods. Popoff, C. Washington: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1966.
 - Considerations on quality assurance/quality control and sample security. Simón & Gosson, 2008.
 - Duke, J. K., & Hanna, J. P. Geological Interpretation for Resource Modelling and Estimation. En A. C. Edwards (Ed.), Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice. Monograph 23. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2001.
 - Estimación de Recursos Mineros. Alfaro Sironvalle M., 2007.
 - Geostatistical Ore-reserve Estimation. Annels, A, 1991.
 - Mineral Resource Estimation (Vol. 53). Rossi, M., & Deutsch, C., 2014.
 - Ore Reserve Estimates in the Real World (Fourth ed.). J. Stone, & P. Dunn, Edits. Society of Economic Geologists, 2012.
 - The Resource Database. Stoker, P. T., & Gilfillan, J. F. En A. C. Edwards (Ed.), Mineral Resource and Ore Reserve Estimation - The AusIMM Guide to Good Practice. Monograph 23. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.

5 FACTORES MODIFICADORES

El análisis de los factores modificadores que inciden en el proyecto es necesario para determinar qué parte de los recursos indicados y medidos puede convertirse en reservas probables y/o probadas. Dicho análisis exige altos niveles de confianza en las evidencias y los datos sobre los cuales se basan los estudios.

La definición de los factores modificadores está ampliamente divulgada en la literatura, en esta guía se destacan los siguientes:

Los factores modificadores son consideraciones usadas para convertir recursos minerales en reservas minerales. Estos incluyen, pero no se limitan a: factores de minería, procesamiento, metalúrgicos, infraestructura, económicos, de mercado, legales, ambientales, sociales y gubernamentales (ECRR®, 2018).

Los factores modificadores corresponden a los componentes que permiten la extracción o no, de los recursos minerales y nos permite convertir en reservas mineras. Para lograr ese proceso, se debe pasar por las fases de prefactibilidad y factibilidad que hagan tangible el proyecto minero y poderlo transformar en un proyecto económicamente viable (CIM, 2019).

Cuando se evalúan correctamente los factores modificadores se disminuye la incertidumbre en el proyecto; por lo tanto, las reservas estimadas son más aproximadas a la realidad y se basan en un estudio a nivel de factibilidad.

Como se observa en la Figura 19, los recursos indicados pueden convertirse en reservas probables debido a que, aún requieren de mayor confianza en la información geocientífica para llegar a la categoría de medidos. Los recursos medidos pueden pasar a reservas probables, cuando uno o varios factores modificadores están pendientes por resolver; cuando todos los factores modificadores han sido considerados de manera satisfactoria y no se presentan obstáculos para iniciar la explotación, parte de los recursos medidos pueden pasar a reservas probadas.

Un recurso inferido no puede ser convertido en reserva mineral. La información que permitió la definición de este recurso resulta insuficiente para minimizar el riesgo que acompaña a la certeza geológica; es necesario que en primer instancia se profundicen los estudios geológicos, de tal manera que, se adquiera mayor confianza en la estimación y de esta manera se eleve su categorización al menos a recursos indicados y/o medidos. Una vez completado este paso, se deben analizar en este nivel y frente al análisis de los factores modificadores, para determinar la viabilidad de llevar estos recursos al nivel de reservas minerales.

En la Figura 24 se resumen los factores modificadores más comunes en proyectos de carbón; si bien en este capítulo se abordan según el tema, es necesario entender que hay una relación estrecha entre algunos de ellos y que la mayoría conlleva un impacto económico para el proyecto.

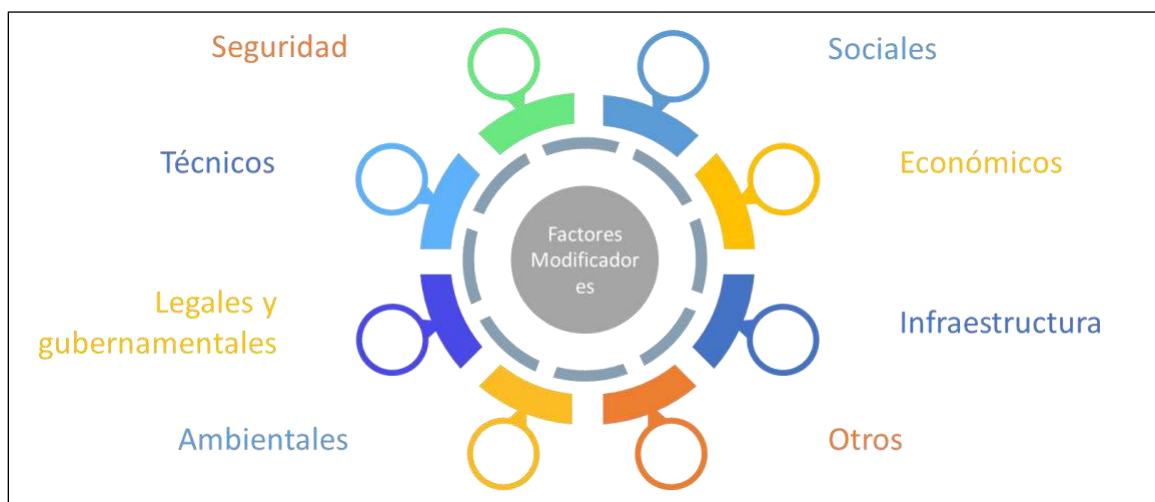


Figura 24. Factores Modificadores comunes en proyectos de carbón

Fuente: Elaboración propia.

El abordaje de los factores modificadores en la presente guía se realizará siguiendo el diagrama de la Figura 24, sin embargo esto no implica que sea una metodología de carácter exclusivo, por el contrario, cada grupo de profesionales designado para la estimación deberá realizar su respectiva ruta de verificación de los factores modificadores y ajustarla a las necesidades específicas de cada proyecto.

De acuerdo a la magnitud del proyecto se seleccionarán los equipos de trabajo y se realizará la estimación de los costos de la planeación y los cronogramas de ejecución y la determinación de la factibilidad del mismo.

Recomendaciones

- El grupo de profesionales que se asigne para realizar el análisis de los factores modificadores inherentes al desarrollo del proyecto minero, a parte de contar con la experiencia y experticia en las áreas técnicas, es recomendable que puedan realizar el reconocimiento en campo sobre las características propias del área objeto de estudio; de tal manera que se identifiquen y evalúen los principales factores modificadores del proyecto.
- Identificar aquellos factores modificadores que por su naturaleza sean específicos del proyecto.
- Describir el análisis realizado para cada uno de los factores modificadores para la conversión de recursos a reservas.
- Determinar el impacto económico y financiero de cada factor modificador en la conversión de recursos minerales a reservas minerales.
- No es conveniente reducir el análisis de los factores modificadores a un resumen de porcentajes de castigo, ya que no solamente se trata de obtener una disminución de volúmenes descontados del recurso sin ningún soporte.

5.1 FACTORES TÉCNICOS

Los factores técnicos tienen impacto relevante en la conversión de recursos a reservas, ya que incluyen aquellas variables como geología, calidad, diseño minero, pérdidas, dilución, infraestructura de soporte, beneficio, entre otros. (Figura 21).

Los profesionales asignados para la estimación de las reservas deben hacer un adecuado análisis de las herramientas tecnológicas disponibles a fin de verificar cuál de ellas presenta el mejor soporte para la estimación y análisis de los respectivos factores. Dentro del mercado existen software especializados para cada tipo de minería y para cada mineral; en este punto, se deben conocer los modelos usados para la estimación de los recursos, e interactuar con el grupo de profesionales a fin de conocer las ventajas y desventajas de cada herramienta.

5.1.1 Factores geológicos

Las características geológicas del área del proyecto deben considerarse como un elemento determinante, ya que pueden afectar la planeación, el método de explotación a utilizar, la selección y el rendimiento de equipos, las opciones de recuperación o cierre de mina, o generar sobrecostos cuando no se caracterizan adecuadamente.

En este punto se debe tener certeza del modelo geológico en tres dimensiones de los depósitos, junto con la topografía y cartografía estructural en detalle a fin de determinar el sistema y método de explotación a implementar y definir condiciones geotécnicas para la determinación de zonas a intervenir.

5.1.1.1 Clasificación y caracterización de los carbones (térmicos-metalúrgicos)

Si bien es cierto que el método de extracción elegido no depende del tipo de carbón presente en el proyecto, las variables económicas que permitan darle viabilidad a determinado manto si tienen una dependencia total y directa según el tipo de carbón. Por ejemplo, si en el proyecto existen mantos térmicos con un espesor de 70 cm, probablemente no resulte atractivo y económico la extracción de estos. No sucede lo mismo en caso de que existan mantos con propiedades metalúrgicas, que aún con ese espesor pueden resultar económicamente extraíbles.

A grandes rasgos, el carbón se clasifica en función de su poder calorífico (poder para producir combustiones o quemar, según el proceso de fosilización de restos orgánicos). Cuanto más alta es la proporción que tienen de carbono mejor será el poder calorífico, lo que influye en el precio de venta. Las características geológicas del terreno deben considerarse como un elemento determinante, ya que pueden afectar la planeación, el método de explotación a utilizar, la selección y el rendimiento de equipos, o generar sobrecostos cuando no se caracterizan adecuadamente.

En este punto se debe tener certeza de los modelos en tres dimensiones de los depósitos, junto con la topografía y cartografía estructural en detalle a fin de determinar el sistema y método de explotación a implementar.

Las diferencias en la comercialización y el valor por tonelada según el tipo de carbón varían notablemente y es por esto que una identificación clara y documentada de los carbones existentes en el proyecto debe hacerse desde la etapa de exploración y durante toda la vida útil del proyecto.

5.1.1.2 Hidrogeológicos

El estudio hidrogeológico se requiere para el conocimiento de las condiciones naturales del agua subterránea, su relación con las aguas de infiltración y corrientes superficiales, tanto en verano como en invierno, para conocer los parámetros y constantes hidráulicas, el nivel freático y la localización y características de los acuíferos presentes en el área.

Con esta información se analizan los efectos que produciría el agua subterránea sobre la explotación minera y viceversa, a partir de los cuales se toman las medidas necesarias de mitigación de impacto y se selecciona el método de explotación apropiado y el equipo para realizar las operaciones.

Si las condiciones geológicas predominantes encaminan a que el proyecto se debería desarrollar con minería superficial, el análisis de este factor permitirá identificar zonas susceptibles de inundación, áreas que representen potenciales riesgos en torno a la presencia de aguas subterráneas. Las medidas respectivas que se deban tomar para mitigar dichos riesgos, recaen en el personal competente que prepare el reporte.

Ahora bien, si las condiciones sugieren un desarrollo minero subterráneo, el análisis de este factor permitiría anticiparse a las posibles condiciones adversas de los diversos túneles (como por ejemplo hinchamiento del piso, por la presencia de arcillas en combinación con las aguas, o la influencia del agua en las condiciones de soporte de los techos, o inclusive si existen las condiciones para encontrarse acuíferos encapsulados).

5.1.1.3 Hidrológicos

En el estudio hidrológico se determinan las características hídricas del área, tales como la precipitación anual, la extensión de la cuenca hidrográfica, la escorrentía superficial, las posibles desviaciones de las corrientes naturales, entre otros. Con el conocimiento hidrológico del área se diseñan las obras y sistemas necesarios para una operación minera eficiente y segura, se determinan las alternativas del control de inundaciones, se obtiene información de los volúmenes de agua disponibles para las operaciones y se planifican los sistemas de vertimiento. En el diseño de botaderos y la determinación de su ubicación, el factor hidrológico es determinante para lograr la seguridad de las áreas y las obras.

5.1.1.4 Estructurales

Desde el punto de vista de los factores modificadores, uno de los que tiene más impacto son las consideraciones estructurales, pues de ellas depende en gran medida la elección del método de extracción (bien sea a cielo abierto, o por métodos subterráneos, y dentro de estos el nivel de mecanización que se pudiera implementar).

Tal y como se presenta en la región Atlántica, los depósitos carboníferos de esta zona se presentan como un sistema de múltiples mantos, con espesores mayores a los 5m, con buzamientos relativamente bajos, en muchas ocasiones aflorando en superficie, situación que los hace idealmente extraíbles por métodos de minería superficial, específicamente a cielo abierto (Open Pit). Un cambio brusco en el buzamiento normalmente determina el límite económico de la explotación, toda vez que se incrementa sustancialmente la relación de descapote y adicionalmente, la extracción del carbón se vuelve más compleja y costosa.

Hacia el centro del país y en los Santanderes la tendencia general es la presencia de carbones con altos buzamientos y espesores en promedio entre 1 y 2m. Este tipo de condiciones determina que los métodos de extracción que se deben emplear sean casi exclusivamente subterráneos, con muy pocas excepciones.

5.1.1.5 Geotécnicos (clasificación del macizo rocoso y subcapítulos)

La realización del estudio geo mecánico comprende la caracterización del macizo rocoso, donde permita determinar el comportamiento que tendrá en el momento de la realización de las labores subterráneas. Es de suponer que la determinación del comportamiento se deberá poner en consideración para el planeamiento y desarrollo de las labores subterráneas. Dentro de la recolección de datos se tiene en cuenta los comportamientos de los respaldos de cada manto de carbón dependiendo de su litología y diaclasamiento, además se considera la presencia de agua, factor que afecta en una medida considerable la estabilidad de excavaciones subterráneas. Por lo cual la determinación del claro activo deberá de ser fundamental para prever los comportamientos y calcular los procedimientos de sostenimiento.

La caracterización del macizo involucra todas las fases del proyecto, las cuales van desde una correcta descripción y toma de datos de los afloramientos rocosos y/o mineros hasta la interpretación de los datos levantados en campo, que permita la descripción y medida de las características y propiedades de la matriz rocosa, de las discontinuidades y de los parámetros globales del macizo rocoso, que proporcionan las cuantificaciones requeridas por las distintas clasificaciones y la caracterización final del macizo rocoso.

El macizo rocoso es un medio discontinuo, complejo, con un comportamiento geomecánico que puede ser estudiado y clasificado en función de su aptitud para la implementación de los sistemas y métodos de explotación minero a implementar. Las clasificaciones geomecánicas aportan índices de calidad relacionados con parámetros geomecánicos para el diseño de sostenimiento de túneles en explotaciones subterráneas, así como la estabilidad de los taludes en explotaciones a cielo abierto.

La toma de muestras, levantamiento de rasgos estructurales, pruebas de laboratorio e interpretación de resultados, requiere por parte del equipo evaluador de la adopción de un marco metodológico que permita llevar a cabo una correcta caracterización del macizo.

5.1.2 Factores Mineros

La extracción de los minerales económicos concentrados en los yacimientos de carbón se hace principalmente mediante operaciones a cielo abierto (open pit) o subterráneas. (cámaras y pilares, tajos con derrumbe dirigido, testers, ensanche de tambores entre otros). La selección de una correcta metodología de explotación permite la optimización de los diferentes recursos (humanos, económicos, infraestructura) destinados al proyecto y el manejo responsable de los recursos no renovables.

Dependiendo de la escala del proyecto, ya sea pequeña, mediana o gran minería; se podrán o no implementar métodos manuales o completamente mecanizados. Lo importante en definitiva es, que se haga una buena optimización de los recursos para lograr una máxima recuperación del mineral valioso, de una manera racional y que sea consecuente con la conservación del medio ambiente, el cumplimiento de las normas mineras y la sana convivencia con las comunidades del entorno del proyecto.

5.1.2.1 Métodos y sistema de explotación

Para el abordaje de la selección del sistema y método de explotación minero, en primera instancia es importante anotar que, en la estimación de los recursos se han abordado temas de relevancia para la selección final del método de explotación, y en tal sentido, los profesionales de minas deben conocer en detalle los estudios realizados y en lo

posible haber participado en la construcción y elaboración de los mismos, esto permitirá abordar de manera más acertada el estudio para la correcta selección del método a implementar.

Los sistemas de explotación se clasifican de manera general en dos grandes grupos (Figura 25):

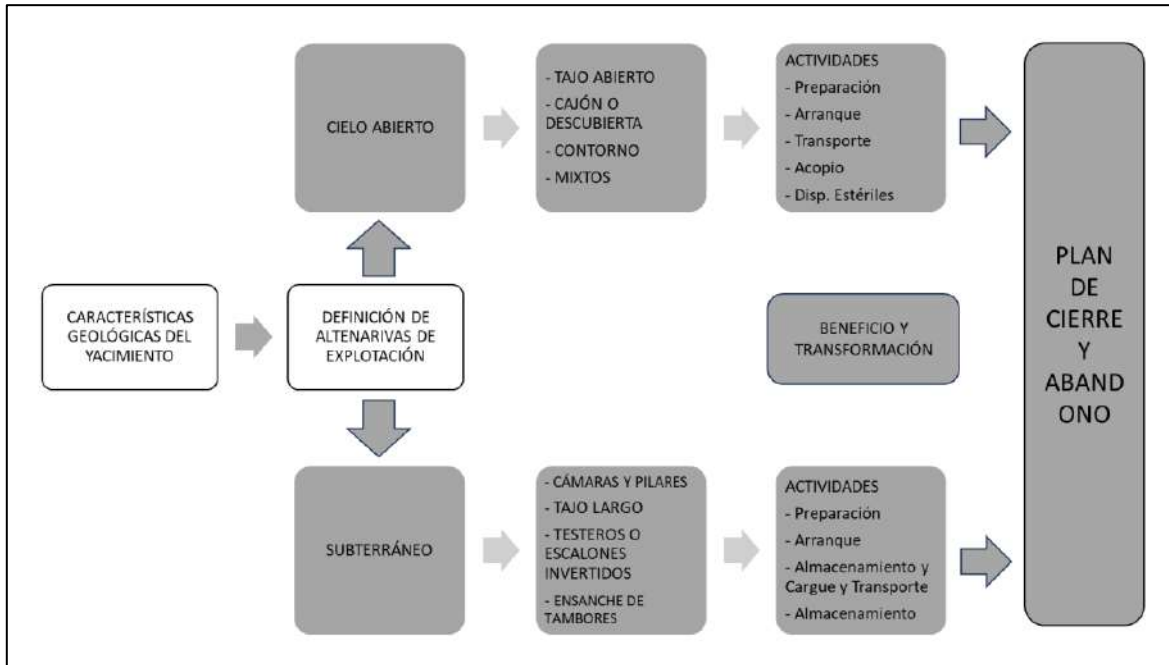


Figura 25. Métodos de explotación

Fuente: Guía minero ambiental para explotación.

Una vez definido el sistema de explotación a implementar es necesario abordar el análisis de los métodos apropiados para la explotación técnica, racional, económica del depósito minero; en este punto el equipo técnico debe realizar los análisis costo - beneficio de cada uno de los métodos y así seleccionar el método más apropiado para la ejecución del proyecto minero.

5.1.2.1.1 Explotación a cielo abierto

Se caracteriza esencialmente por los grandes volúmenes a remover y la relación de estéril vs mineral, que define el "ratio" o relación de descapote, que se constituye en el parámetro fundamental para la viabilidad económica de la explotación y en consecuencia la profundidad de la explotación que es posible alcanzar por este sistema. Los más utilizados para la explotación de carbón, entre otros son:

- Tajo abierto (Open Pit),
- Minería de cajón o descubiertas (Strip-mining),
- Minería de contorno (Contour Mining). Métodos mixtos o especiales

Tajo abierto (Open Pit).

Aplicable en depósitos en donde por su buzamiento se obliga a una profundización de la excavación, manejo de perfiles finales de explotación, los estériles producto de la explotación pueden ser dispuestos dentro del mismo tajo o en depósitos externos. El avance del tajo puede ser longitudinal, transversal o mixto.

Las principales características de este método son:

- Extracción de estériles con medios mecánicos o por voladura.
- Arranque de carbón por medios mecánicos de alto rendimiento.
- Aplicable al conjunto de mantos de espesor variable.
- Mantos con inclinaciones mayores a 20°.
- Condiciones geomecánicas de roca caja para diseño final de taludes.

Minería de cajón o descubiertas (Strip-mining).

Aplicable a mantos con bajos buzamientos y poco espesor y altas relaciones de descapote, se lleva un banco superior de descapote y un banco inferior de explotación de los mantos de carbón. Las principales características de este método son:

- Bajos buzamientos (inferiores a 10°).
- Altos volúmenes de reservas.
- Alta relación de descapote.
- Arranque de estéril y mineral por medios mecánicos.
- Disposición de estériles a la cola de la explotación.
- Alta mecanización.

Minería de contorno (Contour Mining).

Se realiza la extracción del estéril de recubrimiento de los mantos de carbón siguiendo las curvas de nivel, y disposición de los mismos sobre ladera o a la cola de la explotación. Las principales características de este método son:

- Mantos horizontales o de bajo buzamiento.
- Económico y sencillo de implementar en yacimientos pequeños.
- Bajo tiempo de preparación, poco personal y fácil manejo técnico.

Métodos mixtos o especiales

Aplicable a los depósitos de carbón donde por sus características geológicas se requiere la continuidad de la explotación a cielo abierto por métodos subterráneos, como es el caso de la denominada minería "auger", en la que después de haber efectuado la

extracción a cielo abierto se hace uso de equipos especiales que, situados en superficie, efectúan el arranque y transporte hasta el exterior del mineral.

5.1.2.1.2 Explotación subterránea

La explotación por este sistema se aborda cuando las condiciones geológicas del yacimiento hacen que los costos de remoción de estéril hagan inviable la explotación por los sistemas a cielo abierto; cobran acá alta importancia los parámetros de seguridad a implementar dada la complejidad de estos yacimientos.

Los métodos de minería subterránea están clasificados, de acuerdo al soporte del techo, este depende de las propiedades mecánicas de las rocas y de las características espaciales, tanto de la sustancia mineral como de la roca encajante. La minería subterránea consiste en la extracción del mineral a través de túneles, galerías y pozos hasta superficie, con un mínimo movimiento de estériles. La extracción del mineral se debe soportar en las mejores condiciones técnicas y de seguridad, minimizando costos y preservando en lo posible una superficie libre de hundimientos. En minería de carbón se recomienda tener especial cuidado en el manejo de atmosferas explosivas y el uso de explosivos permisibles para ese tipo de actividad.

Los principales métodos de explotación bajo tierra para carbón son: Cámaras y pilares, tajo largo y/o corto con derrumbe dirigido (Logwall Mining), testers escalonados o invertidos, ensanche de tambores, entre otros.

Cámaras y pilares

Consiste en el diseño de pilares que soporten toda la sobrecarga de la columna de roca en condiciones extremas que se genera sobre estos y cámaras con un ancho adecuado para que el techo o viga sometida a flexión no colapse. Con este método se busca evitar las subsidencias que pueden extenderse más allá de las zonas de concesión minera.

Tajo largo y/o corto con derrumbe dirigido (Logwall Mining)

Este método se aplica en yacimientos o depósitos de poca inclinación, con espesores entre 1 y 2.5 m. Consiste en dividir el yacimiento en grandes bloques o tajos, por medio de galerías superiores e inferiores, que determinan el ancho del frente de arranque y unidas por galerías inclinadas, presentándose el derrumbe del techo en las áreas ya explotadas. El sentido de la explotación puede hacerse en avance o retirada. El grado de mecanización del tajo depende de la magnitud del proyecto.

Testeros escalonados o invertidos

Se utilizan en aquellos yacimientos con fuerte buzamiento para lo cual se descompone el yacimiento en pisos o niveles. Se parte de la galería superior o inferior y se abre un frente de trabajo que se va ensanchando y formando bloques escalonados que van progresando a medida que avanza la explotación. El descargue del mineral se realiza por gravedad hasta la galería inferior de transporte. Método utilizado para proyectos de pequeña minería.

Ensanche de tambores

El yacimiento estratificado se delimita en el sentido del buzamiento por guías y sobreguías y en el sentido del rumbo por tambores que actúan en la práctica como tambores de preparación. A partir de la guía se abren tambores ascendentes siguiendo el buzamiento de la capa, los cuales una vez alcanzan la longitud establecida se procede a ensancharlos en el sentido del rumbo.

5.1.2.2 Geometría de la explotación

Los criterios y cálculos utilizados para el diseño final de la explotación, tales como dimensiones mínimas y máximas, anchos, alturas, longitudes, ángulos de corte, dependiendo del sistema de explotación y de los equipos mineros seleccionados, son variables determinantes para los factores de dilución y recuperación planeados.

En el caso de las minas a cielo abierto, la geometría final de la explotación deberá estar en función de la máxima profundidad del pit, criterio que depende de los equipos que hacen parte de la operación, de las condiciones del mercado, entre otros factores, todo dentro de un complejo proceso de optimización.

Para minería subterránea la geometría final de la explotación estará dada por una combinación del método seleccionado, los equipos que hagan parte de dicho método, las condiciones morfológicas del manto de carbón a extraer, de las restricciones en superficie, las características geomecánicas de los respaldos, entre otras.

Sea cual fuere el tipo de minería que sea escogido, estas variables son parte esencial del diseño minero final y tendrán impacto en la estimación de las reservas.

5.1.2.3 Niveles de Tecnificación

La implementación o no de tecnología de punta o con un alto grado de tecnificación para el desarrollo del proyecto minero en cualquiera de sus etapas, va a tener un significativo impacto en la estimación de reservas, y en ello debe considerarse la alta volatilidad en los precios del carbón en el mercado, el costo de capital que implica esta implementación, las cambiantes condiciones socio-políticas, y que en definitiva, se van a ver reflejadas en la rentabilidad del proyecto y en el retorno de las inversiones.

5.1.2.4 Zonas de disposición de estériles (Botaderos)

Desde los estudios de prefactibilidad del proyecto minero se debe considerar la necesidad de establecer o no, áreas para el manejo de materiales estériles, los cuales comúnmente son llamados botaderos, escombreras, o ZODMES (Zonas de Disposición de Material de Excavación Sobrantes), y para definir los parámetros técnicos de diseño, se tendrá que considerar no solo los volúmenes esperados a remover y disponer allí, sino también las características mismas de los tipos de minerales que componen estos materiales estériles, pues de su caracterización dependerá la proyección de obras y actividades a realizar para el manejo a los drenajes ácidos que puedan llegar a producirse.

Las áreas que se destinen o definan para establecer los botaderos en superficie, deberán cumplir con características esenciales tales como, una ubicación estratégica en la cual no solo se busque realizar el menor impacto ambiental, una morfología tal que permita

disponer los volúmenes de estéril que se esperan remover, unas características óptimas desde el orden geotécnico que garanticen su estabilidad (estudios de capacidad portante y factores de seguridad), sin olvidar que la principal limitante para su establecimiento puede llegar a ser la aprobación de la viabilidad ambiental.

Si bien es cierto que la temática de los botaderos es un factor de mucho peso en la gran minería a cielo abierto y que un estudio de prefactibilidad o factibilidad debería incluir al menos un capítulo dedicado al diseño y en general, a las consideraciones técnicas necesarias para mantener equilibrado el costo de disposición de estériles dentro del proyecto, es frecuentemente un factor no tenido en cuenta en explotaciones medianas a cielo abierto, y en casi todas las explotaciones subterráneas.

Normalmente los estudios de factibilidad de las grandes operaciones mineras a cielo abierto incluyen todo lo necesario para el dimensionamiento, localización, secuenciamiento y correcta ejecución de los botaderos; no sucede lo mismo en los otros casos. Desde el punto de vista legal (obtención de los permisos para la disposición) hasta la ubicación de predios susceptibles a este fin, este es un factor “menospreciado” que va a generar repercusiones económicas considerables en la vida de la mina. Es por esto que, la recomendación para este factor es la de prever y acoger todas las medidas disponibles para incluir al menos una zona de depósito de material estéril que esté en condiciones de servir al proyecto al menos en el corto plazo.

Recomendaciones:

- Analizar aspectos como estudios geotécnicos o de suelos y/o estudio de estabilidad de taludes, la distancia de acarreo de los materiales estériles, la propiedad o servidumbres de los predios o áreas definidas para establecer el botadero, los posibles impactos ambientales que se generarán en el área de influencia del proyecto y los costos o inversiones requeridas para su manejo y cierre definitivo.
- Y es por esta razón que, dentro de la planeación minera, se debe propender por evitar la evacuación de los estériles a superficie, mediante buenas prácticas de minado en las que se destinen áreas o labores mineras “abandonadas” para ser usadas como retrolleados.
- Para definir las áreas donde se establecerán los botaderos se debe tener plena confianza en que allí no hay recursos minerales, de manera que no se esterilicen dichas áreas.
- Articular el manejo de botaderos con los planes de cierre de las obras e infraestructura minera, identificando posibles sobrecostos, afectaciones geotécnicas y de estabilidad.

5.1.2.5 Pérdidas

Las pérdidas de extracción minera generalmente se asocian con pérdidas de techo y piso, pérdidas de cabeza y pérdidas en la base de los mantos, pérdidas de rampa en tajos y drenaje de agua y otras pérdidas potenciales de extracción.

Otro tipo de pérdidas pueden ser aquellas asociadas por el efecto de la incertidumbre geológica y/o efecto de estructuras geológicas relevantes que pueden afectar la continuidad de la mineralización.

El factor de extracción es el porcentaje de carbón extraído de un manto donde el tonelaje total original es igual al 100%. El carbón no extraído se considera como pérdida de minería a menos que constituya cantidades recuperables posteriores a la explotación inicialmente proyectada.

5.1.3 Infraestructura

La infraestructura existente en el área de influencia del depósito tiene un efecto significativo en los costos, cronogramas de montajes, transporte de insumos y disponibilidad de servicios. El costo de capital de infraestructura puede variar sustancialmente de un sitio a otro y a menudo es una función de la ubicación más que de la elección del método de extracción o procesamiento (CIM, 2019). Se han identificado varios casos en los que la infraestructura se ha subestimado críticamente, lo cual ha llevado al fracaso de los proyectos dados los requerimientos reales de infraestructura (Rupprecht, 2016).

5.1.3.1 Infraestructura Interna

Cada proyecto minero deberá contar con una infraestructura interna que garantice las condiciones de seguridad óptimas para el personal y con la cual se propenda por el cumplimiento de las metas de producción estimadas, es así que la infraestructura interna juega un papel trascendental en la determinación de los rendimientos de la operación minera, ya que cada uno de los servicios que hacen parte de la infraestructura y que le dan soporte a las operaciones, debe estar ligado y concatenado uno al otro, puesto que factores como la deficiencia o intermitencia en el fluido eléctrico, las limitaciones de repuestos, insumos y/o materiales, el atraso en el avance de las labores programadas, y el deterioro o daño de la infraestructura interna misma, afectan directamente en la productividad y por ende en la rentabilidad del proyecto.

La eficiencia de los procesos productivos está directamente ligada con las condiciones óptimas que se tengan no solo de la infraestructura interna, sino también de cada uno de los componentes de los sistemas de soporte minero, es por ello que se deben implementar y ejecutar rigurosamente los programas de mantenimiento preventivo y correctivo, y realizar un monitoreo continuo a las condiciones de la infraestructura interna.

5.1.3.2 Infraestructura Externa

Las obras e instalaciones de infraestructura que se adelanten en superficie hacen parte fundamental del proyecto minero, las mismas corresponden a la vías de acceso, manejo de aguas de escorrentía, redes eléctricas e hidráulicas, obras civiles destinadas a campamentos, talleres, polvorines, áreas administrativas, patios de acopio, áreas para las operaciones de beneficio y transformación, botaderos, escombreras, entre muchas otras, que deben ser concebidas dentro del Plan Minero para atender a las necesidades del manejo de la producción y de cada uno de los procesos que soportan el desarrollo minero.

Esta infraestructura externa debe garantizar las condiciones de operatividad y de seguridad durante toda la vida útil del proyecto, por tanto, es fundamental preservar su estado físico y/o estructural mediante la ejecución de los programas de mantenimiento preventivo y correctivo, de tal forma que ,brinde eficiencia y los rendimientos óptimos

en cada uno de los procesos, y así se garantice la cantidad y calidad del mineral que será entregado al consumidor final.

Se deben identificar las fuentes principales de energía eléctrica, comunicación y suministros de agua potable y disponibles para el proyecto minero. Esto permitirá definir los requerimientos de equipos específicos y permisos para cubrir la operación, entre los más comunes se pueden encontrar solicitudes de interconexión eléctrica y acueducto, recolección o disposición final de residuos, permisos de captación y vertimientos domésticos, repetidoras de señal de comunicación, sub-estaciones y plantas eléctricas, sistemas de tratamiento de aguas, entre otros.

5.1.4 Accesibilidad al sitio

Es necesaria una caracterización de las vías de acceso al área de trabajo, analizando las que ya existen y las que es necesario construir. Dicha caracterización debe incluir implicaciones tales como: permisos requeridos para construir las vías, costo de las obras, mantenimiento, obras complementarias para control de aguas de escorrentía, entre otras.

Las obras para accesibilidad a las zonas de explotación deben garantizar el suministro de insumos, movilidad de personal y producción del proyecto minero. Para esto se deben evaluar actividades como aperturas y acondicionamiento de vías, canales de flotación, helipuertos, entre otros. En caso de requerir transporte de material por vías privadas o públicas se deben verificar los permisos de servidumbres, capacidades y restricciones de carga.

5.1.5 Mano de obra disponible

Una evaluación de la tradición económica y disponibilidad de mano de obra del área de influencia del proyecto permite establecer el personal local y foráneo requerido acorde con los perfiles de los cargos disponibles, con estos datos se pueden tomar decisiones acerca del requerimiento o no de campamento minero, capacidad del campamento, transporte, manutención del personal, entre otros. Se recomienda priorizar en lo posible, la fuerza laboral y los proveedores locales, ya que esto también genera un beneficio a las comunidades de la zona de influencia del proyecto, las cuales pueden ver al proyecto minero como una oportunidad de crecimiento para todos.

5.1.6 Infraestructura de soporte

Se recomienda identificar los costos, disponibilidad y tiempos asociados con soporte industrial, administrativo, puertos, suministros de combustibles, repuestos y demás actividades o insumos que puedan afectar los rendimientos de las labores mineras, y los cronogramas de montaje y operación. La infraestructura de soporte permite tomar decisiones referentes a los inventarios de insumos para la operación, inversiones en talleres y obras adicionales del proyecto con el objetivo de garantizar los rendimientos mínimos esperados en la operación.

5.1.7 Seguridad

En esta guía se resalta la relevancia de considerar la seguridad como un factor modificador que puede impactar de forma significativa la estimación de reservas en depósitos de carbón, toda vez que las condiciones seguras de operación van a influenciar

sobre el método de explotación, costos de equipos, recuperación, actividades de desarrollo, entre otras.

En el análisis de las condiciones de seguridad, se sugiere incluir: gas metano, polvo de carbón, condiciones de sostenimiento y ventilación, e inflamabilidad del carbón, de manera que sea posible identificar. La identificación de mantos de carbón con susceptibilidad a explosiones, se debe considerar de manera diferencial en el método de explotación, así como en posibles costos asociados a ventilación adecuada.

Las condiciones de seguridad pueden generar que se tengan mantos de carbón (espesor), zonas con condiciones inseguras, que no puedan ser explotados, por lo que no podrían ser llevados a reservas.

Estudio de gas metano

Es recomendable contar con estudios geológicos donde se determinen las concentraciones de gas metano tanto en los mantos de carbón a explotar como en los respaldos superiores e inferiores, así mismo se requiere de los respectivos análisis de riesgos asociados al metano y del plan de prevención que permita administrar las acciones para prevenir los posibles riesgos derivados de este evento y darle viabilidad a la explotación de los mantos de carbón.

Estudio de Polvo de Carbón

Evaluar el contenido de materias volátiles en el manto de carbón para establecer si se clasifica como mina pulverulenta, y a partir de esta clasificación establecer medidas para la prevención y control del polvo de carbón desde el planeamiento minero.

Inflamabilidad del Carbón

En las explotaciones de carbón, tanto a cielo abierto como subterráneo puede darse la inflamabilidad del carbón, generando incendios que se pueden dar de forma espontánea, con una rápida propagación y alta generación de gases y temperaturas que lo acompañan. En otros casos, se produce por auto combustión: oxidación del mineral carbón sin llama abierta; caso en el cual se desarrollan lentamente.

Los incendios del carbón son un importante problema para la minería, debido a que representan pérdidas económicas, dificultades en la seguridad de las operaciones, inestabilidad de taludes y/o de túneles y consecuencias ambientales (Arisoy & Akgün, 1994; Arisoy, et al., 2006).

Sostenimiento y Ventilación

El diseño del sostenimiento debe realizarse teniendo en cuenta la caracterización del macizo rocoso, condiciones del diseño minero y estabilidad de las zonas en donde se están estimando reservas.

De acuerdo con las estadísticas, la mayor accidentalidad por eventos de fallas en la ventilación con un alto índice de fatalidades, se genera en labores subterráneas de carbón; en este nivel de importancia es inminente que los diseños en capacidad instalada

de ventilación, no deben limitarse a las condiciones mínimas de la necesidad de oxígeno, estos deben superar en un margen adecuado los factores de seguridad mínimos.

Las decisiones en cuanto a inversiones en equipos de ventilación, se convierten en un costo importante al momento de la estimación de reservas y evaluación económica del proyecto.

Recomendaciones

- Analizar el impacto que el contenido de polvo de carbón genera en el factor modificador de seguridad, considerando su impacto en inversiones, diseño minero y diseño de ventilación propuesto.
- Realizar la clasificación geomecánica del macizo rocoso para establecer, cuál es el comportamiento de estabilidad de las zonas de interés económico que serán vinculadas a la estimación de reservas minerales, a partir de lo cual, es posible definir costos asociados al sistema de sostenimiento y fortificación propuestos, así como la posibilidad de descartar áreas en condiciones de inestabilidad que no generan una extracción económica.
- Establecer los costos asociados a la implementación de ventilación forzada, incluyendo equipos, monitoreo, manejo y capacitación de personal.
- Desde la fase de caracterización de los carbones (recursos minerales), se debe contar con los estudios de susceptibilidad de inflamabilidad de los mantos (bien sea para explotación a cielo abierto o bajo tierra), esto a fin de contar con las variables técnicas y de seguridad minera que permitan prevenir, mitigar y proyectar planes de contingencia a implementar durante la ejecución minera, de tal manera que se incorporen todos los aspectos técnicos y económicos y delimitar áreas que no son susceptibles de incluir en la estimación de reservas minerales.

Recomendaciones

- Análisis de zonas con riesgo de derrumbe, con acumulación de aguas y que se pretendan intervenir. Análisis de factores de seguridad y costos de recuperación, conforme a la geometría recomendada en los estudios y análisis de estabilidad realizados para considerar si se pueden incluir como reservas minerales.
- Delimitar zonas con presencia de incendios por autocombustión y restarlas de las áreas de recursos y reservas, además de establecer controles que minimicen la probabilidad de esterilizar áreas definidas con recursos.
- Realizar una zonificación con contenidos de gas metano, identificando zonas de riesgo alto.
- Identificar zonas susceptibles (estructuras de falla) de acumulación de gas metano.
- Los estudios de pre-factibilidad y factibilidad minera deben contemplar todos los aspectos técnicos y económicos de seguridad minera y valorar los impactos de los mismos frente a la estimación de las reservas.
- Caracterizar los carbones para definir su potencial para producir polvo de carbón, a partir de análisis próximos, granulométricos, pruebas de temperatura mínima

de ignición en nube (Tmin), límite inferior de explosividad (LIE) y severidad de la explosión (K_{máx}).

Más información

- Guía de Seguridad para sostenimiento de minas subterráneas, POSITIVA Compañía de Seguros, Bogotá, Abril de 2021.
- Guía de Seguridad para ventilación en minas subterráneas, POSITIVA Compañía de Seguros, Bogotá, Diciembre de 2017.
- Decálogo de Ventilación, ANM, AIMC, UN; 20 de mayo de 2021.
- Prevención y Control del Metano en Minería Subterránea de Carbón como Oportunidad de Proyectos Sostenibles en Colombia.
- Decreto 1886 de 2015, modificado por el Decreto 944 de 2022.
- Guía técnica para el diseño de un plan de prevención y mitigación de explosiones por metano y polvo de carbón en las minas subterráneas de Colombia. Universidad Nacional de Colombia - ANM.

5.1.8 Procesos de beneficio

El proceso de beneficio del carbón mineral, es el conjunto de operaciones físicas utilizadas para obtener un producto comercial, entre las que se encuentran: trituración, molienda, tamizado, lavado y secado.

Atendiendo a las características de calidad del yacimiento de carbón, así como a las condiciones del mercado y del uso o destino final que se le dará al mineral, se hace necesario que desde la planeación se defina si se requerirá la implementación de sistemas para el procesamiento del carbón, que, si bien tendrán un impacto considerable en los niveles de inversión del proyecto, también puede ser un factor determinante en la estimación de las reservas.

Recomendaciones

- Al momento de la estimación se debe declarar si las reservas de carbón son en boca de mina o posterior al proceso de beneficio (con calidad de producto comercializable).
- En la estimación de reservas minerales se deben incluir las consideraciones respecto al uso del carbón, su calidad y precio comercializable.

5.2 Factor Ambiental

Determinar el impacto del componente ambiental en el área del proyecto minero permite definir áreas de exclusión o restricción a la actividad minera. En las zonas de exclusión no es posible definir recursos minerales considerando que, no se puede cumplir la premisa de una perspectiva razonable de una eventual extracción económica. En las áreas de restricción, es posible que sea posible definir y declarar recursos minerales, restricciones que deben ser consideradas en el análisis de reservas minerales.

Para cualquier proyecto minero, sin importar su envergadura y el método de explotación, resulta determinante definir con precisión el entorno en donde se desarrolla y con ello los recursos naturales que se verán impactados por las actividades mineras.

Desde la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental deben abordarse todas las actividades susceptibles de ser licenciadas, identificar zonas de restricción, exclusión, áreas de manejo especial, planes de ordenamiento ambiental, entre otras situaciones no definidas que puedan restringir el panorama de desarrollado del proyecto.

Se puede entender el factor ambiental como un análisis cualitativo, entendiendo el impacto con respecto a la categorización de los recursos, pero al identificar zonas que definitivamente no podrán ser intervenidas, la consideración debe ser no declarar recursos minerales y reservas, hasta tanto no se tengan definidas con alto grado de confianza, y en ese momento establecer su categorización.

Las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) establecen las determinantes ambientales en el área de su jurisdicción, definen las zonas de importancia ambiental y el componente de gestión del riesgo. Estas determinantes se incorporan en los planes de ordenamiento territorial y establecen el uso del suelo y las áreas de actividad con usos condicionados, restringidos o prohibidos.

El profesional líder debe identificar la entidad ambiental reguladora para la zona de interés o de acuerdo a la escala de su proyecto (CAR, ANLA), así como asegurar que se realice la revisión de los diferentes instrumentos de planeación ambiental y territorial, tales como POMCAS, POMIAS, PMAA, entre otros, para identificar las áreas factibles de explotación minera. Conocer estas áreas y traslaparlas sobre el polígono de la concesión minera, es parte del proceso de vinculación de los factores modificadores ambientales en la estimación y categorización de reservas.

5.2.1 Plan de cierre y abandono

Una de las etapas cruciales dentro de la ejecución de un proyecto minero es la fase de cierre de las actividades extractivas, comúnmente llamada *Plan de Cierre y Abandono*, la cual comprende todas las acciones encaminadas a la reconfiguración y rehabilitación de las áreas intervenidas por las labores mineras y por la infraestructura, y propender por el restablecimiento del potencial uso del suelo.

Las medidas de cierre de una actividad minera cualquiera, deben incluir acciones de control y mitigación para las alteraciones causadas, con el propósito de que, una vez finalizada la etapa productiva del proyecto, sea posible utilizar estas áreas modificadas desde su funcionalidad y visión específica del uso del territorio, de una manera sostenible y acorde al entorno social y ambiental.

El Plan de Cierre y Abandono es requerido en las diferentes etapas a lo largo del ciclo de vida del proyecto minero, y es por ello que se establecen los tipos de cierre: inicial, progresivo, temporal, final, parcial, y postcierre; en cada una de estas etapas de cierre es necesario que se analicen y evalúen las alteraciones causadas y se formulen los programas que estén acorde con el restablecimiento de las condiciones físicas que se tenían antes de la intervención minera.

Recomendaciones:

- El Plan de Cierre minero y de su infraestructura asociada, debe iniciarse desde las etapas tempranas y simultáneamente con las operaciones mineras,

resultando ventajoso para el medio ambiente y sus elementos expuestos, pues se garantizan mínimos impactos.

- La implementación de un Plan de Cierre y Abandono implica realizar inversiones importantes a lo largo de la vida útil del proyecto, y dentro de la planeación estas inversiones no se deben manejar como una apropiación o provisión de recursos económicos para invertir solo al finalizar el proyecto.
- El Plan de Cierre está directamente ligado con el aprovisionamiento de los recursos económicos que se destinen para su ejecución, los cuales deben ser considerados desde el momento en que se realice la evaluación en la estimación y categorización de las Reservas.

Recomendaciones

- Verificar que la información disponible se encuentre actualizada respecto a medio ambiente, permisos y licencias relacionados con el proyecto y que cumpla con la normatividad vigente.
- Establecer el alcance de los componentes ambientales según la fase de trabajo, es una buena práctica que ayuda en la optimización de las labores. En este sentido, deben programarse los permisos, estudios y planes de manejo ambiental para la fase de exploración, de explotación y para el cierre y postcierre de la mina.
- El otorgamiento de un instrumento ambiental permite evaluar la reconciliación de los recursos y reservas estimados, por lo tanto, es vital revisar las determinaciones realizadas en el mismo, respecto a las restricciones ambientales y su impacto en las estimaciones previas.

5.3 Factor social

El Factor Modificador social debe abordarse desde las fases tempranas de exploración, ya que para desarrollar las labores planeadas, es necesario el aval de las comunidades en el área de influencia del proyecto.

El conocimiento y análisis de los impactos sociales son fundamentales en las decisiones y expectativas sobre la confianza relativa de la ejecución de cualquier proyecto minero, siendo este factor determinante para la estimación de las reservas.

El principal problema es que la no viabilidad social no permita desarrollar el proyecto.

El impacto económico es más relevante cuando se realiza la conversión de recursos a reservas, pues los costos en los que debe incurrir el proyecto para cubrir las labores sociales, afectan directamente las reservas.

El análisis del factor modificador social incluye el diagnóstico de las condiciones de vida de los habitantes del área, las comunidades presentes, sus tradiciones y expectativas; para acoplar los beneficios sociales que brinda la empresa a las necesidades de la sociedad.

Entorno social minero-Minería informal

Es posible la existencia de áreas con intervención minera que no esta regulada, aspecto que debe ser considerando al momento de la definición de recursos y reservas minerales,

no es un tema para dejarlo de lado sin evaluar el impacto que estas actividades tienen en el depósito.

Recomendaciones

- Analizar impactos sociales en cuanto a minería no regularizada, la cual esta afectando la zona de estudio, como cambios en la topografía y posibles afectaciones ambientales, son aspectos determinantes al momento de la estimación de recursos y reservas minerales.
- Evaluar la imposibilidad de intervenir un área específica dadas las condiciones sociales específicas.
- Establecer la estrategia de desarrollo sostenible teniendo en cuenta las influencias culturales y sociales de la zona. Dicha estrategia debe procurar la potenciación de los impactos positivos del proyecto y mitigación de los impactos negativos.
- Se deben identificar los posibles impactos negativos de tipo social, que puedan llegar a generarse en el área de influencia del desarrollo del proyecto minero, de tal forma que se planteen las acciones de prevención, mitigación y atención efectiva, y con los que se evite la posible ocurrencia de conflictos sociales que limiten la intervención en áreas que ya han sido definidas para el desarrollo minero.
- Realizar una comunicación y divulgación eficaz de las acciones sociales con los grupos de interés sobre el alcance y los objetivos del proyecto minero, así como de los beneficios y posibles oportunidades que pueden suscitarse en pro del bien común; buscando asegurar la confiabilidad del proyecto.

5.4 Factores económicos

Lograr una operación exitosa desde el punto de vista económico requiere de un análisis riguroso y realista de los costos e inversiones del proyecto y de la rentabilidad esperada. El factor económico enmarca la viabilidad financiera y permite definir, en las diferentes etapas del proyecto, si el depósito tiene una perspectiva razonable para su eventual extracción económica. El detalle de la evaluación económica depende de la fase del proyecto; en la Tabla 8 se resumen algunos de los aspectos más relevantes de esta evaluación, los estudios se realizan a nivel conceptual, de prefactibilidad o de factibilidad de una propiedad minera o en una mina en operación.

Para la conversión de recursos minerales indicados y/o medidos a reservas probables y/o probadas, se requiere al menos de un estudio de prefactibilidad que incluya un plan minero que sea técnicamente realizable y que todos los parámetros relevantes para una evaluación de la viabilidad financiera del proyecto sean considerados.

La viabilidad económica del proyecto debe ser justificada mediante el análisis de la oferta y la demanda, la calidad y cantidad del mineral a ser comercializado, los precios de venta, los costos operativos (opex), la inversión inicial (capex), el capital de trabajo, el modelo económico, el flujo de caja, e incluir un análisis de sensibilidad del proyecto. En la industria minera los modelos de descuento de flujo de caja son usados para evaluar la viabilidad de los proyectos.

Mas información

- The Argument for a “Bare Bones” Base Case. Smith, L.D. CIM, 1999.
- Discounted Cash Flow Analysis – Methodology and Discount Rates. Smith, L.D. CIM Bulletin, 2002.
- Economic Evaluation and Investment Decision Methods. Stermole, F.J., and Stermole, J.M. Investment Evaluations Corporation, 2014.
- Discounted Cash Flow Analysis Input Parameters and Sensitivity: in Mineral Property Valuation Proceedings. Lattanzi, C. R. Keith N. Spence and William E. Roscoe, co-chairs, 2000.

Tabla 8. Evaluación de componentes económicos según la fase del proyecto

Evaluación económica	Evaluación Económica Preliminar (PEA)	Estudio de prefactibilidad	Estudio de factibilidad
Análisis financiero	Evaluación preliminar de principales parámetros económicos	Evaluación de los principales factores económicos	Evaluación completa de principales parámetros económicos
Mercado y precio	Conocimientos industriales y consenso de precios	Análisis preliminar del mercado, calidades requeridas y restricciones de producción	Estudio detallado de mercado
Regalías e impuestos	Evaluación preliminar de principales parámetros económicos	Evaluación preliminar de principales parámetros económicos	Análisis detallado con opiniones de autoridades de impuestos
Fundición, refinería y transporte	Datos históricos	Presupuestos a partir de cotizaciones	Contratos a firmar
Análisis de flujo de caja	Flujo de caja simple	Flujo de caja preliminar	Flujo de caja de detalle
Criterios económicos	TIR Y VPN (antes y después de impuestos)	TIR Y VPN preliminar (antes y después de impuestos)	Análisis completo de TIR, VPN, ROI y periodo de recuperación (antes y después de impuestos)
Análisis de sensibilidad	Análisis básico a una cantidad mínima de variables	Análisis preliminar para definir variables clave del proyecto	Numerosos análisis a todas las variables clave del proyecto

Costos de capital	Evaluación Económica Preliminar (PEA)	Estudio de prefactibilidad	Estudio de factibilidad
Estructuras civiles, eléctricas, labores de construcción, materiales y precios de equipos, infraestructura, volúmenes de material	Orden de magnitud basado en datos históricos	Estimados por datos históricos, porcentajes y cotizaciones de vendedor basados en volumen de material	Detalle de estimaciones, ingeniería del 15 al 25% por completar, cotizaciones múltiples
Contratistas	Incluir unidad de costo o porcentaje de costo total	Porcentaje del costo directo por costo de área del contratista, históricos de subcontratos	Cotizaciones de contratistas y subcontratistas
Propietarios	Estimativos históricos	Estimados por experiencia para proyectos similares	Estimados a partir del presupuesto cero de detalle
Capital de trabajo	Factorizado por experiencia histórica	Estimado de experiencia factorizada para proyectos similares	Estimados a partir del presupuesto cero de detalle
Ambiental, social, costos de cierre	Factores de estimaciones históricas	Factores de proyectos similares y estimaciones de experiencia	Estimación de detalle
Precisión	± 25-50%	± 15-25%	± 10-15%
Contingencia	± 30%	± 15%-30%	± 10% - 15%
Costos operativos	Evaluación Económica Preliminar (PEA)	Estudio de prefactibilidad	Estudio de factibilidad
Bases	Orden de magnitud estimado	Estimado por tarifas unitarias	Estimados a partir del presupuesto cero de detalle
Cantidades operativas	General	Cantidades por estimación con algunos factores	Estimados a partir del presupuesto cero de detalle
Unidad de costos	Costo histórico y factorización	Estimados incluyen mano de obra, energía,	Cartas de cotización de proveedores

		consumibles, mantenimiento, mercadeo, ambientales y cierre de mina	
Ambiental, social, costos de cierre	Factores de estimaciones históricas	Estimados por experiencia o factores de proyectos similares	Estimados de detalle a partir del presupuesto cero de detalle y permisos específicos requeridos
Precisión	± 25%-50%	15%-25%	10%-15%
Contingencia	± 25%	± 15%	± 10%

Fuente. Modificado de SAMREC Code, 2016

5.4.1 Estudio de mercado (especificación del producto, mercado internacional vs mercado nacional)

Con el objeto de definir criterios y elementos para evaluar la factibilidad del proyecto y dependiendo de la magnitud del mismo, se analizan las tendencias y proyecciones del mercado interno (local y regional) y externo (nacional e internacional) y se estiman la oferta y la demanda, los precios y ventas esperadas, se define la estrategia de comercialización y se hacen los análisis de riesgos comerciales (ANM, 2018). El profesional responsable del estudio de mercado debe centrar sus esfuerzos en definir un precio apropiado de venta del mineral, considerando entre otros factores los costos operacionales y las inversiones a realizar, con lo cual se podrá determinar la viabilidad económica del proyecto minero.

La calidad del carbón es la base para establecer un precio apropiado de venta, por tanto, tiene un impacto significativo en la estimación de recursos y reservas minerales. Este ítem se desarrolla en el numeral 6.1.

Entre las metodologías más comunes para la definición del precio del mineral para los análisis financieros, se encuentran los promedios históricos a largo plazo, el promedio móvil de tres años, el precio de consenso, el precio del contrato, el margen sobre costo de producción, el precio actual del mineral y la consulta de reportes de especialistas. El profesional responsable del estudio debe explicar las principales asunciones tenidas en cuenta (CIM, 2015).

Recomendaciones

- Es importante definir la metodología para la estimación del precio del *commodity* acorde a la etapa del proyecto. No se recomiendan metodologías de corto plazo como precio actual del *commodity* o promedio móvil de tres años, para proyectos que pretendan entrar en explotación a largo plazo, igualmente no se

- recomiendan metodologías de largo plazo para proyectos que están o iniciarán explotación en corto plazo.
- El profesional encargado del análisis económico debe comprender el momento del mercado y evitar usar precios actuales si éste se encuentra en picos demasiado altos o bajos, ya que con facilidad se podrían afectar los recursos y reservas del proyecto.

5.4.2 Modelo económico

Un requerimiento fundamental para la declaración de las reservas minerales en una operación minera en ejecución o propiedad minera en etapa de evaluación es el demostrar la viabilidad económica de la operación con los parámetros técnicos bajo consideración, tales como el análisis y costeo de todos aquellos factores que puedan impactar la viabilidad económica de extraer los recursos minerales del depósito; esto es comúnmente realizado mediante la preparación de un modelo económico de Descuento de Flujo de Caja (DFC) (CIM 2019).

Los modelos económicos son comúnmente construidos usando periodos sucesivos de un año y proporcionando diferentes métricas del DFC como Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y periodo de retorno. Los modelos económicos deben ser preparados antes y después de impuestos.

Un análisis económico del conjunto de parámetros técnicos y factores modificadores debe incluir al menos un modelo de flujo de caja base, el cual contenga todos los impuestos y regalías en las cuales deba incurrir el proyecto y que, preferiblemente use un precio constante para metal y tasas de cambio, los cuales deben ser fijados por una persona idónea, para ello se recomienda consultar la guía de la CIM, 2005.

No se deben incluir deudas en el modelo, ya que este no es un criterio de viabilidad de los parámetros técnicos que están bajo consideración en relación a la preparación de la declaración de reservas minerales. Tampoco se debe incluir la inflación, pues los proyectos mineros por lo general cubren largos periodos de tiempo donde esta variable es difícil de predecir (CIM 2019).

Algunos elementos esenciales de un modelo económico preparado para soportar la declaración de reservas minerales son los siguientes:

5.3.3 Producción

Los modelos económicos incluyen un cronograma anual de la producción de mina, la cantidad de material, tanto mineralizado como estéril, las calidades y la recuperación esperada (puede variar con el rendimiento, estratigrafía del depósito, humedad y demás factores que puedan afectar la eficiencia del minado) (CIM, 2019).

La estimación de los niveles o volúmenes de producción en un proyecto minero, esta fundamentada en el conocimiento o certeza que se tenga sobre el depósito, específicamente en cuanto a sus características estratigráficas, litológicas y estructurales (continuidad, espesor, buzamiento, calidad del mineral y características geotécnicas de los respaldos), elementos con los que se puede llegar a estructurar el plan minero en el que se selecciona el método de explotación mas apropiado para el tipo de depósito y el nivel de mecanización que se puede implementar, en busca del aprovechamiento óptimo de las reservas, cumpliendo con los estándares de seguridad y atendiendo a los requerimientos de producción esperados que hagan rentable el proyecto.

5.4.2.1 Ingresos

Los ingresos, tanto brutos como netos, son parte fundamental del modelo económico. Para calcular los ingresos debe considerarse el cronograma anual de producción y es importante considerar la calidad (CIM, 2019).

5.4.2.2 Costos Operativos (Opex)

Para el cálculo de los costos operativos para el modelo económico, comúnmente se considera un cronograma anual que incluya los costos de operación de mina, de beneficio (en caso que aplique), de transporte, de comercialización, fletes, pérdidas, seguros, de los impuestos y compromisos sociales, los generales y administrativos (G&A), entre otros (CIM, 2019).

5.4.2.3 Costos de capital (Capex)

Para el cálculo de los costos de capital para el modelo económico, se recomienda, con base en un cronograma anual, considerar el desarrollo del método de explotación seleccionado y los equipos requeridos, el desmonte inicial (si es requerido), los equipos de beneficio e instalaciones de procesamiento, servicios, infraestructura, la adecuación de botaderos, los costos de propiedad, las contingencias y otros costos de capital asociados con la construcción inicial de instalaciones (CIM, 2019).

Adicionalmente, se recomienda incluir los cronogramas anuales de mantenimiento y sustitución de equipos mineros y de procesamiento, el manejo de jarillones o desarrollos de bloques independientes y los costos anuales de cierre durante y después de operación.

5.4.2.4 Capital de trabajo

El modelo económico también comprende un cronograma anual del capital de trabajo requerido durante la fase inicial, para soportar la operación hasta que los ingresos del proyecto sean recibidos. Se deben incluir ítems como inventarios, consumibles y el flujo de caja de operación estimado en mina (CIM, 2019).

5.4.2.5 Impuestos, regalías

Un cronograma anual de todos los impuestos y regalías debe ser incluido en el modelo económico, estas pueden incluir, pero no están limitadas a: regalías no gubernamentales, pagos de acuerdo por impacto y beneficio, impuestos locales y estatales, impuestos y regalías mineras, impuestos de capital, retención de impuestos, y gravámenes especiales (CIM, 2019).

5.4.2.6 Modelo flujo de caja

Un cronograma anual del flujo de caja es construido por todos los ítems considerados anteriormente en el contexto de recursos y reservas minerales. Para asegurarse que el modelo DFC sea una evaluación justa de la viabilidad económica se considera una buena

práctica utilizar el mismo precio del mineral que se utilizó en las estimaciones del programa de producción. Si el precio del metal o valor asumido difiere, se deben explicar las razones del precio asumido, y proporcionar los resultados del DFC y del precio asumido para determinar los cronogramas de producción y declaración de reservas (CIM, 2019).

5.4.2.7 Valor presente neto y tasa de descuento

Una vez el flujo de caja anual sea calculado, como mínimo deben ser reportados los siguientes ítems: flujo de caja descontado después de impuestos, VPN evaluado con una tasa de descuento acorde al riesgo del proyecto, TIR y periodo de recuperación.

El VPN es típicamente reportado con una tasa de descuento ajustada al riesgo, la evaluación debe incluir una explicación de la estimación de dicha tasa. Si el VPN es positivo a esta tasa de descuento, el proyecto es considerado como económicamente viable; por lo tanto, se justifica la declaración de reservas minerales.

La tasa de descuento ajustada al riesgo se espera que refleje el costo de capital del propietario del proyecto, el nivel de riesgo de la etapa actual del proyecto (scoppy, prefactibilidad, factibilidad, operación), riesgos jurisdiccionales o de país, y los riesgos que durante el estudio del proyecto puedan ser incorporados apropiadamente dentro de una tasa de descuento.

Mas información

- Mining Economics and Strategy. Runge, I. C. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1998.
- Discounted Cash Flow and Discount Rates. Smith, L.D. CIM 2002.

5.4.3 Análisis de sensibilidad

La evaluación económica incluye un análisis de sensibilidad u otro análisis usando variantes en el precio del *carbón*, diferentes calidades, costos de capital y operativos y otros parámetros relevantes detectados durante la evaluación, e incluir una discusión del impacto de los resultados.

Al realizar un análisis de sensibilidad, es importante examinar los impactos de las variaciones positivas y negativas de los parámetros en análisis, ya que el análisis de solo variaciones positivas o solo variaciones negativas pueden llevar a conclusiones engañosas.

El VPN del flujo de caja anual debe ser calculado para un rango de tasas de descuento, el análisis debe ser equilibrado con tasas de descuento más altas y más bajas alrededor de la tasa de descuento ajustada al riesgo; sin embargo, la tasa de descuento más baja debe continuar reflejando la razonabilidad para la información prospectiva. Los resultados deben ser presentados como tablas o gráficos.

Debido a la complejidad de ejecutar dichos análisis de sensibilidad, un enfoque común es mantener las reservas minerales fijas (volumen, calidad, programas de producción) y los demás valores como constantes mientras se ajustan las variables deseadas en el rango de valores. Este enfoque se denomina comúnmente como enfoque determinista.

Los resultados de cualquier análisis de sensibilidad deben ser claramente presentados en tablas o gráficos y ser balanceados acorde con el nivel del estudio. Uno de los análisis

de sensibilidad debe mostrar el impacto de las variaciones en el precio del *carbón* en las principales estimaciones del flujo de caja, el rango de los precios queda a discreción del profesional, pero el extremo inferior del rango de precios debe incluir un valor en que el flujo de caja sin descuento se vuelva cero, y un valor en que el VPN se vuelva cero.

Mas información

- Guidance on commodity pricing used in resource and reserve estimation and reporting submitted by the Commodity Price. CIM, 2015.
- US securities and exchange commission (sec) guideline.

5.5 Factores legales

La legislación vigente para manejo y control por parte de las diferentes autoridades que intervienen en los procesos mineros, las disposiciones en el ámbito de ordenamiento territorial y los diferentes contratos o compromisos legales del proyecto, constituyen el Factor Modificador jurídico, el cual debe acompañar el análisis de conversión de recursos a reservas.

Es importante considerar las contraprestaciones económicas con las cuales está comprometido el proyecto, ya sea con entidades gubernamentales (cánones superficiales, condiciones de pago de regalías), empleados, sindicatos, comunidades o terceros en general; tener claras las autoridades mineras que intervienen en el proyecto, la ley que rige el título y los compromisos documentales, propiedad del terreno, compromisos con bancos o entidades financieras, *join ventures*, obligaciones con propietarios de tierras, servidumbres, acuerdos de formalización, comunidades especiales (indígenas, negritudes, otras), entre otros.

Es importante tener en cuenta la fecha de expiración del título minero, ya que este factor es un determinante de las reservas minerales.

Servidumbre

Para la explotación misma y para un buen manejo de las áreas a intervenir en relación a los tenedores, ocupantes y/o propietarios, se debe iniciar con una identificación jurídico/predial de los inmuebles, con la debida anticipación según la planeación minera. Este proceso empieza con la identificación de predios en relación a los bloques de explotación, la consulta de información predial (obtenida de oficinas de catastro municipales y/o departamentales) y propietarios, poseedores u ocupantes con quienes, es posible adelantar acercamientos para obtener información sobre la titularidad de los predios y viabilidad de negociar la compra u obtener los acuerdos y/o permisos necesarios para realizar la actividad minera.

Recomendaciones

- Desde el estudio de prefactibilidad se debe identificar claramente cuáles de los predios que se encuentran inmersos en el área de concesión, pueden llegar a verse afectados en desarrollo del proyecto minero, no solo para aquellos en donde

- se proyecte adelantar infraestructura, sino también para los que se requiera en su momento ocupar como áreas de protección y compensación ambiental.
- Se recomienda hacer un adecuado programa de acercamiento con los propietarios y/o tenedores de los predios de interés, mucho antes de iniciar la etapa de construcción y montaje, toda vez que así se podrán pactar mejores condiciones económicas de negociación, logrando definir y dar un manejo óptimo de las servidumbres necesarias para la ejecución del proyecto minero.
 - Es importante documentar las visitas o acercamientos con los propietarios y/o tenedores de los predios de interés y realizar actas de colindancia. En caso de no encontrar ocupantes en los predios y considerar que puede tratarse de un presunto baldío sin ocupante identificado, se debe dejar constancia de ello, pues esta constancia es un soporte en los trámites de formalización y/o regulación de servidumbres que se deban gestionar ante la Agencia Nacional de Tierras.
 - El análisis que defina el establecimiento o no de servidumbres mineras, debe considerarse para la estimación y categorización de los recursos y reservas minerales.

5.6 Otros factores

En los numerales anteriores se mencionan los Factores Modificadores más comunes que afectan, tanto a proyectos de carbón, como a otro tipo de yacimientos; sin embargo, el profesional líder debe verificar si existen factores modificadores de otra índole que también pueden afectar las actividades de exploración y explotación.

En caso de que se identifiquen otros factores modificadores inherentes al desarrollo del proyecto minero, es necesario realizar un análisis de los mismos y definir como pueden llegar a impactar o afectar los recursos minerales para la conversión a reservas minerales.

El resultado de este análisis se debería ver reflejado en un resumen que sintetice la evaluación y aplicación para cada factor modificador evaluado y su impacto en la estimación y de esta manera llevar una secuencia lógica del paso de recursos a reservas.

6 ESTIMACIÓN DE RESERVAS

Las consideraciones para la estimación de reservas en los depósitos de carbón mantienen los lineamientos definidos en los estándares acogidos por CRIRSCO, donde se tiene la definición de reserva mineral de la siguiente manera:

Una Reserva Mineral es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido y/o Indicado. Esto incluye el material de dilución y pérdidas que pueden ocurrir cuando el material es explotado o extraído, y está definido apropiadamente por estudios de Pre-Factibilidad o Factibilidad, que incluyen la aplicación de Factores Modificadores. Tales estudios demuestran que, en el momento del reporte, la extracción podría estar justificada razonablemente.

En la estimación de reservas minerales, los estudios han sido definidos, como mínimo a nivel de prefactibilidad con un plan de explotación propuesto.

Los recursos indicados pueden pasar a ser reservas probables, esto quiere decir que la certidumbre no es total y que aún deben evaluarse algunos parámetros para llevar dichos recursos a la categoría de medidos, para que eventualmente puedan pasar a reservas probadas. Los recursos medidos pueden pasar a reservas probables o probadas, dependiendo de la confianza en la estimación y en los parámetros evaluados.

La estimación de las reservas minerales representa la recopilación del trabajo realizado por numerosas disciplinas profesionales; el profesional líder de la estimación debe comprender la importancia del trabajo de cada disciplina para evaluar la viabilidad económica (CIM, 2019).

6.1 Calidad de carbón

Para la estimación de reservas minerales debe definirse una calidad que permita que el carbón sea comercializado, de manera que cumpla con la expectativa del mercado. Parámetros como poder calorífico, contenido de cenizas, material volátil, contenido de azufre, entre otros, deben considerarse al momento de estimar las reservas, dependiendo de su importancia para la calidad requerida, podría establecerse uno o varios parámetros para establecer el límite de corte de calidad que va a usarse para cuantificar las reservas de carbón.

En caso de que presenten varios tipos de carbón (metalúrgicos y térmicos) es conveniente analizar los dominios de estimación de forma separada, puesto que el límite de calidad no será igual en los dos casos, dado sus diferentes precios de venta.

La calidad de carbón en la estimación puede ser obtenida en boca o borde de mina con contenido de impurezas o también se pueden determinar reservas después del proceso de lavado.

Los valores de corte de calidad (el límite económico o el límite de pago), dominios de estimación, punto en el que se declaran las reservas de carbón, deben estar claramente establecidos, sin ambigüedades y fácilmente entendibles. Los procedimientos utilizados para establecer los valores de corte deben estar bien documentados, fácilmente disponibles para su revisión y claramente establecidos en las declaraciones de divulgación (Modificado CIM, 2019).

6.2 Proceso de estimación

El proceso de estimación de reservas debe partir desde el modelo geológico, el cual representa la cantidad y calidad del carbón insitu. Con el análisis previo de los factores modificadores se pueden obtener parámetros cuantitativos, para ser aplicados en la construcción de modelos que reflejen el efecto que tendrá el proceso minero sobre la calidad y la cantidad de carbón.

Es importante recordar que por definición de los estándares CRIRSCO, al momento de declarar recursos minerales de carbón, las cantidades en cada una de sus categorías (Medidos, Indicados e Inferidos) obtenidos del modelo geológico estructural, deben reportarse junto con los resultados generados del modelo de calidad en su forma "In Situ".

Para la declaración de reservas minerales de carbón, las cantidades en cada una de sus categorías (Probadas y/o Probables) obtenidas del modelo estructural, deben reportarse junto con los resultados obtenidos del modelo de calidad.

Si bien el objetivo de la guía no es definir metodologías específicas de aplicación, dado que es posible emplear diferentes procesos o metodologías de estimación de reservas de carbón; si pretende mostrar las buenas prácticas aplicadas en la industria y que han obtenido resultados positivos en sus proyectos, por esta razón se describe el Modelo ROM el cual ha sido aplicado por varias compañías con tradición en la explotación de carbón.

Modelo ROM (Run of Mine)

Una de las metodologías utilizadas habitualmente para la estimación de reservas recibe el nombre de modelo ROM de estructura y calidad (Run of Mine), que considera el efecto de la operación minera, específicamente en los factores geológico-mineros relacionados con pérdidas de carbón y dilución de roca del mineral. Al realizar la aplicación de un MODELO ROM, se obtienen los tonelajes y calidad de mineral en bocamina o en frente de explotación, los cuales pueden normalmente diferir del modelo in situ, incrementándose o disminuyendo volúmenes y asimismo afectando la calidad inicial determinada.

Si bien el proceso de construcción de los modelos ROM de estructura y calidad es habitualmente implementado por grandes compañías carboneras a partir de un volumen considerable de información, proyectos de mediana y pequeña envergadura que cuenten con información de exploración de superficie y del subsuelo pueden llegar a construir los modelos ROM complementando la información con supuestos geológico-mineros justificados.

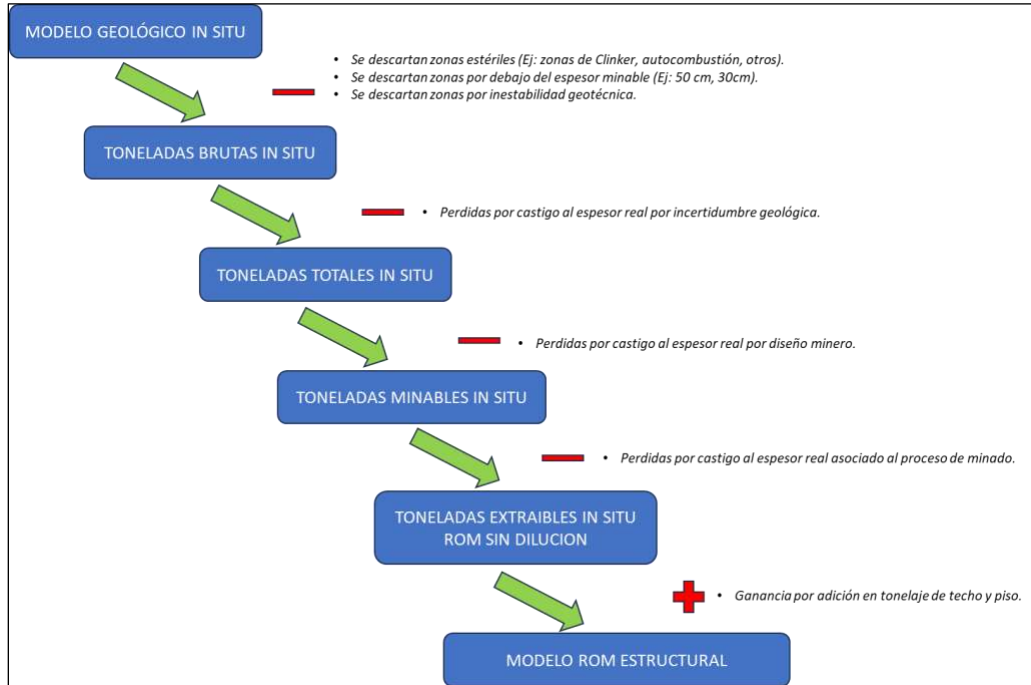
El modelo ROM se construye a partir de un modelo de estructura que considera las variaciones estructurales (disposición, espesor mínimo, presencia de intercalaciones), y un modelo de calidad (poder calorífico, contenido de cenizas, contenido de azufre, materia volátil, entre otros).

Modelo ROM – Estructura

El modelo geológico in situ es el punto de partida para crear un modelo ROM estructural. Partiendo de la premisa que se tienen modelados los pisos, techos y espesores de los mantos, ya sean construidos por métodos tradicionales o métodos computarizados, los anteriores serán sujeto de castigos o reducciones, a partir de las condiciones mínimas

que permiten su explotación, que aproximarán las cantidades estimadas a como realmente se obtendrán fuera de la mina. En la Figura 26 se ilustra de forma esquemática un ejemplo de cómo se puede llegar a un modelo "ROM ESTRUCTURAL" aplicando algunas consideraciones de orden técnico mineras:

Figura 26. Cálculo de modelo ROM – Estructural.



Fuente: Elaboración propia.

- **Modelo Geológico Insitu:** Modelo estructural (pisos, techos, espesores, etc) sin aplicar ningún tipo de consideración asociada a incertidumbres geológico-mineras. En esta etapa de modelamiento no se ha considerado ninguna pérdida o ganancia relacionada con el espesor.
- **Toneladas brutas in situ:** Es el modelo estructural resultante de aplicar descuentos al espesor por circunstancias o efectos intrínsecos del carbón que impiden incluirlos dentro de la estimación de recursos. Ejemplo: Cuando un manto o porción de este no cumple con el espesor mínimo minable o porque el manto o porción de este ha sido quemado (Clinker, autocombustión).
- **Toneladas totales in situ:** Es el modelo estructural que se genera al aplicar el efecto de la incertidumbre o complejidad geológica asociada a condiciones geológicas de los mantos, tales como adelgazamientos, presencia de paleocanales, pinchamientos, fallamientos, entre otros. Por lo general se considera como un castigo al espesor, el cual es aplicado mediante un factor de pérdida que varía según el bloque geológico definido.
- **Toneladas minables in situ:** Es el modelo estructural que se obtiene luego de aplicar el efecto de pérdidas mineras asociadas al diseño minero, ya se trate de labores a cielo abierto o subterráneas. En cielo abierto pueden considerarse pérdidas en el espesor por aspectos como construcción de corredores o rampas,

y en minería subterránea pueden considerarse: la elaboración galerías, túneles, accesos, etc. En general se podría considerar como un factor de castigo al espesor aplicado desde un software o con fórmulas matemáticas convencionales.

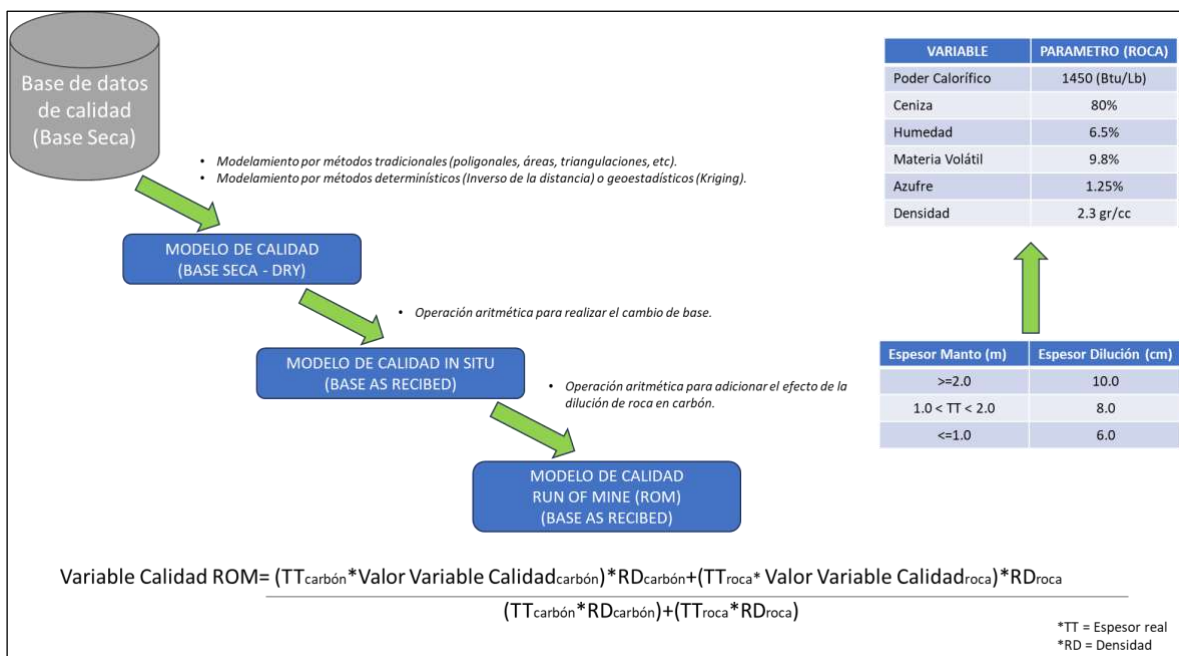
- **Toneladas extraíbles in situ (ROM sin Dilución):** Es el modelo estructural generado después de considerar el efecto propio de la preparación y el minado de cada manto en particular. En general se podría considerar como un factor de castigo al espesor aplicado desde un software o con fórmulas matemáticas convencionales.
- **Modelo ROM Estructural:** Es el modelo estructural que resulta de la aplicación del efecto de la "ganancia" en tonelaje, debido a la adición de un espesor determinado de roca de piso y techo en cada tajo, panel o unidad productora. Lo anterior significa un aumento de espesor respecto del modelo anterior. En general se podría considerar como un factor de castigo al espesor aplicado desde un software o con fórmulas matemáticas convencionales.

Modelo Rom – Calidad

Al igual que se consideran aspectos geológico-mineros aplicados específicamente al espesor de los mantos para la generación del modelo ROM estructural, se debe generar un modelo ROM de calidad para los mantos involucrados. Es de aclarar que la selección de las variables de calidad para crear el modelo ROM (Poder Calorífico, Material Volátil, FSI, Densidad, HGI, entre otras) deberán estar en función de la caracterización química y del destino comercial de los carbones a extraer. Es diferente la selección de ensayos químicos para carbones de uso térmico a carbones de uso metalúrgico.

A continuación, se ilustra de forma esquemática un ejemplo de como obtener un modelo ROM de calidad:

Figura 27. Cálculo de modelo ROM - Calidad.



Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso estructural, se debe contar con el modelo de calidad previamente construido que represente la variación espacial de las variables de calidad previamente seleccionadas. Para la selección del método de construcción del modelo de calidad debe considerarse la densidad de información (muestreo), capacidad técnica, tecnológica, económica del proyecto, entre otros aspectos.

En el ejemplo anterior se ilustra que, el modelo de calidad representado en base “Cómo se recibe (*As Recibed*)” se operó matemáticamente para adicionar el efecto de la dilución de roca en carbón con el objetivo de afectar la calidad estimada In Situ y proveer cual será la calidad del carbón fuera de mina. En la parte inferior de la Figura 27 se muestra la formulación para obtener la variable de calidad ROM, es de aclarar que, en la gráfica se ilustra un ejemplo de aplicación de modelo ROM de calidad con valores preestablecidos, cada proyecto deberá definir sus valores de calidad de roca, espesores de carbón y de roca.

Generalmente los tonelajes y calidad obtenidas después de la aplicación del modelo ROM, son las mismas definidas para la estimación de las reservas minerales.

Recomendaciones

- Documentar la metodología para estimar las reservas minerales para garantizar que no se ignore ningún factor significativo.
- Es posible que de acuerdo al interés de algunos inversionistas se requiera aplicar otros parámetros después del modelo ROM, en el caso del carbón, por ejemplo, se pueden reportar reservas después de pasar por un proceso de lavado, con el fin de obtener una calidad requerida para su comercialización, consecuentemente se disminuiría el tonelaje reportado, si es el caso es recomendable dejar claro cuál es el punto en que se realiza la declaración de las reservas, a este modelo, algunas empresas lo denominan modelo **SALES**.
- El modelo SALES representa las reservas ROM que han sido afectadas por el beneficio parcial del proceso de lavado de interfaces y de carbón de alta ceniza, más la disminución en calidad por la adición de agua. Las toneladas y la calidad se reportan en base a la humedad de ventas. Esta categoría es usada para reportar las reservas comercializables.
- Es recomendable indicar de manera clara, en que base se realiza la declaración de tonelaje y calidad de las reservas minerales.

6.3 Optimización de Reservas

En el proceso de optimización se busca la delimitación definitiva del área de interés en la cual se va a realizar la explotación del mineral. Normalmente se divide el depósito mineral en unidades pequeñas tales como bloques bidimensionales o tridimensionales, los cuales contienen la información geológica, cantidad y calidad del mineral en base ROM e información económica, resumida en precio de venta y costo de venta por unidad seleccionada. De forma resumida, cada una de estas unidades o bloques tiene un valor, positivo o negativo, dependiendo de la cantidad de mineral que tenga y sus costos asociados. Mediante algoritmos manuales o automáticos se incluyen o descartan bloques hasta encontrar, bajo algún criterio de convergencia, la sumatoria total de bloques que genere el mayor valor económico.

La estimación debe realizar una optimización a partir de los parámetros geotécnicos, mineros y económicos, para lograr obtener el diseño óptimo minero que representa la mejor condición de extraer económicamente el recurso existente, y esos volúmenes corresponden a las reservas minerales. En el caso de los proyectos subterráneos, puede ser más dispendioso la parametrización de estas variables, sin embargo, se pueden establecer, de forma manual, identificando zonas geológicamente inestables que podrían ser descartadas, realizando el descuento de los pilares de sostenimiento, machones de protección, entre otros y realizando un debido análisis de costo-beneficio (Costo de producción x ton / precio de venta x ton); de esta manera se pueden establecer los límites económicos del depósito, bajo las condiciones evaluadas.

La finalidad de este análisis es obtener el mejor diseño minero para extraer un tonelaje de carbón en unas condiciones técnicas y económicas favorables que corresponden a la máxima cantidad de reservas de carbón a extraer.

Un adecuado análisis de optimización del diseño minero, puede derivar en el establecimiento de la profundidad máxima de intervención o avance minero con condiciones económicas favorables.

Recomendaciones

- Describir la metodología empleada para realizar la optimización, incluyendo principales consideraciones, software empleado (si aplica).
- Describir en este proceso, si se tiene algún tipo de restricción que impida que una unidad o bloque pueda ser extraída, en general estas restricciones pueden ser físicas, ambientales, de infraestructura o de calidad del mineral. Se debe dar suficiente información sobre las restricciones tenidas en cuenta, así como la forma en que fueron consideradas.

6.4 Categorización

El ECRR® proporciona dos categorías para la definición de Reserva Mineral: Reserva Mineral Probada y Reserva Mineral Probable. El profesional líder debe garantizar que se cumplan los criterios mínimos antes de asignar estas categorías y debe ser consciente de todos los insumos utilizados para establecer la Reserva Mineral que afectan la confianza en las categorías.

Recomendaciones

- No deben categorizarse reservas minerales sobre recursos inferidos.
- La metodología para establecer la categorización debe estar bien documentada y entenderse fácilmente.
- La buena práctica incluye proporcionar una descripción narrativa de las razones cualitativas detrás de la selección de la categoría. Cuando sea práctico, se debe usar evidencia empírica (por ejemplo, datos de producción) para calibrar y justificar la categorización (CIM, 2019).
- Se recomienda incluir, no solamente el tonelaje de carbón, sino los principales parámetros de calidad que fueron considerados para estimar y categorizar las

- reservas, como es poder calorífico, humedad, contenido de azufre, contenido de cenizas, entre otros.
- Se recomienda a los profesionales encargados de la estimación de reservas minerales, trabajar conjuntamente con los geólogos en la definición y ajuste de los parámetros de clasificación de los recursos minerales a los límites prácticos de los métodos de minería potenciales, por ejemplo, haciendo coincidir los límites de las categorías de los recursos minerales con niveles de minería, bordes de tajo o límites de explotación.

6.5 Validación

Es responsabilidad del profesional líder garantizar la verificación de todos los aportes a la estimación de la Reserva Mineral. Como la estimación de la Reserva Mineral se basa en muchas entradas de datos, incluido el modelo de recursos minerales, es importante que las entradas y la consistencia de las entradas sean validadas como parte del proceso de estimación de la reserva mineral. La identificación de los aspectos críticos de la estimación de la reserva mineral es una parte importante de la verificación de entradas (CIM, 2019).

6.6 Evaluación de riesgos del proyecto

Si bien la clasificación de la reserva mineral permite al profesional líder identificar el riesgo técnico en términos generales, la mejor práctica incluye el establecimiento de una metodología para identificar y clasificar los riesgos asociados con cada entrada de la estimación de la reserva mineral. Esto ayudará a establecer la categorización de la reserva mineral, proporcionando así una comprensión del riesgo técnico asociado con la estimación de la reserva mineral. Esta metodología, clasificación y análisis deben estar bien documentados (CIM, 2019).

6.7 Revisiones hechas por pares

Una buena práctica incluye una revisión interna por pares, de la estimación de la reserva mineral que tenga en cuenta insumos, metodología, supuestos subyacentes, los resultados de la estimación en sí misma y una prueba de viabilidad económica (CIM, 2019).

6.8 Documentación

La mejor práctica incluye la documentación apropiada de los insumos, metodología, riesgos y supuestos utilizados en estas valoraciones, para que estén disponibles para futuras estimaciones de la reserva mineral.

La información debe ser fácilmente recuperable, fácilmente disponible y catalogada de manera que permita una evaluación del historial de las evaluaciones realizadas y registre la ubicación de toda la información, informes relevantes, etc. Es importante asegurarse de que la información utilizada en una evaluación y la comprensión obtenida de un depósito mineral esté disponible para trabajos futuros. Se debe tener cuidado en el almacenamiento y considerar la evolución continua de los formatos de archivos de computador y el impacto que esto puede tener en el trabajo anterior (CIM, 2019).

6.9 Declaraciones de Reservas de carbón

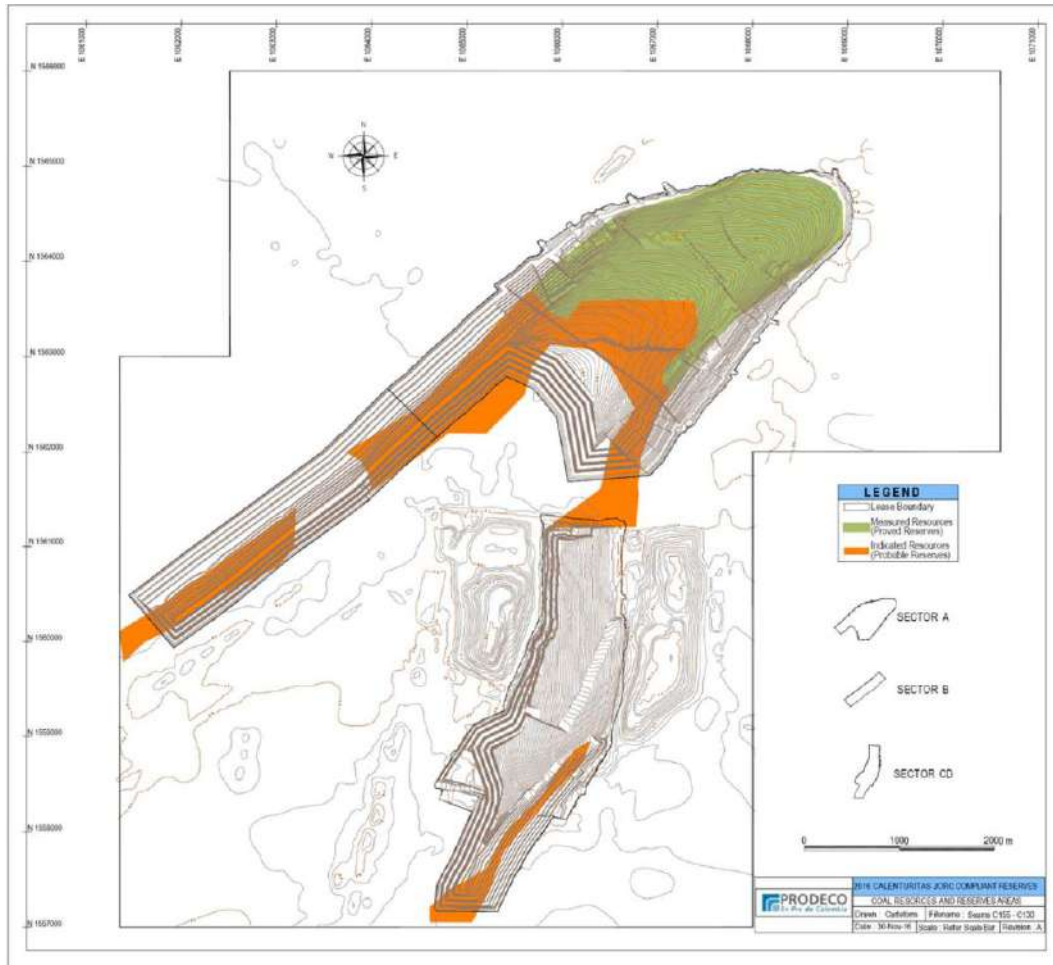
Las declaraciones de las Reservas de carbón deben ser inequívocas y suficientemente detalladas para que una persona con conocimientos comprenda la importancia de cada parámetro tenido en cuenta. Debería haber un vínculo obvio entre la estimación de la reserva mineral y la estimación del recurso mineral. La buena práctica incluye documentación de esos vínculos (por ejemplo, dilución y recuperación minera) que se usaron para preparar la estimación de la reserva mineral (CIM, 2019). En la Tabla 5 es mostrado un ejemplo de declaración de reservas minerales para un proyecto de carbón. En la Figura 28 es mostrado un ejemplo con la distribución de reservas en un proyecto de carbón.

Tabla 5. Ejemplo de declaración de reservas minerales en proyecto de carbón. Fecha efectiva Diciembre 29 de 2022, base as received @ 12%.

Manto	Probadas				Probables			
	Toneladas (t)	Densidad (kg/m ³)	Ceniza (%)	PC (BTU/lb)	Toneladas (Mt)	Densidad (kg/m ³)	Ceniza (%)	PC (BTU/lb)
Depósito	1 200 000	1.32	7.40	10 675	840 000	1.33	8.70	10 350
Cenizosa	800 000	1.40	15.66	9 403	960 000	1.39	16.20	9 420
Vidriosa	450 000	1.32	7.30	10 680	630 000	1.32	6.30	10 706
Grande	2 400 000	1.30	7.80	10 440	1 440 000	1.31	6.90	9 985
La Quinta	900 000	1.35	11.60	10 685	1 170 000	1.34	10.80	10 062

Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Ejemplo de declaración de reservas de carbón.



Fuente: PRODECO, 2016.

Recomendaciones

- Las estimaciones de Reservas de Carbón no son cálculos precisos, el reporte de tonelaje y calidad deben reflejar la incertidumbre relativa de la estimación, redondeando a cifras significativas apropiadas. Para enfatizar la naturaleza imprecisa de una reserva de carbón, el resultado final siempre debe ser referido como una estimación y no como un cálculo.
- Declarar las reservas de carbón diferenciando carbón metalúrgico de carbón térmico, incluyendo los principales parámetros de calidad que fueron considerados para la estimación.
- Indicar de manera explícita la base sobre la que se realiza la estimación de reservas de carbón.
- Apoyar el reporte de reservas de carbón con gráficas, mapas y perfiles que den claridad al lector respecto de la ubicación de las cantidades reportadas.

6.10 Discusión de la confianza relativa

En la evaluación de la viabilidad de un proyecto minero, ya sea para decidir la inversión y financiamiento de este, o discutir el plan de operación minera y el diseño de mina, un factor determinante radica en: evaluar y analizar los valores de los resultados de la

precisión y la incertidumbre de las calidades encontradas para cada bloque, y determinar, con base en la experiencia, qué grado de confianza arrojan las estimaciones realizadas (Bonilla *et al.*, 2021).

Al momento de analizar y discutir la confianza relativa que reflejan los datos recolectados en la exploración, el modelo geológico, y la categorización de los recursos y reservas, se recomienda tener en cuenta que el nivel de confianza de las estimaciones, se basa en el grado del conocimiento geológico del depósito, en los muestreos realizados y los resultados de los análisis de laboratorio, en los controles de calidad implementados en los diferentes procesos, en el tratamiento de los datos y en la precisión del método de estimación aplicado.

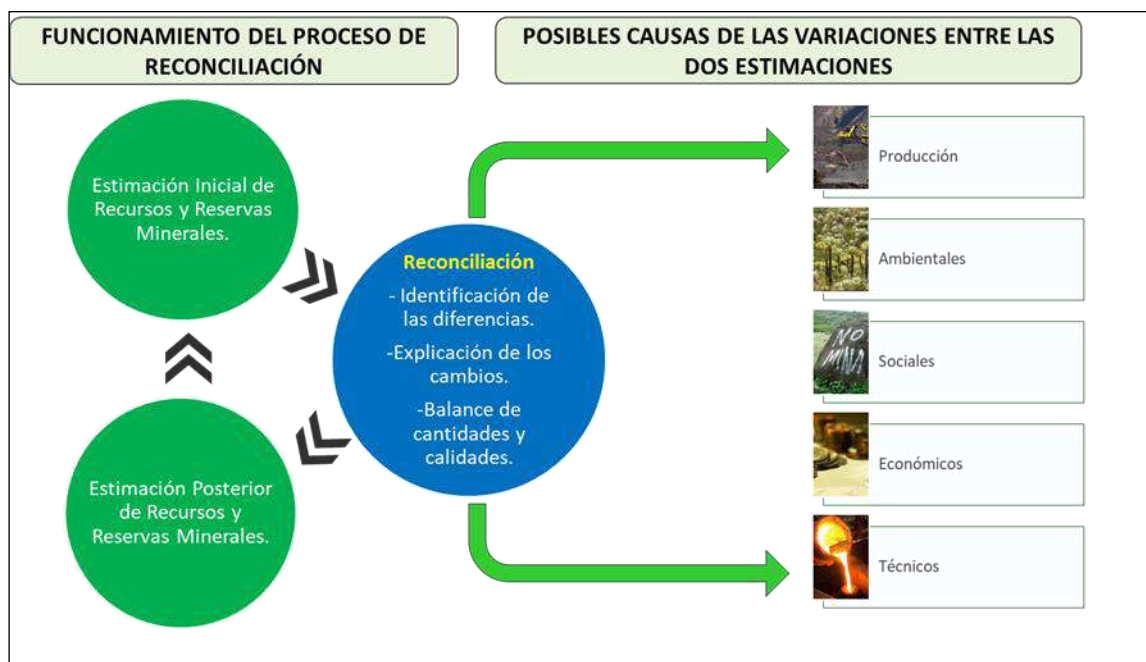
6.11 Reconciliación

La estimación de recursos y reservas minerales requiere del análisis de las consideraciones empleadas para convertir recursos en reservas y los factores modificadores necesarios para determinar la viabilidad del proyecto minero, dichos factores pueden obedecer a condiciones de la compañía, pero frecuentemente éstos se encuentran fuera del control del proyecto. Es así como cambios en los precios del mercado global, nuevas regulaciones en materia ambiental, desarrollo de proyectos de infraestructura nacional, entre muchas otras situaciones, pueden contribuir a los cambios en la estimación de recursos y reservas minerales en un periodo determinado (ANM, 2023).

Por las razones anteriores y muchas más, es claro que las estimaciones de recursos y reservas son dinámicas en el tiempo, por lo tanto, es necesario contar con actualizaciones periódicas que permitan cualificar los cambios en las estimaciones e identificar las causas de dichos cambios.

La reconciliación permite tener una trazabilidad de las causas de los cambios entre diferentes períodos, que pueden estar asociados a cambios normativos en materia ambiental o minera, obtención de permisos o licencias (ambientales y/o servidumbres).

Figura 29. Esquema del proceso de Reconciliación.



Fuente: ANM, 2023

Recomendaciones

- Para proyectos en ejecución: registrar información periódicamente relacionada a los avances mineros, para compararla con las cantidades estimadas en los modelos para el mismo período, de manera que se evalúe la precisión de las estimaciones y se derive en la optimización de procesos de explotación y/o beneficio.
- Llevar planillas, formatos o bitácoras para el control y la cuantificación de los volúmenes de producción y registro de la recuperación.
- En planes a corto plazo, contar con la reconciliación periódicas, permite ajustar las proyecciones de los trabajos mineros.

7 REPORTES

En la preparación de documentos técnicos para las entidades gubernamentales, debe incluirse toda la información necesaria de manera que el lector entienda el objetivo, alcance, estructura y contenido del documento; así como el contexto técnico, legal, ambiental, social y económico en el que se va a desarrollar el proyecto minero.

Antes de redactar un reporte o documento es necesario comprender a quiénes está dirigido, cuál es la información más relevante que buscará el lector y cuál es la mejor manera de estructurarlo para que se garantice su total comprensión. El profesional líder es responsable de estructurar el contenido del documento y que este sea acorde con los términos de referencia, guías o requerimientos de cada entidad a la cual se dirigirá el informe.

Una buena práctica consiste en definir claramente los siguientes parámetros, antes de la elaboración de cualquier documento:

- **Público objetivo:** definir claramente a quién va dirigido el documento facilita la tarea de precisar su contenido, el lenguaje requerido y la posible longitud aceptable.
- **Estructura del documento:** la estructura del documento debe ser acorde con el público objetivo al que está dirigido. Es recomendable revisar los manuales, guías metodológicas, estándares o normas disponibles para seleccionar la estructura más conveniente al documento, garantizando que lo consignado en el reporte es comprensible, completo y ordenado.
- **Fuentes de información:** toda información adquirida de fuentes secundarias debe ser evaluada para decidir si ésta aporta o no al documento. Cuando se usa información de fuentes secundarias, ésta debe citarse dentro del texto y todos los documentos citados deben aparecer en la bibliografía del documento.

7.1 Objetivo del reporte

El objetivo del reporte debe establecerse claramente, ya que éste es la base para el desarrollo del contenido. El objetivo del reporte permite al lector hacer un balance respecto a si éste fue efectivamente alcanzado.

7.2 Descripción del proyecto

La descripción del proyecto es la presentación inicial de los resultados de la recolección de información y de exploración o estimación de recursos y reservas y permite a los usuarios del reporte obtener información preliminar para identificar con claridad la situación legal y técnica del título minero.

Entre los datos más relevantes debe incluirse la información del título minero, propietario, etapa actual del proyecto, características del depósito cuando éste ha sido caracterizado o las proyecciones del mismo cuando el reporte comprenda sólo fases tempranas de exploración, características del material, unidad geológica; un resumen de las labores de cartografía y muestreo que se han llevado a cabo, tamaño del depósito, estimación de recursos del proyecto, restricciones o avances de carácter ambiental,

social, político, jurídico. Las conclusiones de la integración de toda la información adquirida deben tener énfasis en el potencial o viabilidad económica del proyecto, las recomendaciones a que haya lugar y una síntesis de la siguiente etapa a ejecutar.

El reporte debe tener claramente definido su alcance y debe brindar la ubicación, extensión y características del depósito de carbón, además de incluir las características técnicas de la infraestructura requerida para la puesta en marcha del proyecto, las formas de extracción y la estructura organizacional que debe tener la operación minera.

La información que pueda ubicarse geográficamente debe presentarse en planos o mapas, con el fin de contextualizar al usuario del documento respecto a la ubicación de los elementos más relevantes.

En síntesis, la descripción permite definir los aspectos más importantes del proyecto entre los que se cuentan: antecedentes, infraestructura existente, resultados de exploración, fases y actividades del proyecto, aspectos geológicos, estructura del proyecto minero, recursos minerales, factores modificadores y reservas minerales.

Cuando se trata de reportes de proyectos en producción, se recomienda incluir datos del método de explotación, tiempo durante el cual ha estado activa la operación, capacidad instalada, datos de producción, y en caso de que haya exploración adicional, también es conveniente hacer mención de la misma.

7.3 Localización

La localización del proyecto es fundamental para la comprensión de la información que hace parte del reporte; ésta debe ser suficientemente clara para ubicar espacialmente el título y para identificar la infraestructura disponible, tales como vías de acceso, centros poblados cercanos y con condiciones especiales (resguardos indígenas, comunidades campesinas, zonas de restricciones ambientales, entre otros), pues los aspectos geográficos y administrativos repercuten en las necesidades logísticas y técnicas del proyecto minero.

Es conveniente presentar la localización del proyecto de manera tanto escrita como gráfica. Se recomienda ubicar al lector primero desde lo regional (país, departamento) hasta lo local (municipio, vereda). Las descripciones textuales deben ser suficientemente claras para garantizar que el usuario pueda ubicar exactamente el lugar donde se localiza el proyecto y los diferentes medios para acceder al mismo (terrestre, aéreo, fluvial).

La información gráfica puede consistir de figuras y mapas que contengan datos suficientes para entender la ubicación del proyecto. Es posible generar ayudas gráficas de acuerdo con el diseño del documento, éstas deben ser legibles, organizadas y brindar la información que pretenden transmitir.

Recomendaciones

- Elaborar los mapas y figuras de localización con coordenadas según convenciones actuales y escalas convenientes. Se sugiere el uso de escalas convencionales para facilitar el entendimiento de mapas y su uso en papel.
- Verificar el amarre a la Red Geodésica Nacional (IGAC) exigido por las entidades gubernamentales y utilizarlo en los productos gráficos internos de la compañía, si se considera conveniente.
- Garantizar que todos los elementos cartográficos necesarios para indicar correctamente la localización, queden incluidos en mapas y figuras.

- Para el caso de reportes públicos, el profesional que firma el reporte, debe hacer una declaración respecto a la confianza relativa en las estimaciones. En dicha declaración se recomienda incluir las limitantes y alcances de la estimación y los factores modificadores adicionales que afectan el proyecto.

7.4 Salidas gráficas

Los mapas, diagramas, columnas estratigráficas, figuras, modelos 2D o 3D y en general, las representaciones gráficas, son un material de soporte imprescindible en todo proyecto minero, no solo como parte de los reportes y documentos, sino como material guía para toma de decisiones en cualquier etapa o actividad de los procesos de exploración y explotación.

Cuando se trata de representar el terreno en una proyección plana, los detalles de escala, sistema de proyección, datos que se incluirán en el plano, colores, textos, convenciones, entre otros, deben ser atendidos con la mayor diligencia para garantizar su calidad y el cumplimiento de su propósito.

La información gráfica puede dividirse en dos categorías: interna, cuando se usa para documentos y procesos al interior de la compañía, o externa, cuando dicha información será compartida con usuarios externos a la compañía (posibles inversionistas, autoridades estatales, academia, entre otros). Ya sean internas o externas, lo más recomendable es unificar los parámetros para las salidas gráficas, de manera tal que no sea necesario generar productos específicos para un caso u otro.

Como ejemplo, si los requisitos técnicos de representaciones gráficas de alguna autoridad estatal, se consideran adecuados para los reportes y procesos internos, lo mejor es utilizar esos requisitos técnicos también para las salidas gráficas internas. Si es necesario establecer diferencias entre productos para uso interno o externo, la recomendación es que éstos se generen de manera organizada para evitar confusiones en la información o salidas gráficas inadecuadas.

Para el caso de los mapas, se recomienda generar plantillas estandarizadas que garanticen la inclusión de los elementos necesarios para que el lector pueda comprender la información. Cuando los mapas se elaboran para las entidades gubernamentales, es recomendable consultar la normatividad vigente de cada entidad respecto al tema, para garantizar que se cumplen todos los requerimientos exigidos.

Las figuras que se generan para documentos tienen un menor tamaño que un mapa; por lo tanto, se deben conservar los elementos esenciales a la escala adecuada para garantizar su comprensión. La resolución de las imágenes es clave para su entendimiento, frecuentemente se utilizan capturas de pantalla de documentos externos que carecen de la calidad que debe contener cualquier figura en un reporte, lo ideal es garantizar la calidad de la imagen, bien sea digitalizándola o usando solo las que son legibles y claras. Cuando las figuras se copian o se adaptan de fuentes externas, dicha fuente debe referenciarse en el texto descriptivo, de tal manera que el lector pueda conocer el origen de la información.

Recomendaciones

- Generar plantillas para la presentación de mapas y figuras y revisarlas periódicamente para verificar su vigencia.

- Garantizar que los mapas tengan todos los datos básicos para su entendimiento y que dichos datos sean presentados ordenadamente en el mapa.
- Consultar periódicamente con las autoridades estatales la información gráfica que debe entregarse y ajustar los productos de acuerdo con los requisitos de dichas autoridades. Para el caso de la ANM, actualmente se cuenta con el Modelo de Datos Geográfico para entrega de la información compilada en sistemas de información geográfica.
- Revisar la resolución y la calidad de las imágenes que han de ser incluidas en los reportes y determinar estándares de presentación.

Más información

- Metodología para Presentación de Estudios Ambientales. Capítulo 4, versión 2018.
- Resolución 40600 del 27 de mayo de 2015. Agencia Nacional de Minería 2015.
- Estándares de cartografía geológica digital para planchas a escala 1:100.000 y mapas departamentales versión 2. Servicio Geológico Colombiano, 2012
- FGDC Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization

REFERENCIAS

- Abzalov, M., 2011, Sampling Errors and Control of Assay Data Quality in Exploration and Mining Geology: in Applications and Experiences of Quality Control, Prof. Ognyan Ivanov (Ed.).
- Arisoy, Ahmet; & Akgün, Fehmi (1994). Modelling of spontaneous combustion of coal with moisture content included. Fuel. Volumen 73, Tomo 2. Página 281 – 286. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(94\)90126-0](https://doi.org/10.1016/0016-2361(94)90126-0).
- Bustamante O., P. E., García M., R. E., Maya S., O., Rodríguez L., J. F., & Aguilar L., T. (2021). Minería de Carbón en Colombia. Transformando el futuro de la industria. Ministerio de Minas y Energía, 1–51. https://www.minenergia.gov.co/static/mineriaco/src/document/documento_carbon.pdf
- Clark, I. (1979). *Practical Geostatistics*. London, Applied Science Publishers
- CIM, 2018, *Exploration Best Practices Guidelines: Documento disponible en el sitio web del CIM en <https://mrmr.cim.org/media/1080/cim-mineral-exploration-best-practice-guidelines-november-23-2018.pdf>, 75 p.*
- CIM, 2019. *CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines: Documento disponible en el sitio web del CIM en <https://mrmr.cim.org/media/1146/cim-mrmr-bp-guidelines-2019-may2022.pdf>,*
- Canada, G. S. of. (n.d.). *A Standardized Coal Resource/Reserve Reporting System for Canada. Paper 88-21.*
- ECOCARBON. (1995). *Normas Generales Sobre Muestreo Muestreo y Análisis de Carbones*. Bogotá D.C.
- CCRR® (2018). *Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales -ECRR®. Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales -CCRR®.*
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2013). *Buenas prácticas en la FAO: Sistematización de experiencias para el aprendizaje continuo*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/ap784s/ap784s.pdf>
- Guidelines Review Committee. (2014). *Australian Guidelines for the Estimation and Classification of Coal Resources*. 47.
- Gonzalez de Vallejo, L; Ferrer, M; Ortuño, L; Oteo, C. (2004): *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación. Madrid
- Hatherly, P. (2013). *Overview on the application of geophysics in coal mining*. *International Journal of Coal Geology*, Volumen 114. DOI: 10.1016/j.coal.2013.02.006
- Long, S.D., 1998, *Practical Quality Control Procedures in Mineral Inventory Estimation: Exploration Mining Geology, Vol. 7, Nos 1 and 2, pp. 117-127.*

- Minenergía, UPME (2020). *Plan Energético Nacional 2020-2050. Plan Energético Nacional 2020-2050*, 34.
https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf
- Thomas, L. (2020). *Coal geology*. In John Wiley & Sons Ltd. (Ed.), *Choice Reviews Online (Third edit)*. <https://doi.org/10.5860/choice.50-6779>
- TRANCORA S.A.S , 2020. *Estimación de Recursos y Reservas Mina El Boquerón. Reporte Interno*.
- Pryor, E.J. (1965). *Sampling and Controls*. In: *Mineral Processing*. Springer
- Osborne, D. G., & Gupta, S. K. (2013). *Industrial uses of coal*. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production (Vol. 1)*. Woodhead Publishing Limited.
<https://doi.org/10.1533/9780857097309.1.3>
- OMINCA S.A.S – Operadora Minera de Caparrapí S.A.S., 2020. *Estimación de Recursos y Reservas Proyecto de Carbón San Carlos. Reporte Interno*.
- Owen, R. H. ; T. (2015). *Project Management for Mining*. www.smenet.org
- PRODECO, 2016. *Calenturitas Coal Mine JORC Reserve Statement*.
- Roden, S., Smith, T., 2014, *Sampling and Analysis Protocols and Their Role in Mineral Exploration and New Resource Development: in Mineral Resource and Ore Reserve Estimation, The AusIMM Guide to Good Practice, Second Edition, Monography 30, pp. 53-60*.
- Simón, A. (2013). *Taller de Aseguramiento y Control de la Calidad en la Exploración Geológica*. Medellín: MEC, International Ingeniería y Construcción Ltda.
- Stephenson, P.R., Allman, A., Carville, D.P., Stoker, P.T., Mokos, P., Tyrrell, J. & Burrows, T. (2006). *Mineral Resource Classification – It’s Time to Shoot the ‘Spotted Dog’!*. In Dominy, S. (Ed.). *Proceedings Sixth International Mining Geology Conference, Darwin, Australia, August 2006*, pp. 91-95. Carlton, Victoria: Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Valencia Suaza, E. A., Vélez Giraldo, W. F., & Dávila Bolívar, C. (2022). *Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas de Depósitos de Placer*. In *Gastronomía ecuatoriana y turismo local*.
- Valentine, S and Norbury, D. (2011). *Measurement of total core recovery; dealing with core loss and gain*. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Volumen 44, pag. 397–403. Geological Society of London. DOI 10.1144/1470-9236/10-009



Agencia
Nacional de Minería

