

Coordinación y optimización de procesos mineros

MUESTREO DE CARBÓN

Una guía de análisis para el cálculo de la cantidad de muestras a recolectar en zonas de explotación

Carlos Alfredo Marimón Pérez
Yasuanna Katyuska Britto López

AREANDINA

Fundación Universitaria del Área Andina

Coordinación y optimización
de procesos mineros

Muestreo de Carbón

Una guía de análisis para el cálculo
de la cantidad de muestras a
recolectar en zonas de explotación

Carlos Alfredo Marimón Pérez
Yasuanna Katyuska Britto López

AREANDINA

Fundación Universitaria del Área Andina

Marimón Pérez, Carlos Alfredo

Muestreo de carbón : una guía de análisis para el cálculo de la cantidad de muestras a recolectar en zonas de explotación / autor Carlos Alfredo Marimón Pérez, Yasuanna Katyuska Britto López. -- Bogotá: Fundación Universitaria del Área Andina, 2023

ISBN (digital): 978-958-5139-93-0

Incluye índice.

1. Carbón - Carbonización. - 2. Minas de carbón - 3. Minas de carbón - Aspectos ambientales. - 4. Recolección de metadatos

Catalogación en la publicación Biblioteca Fundación Universitaria del Área Andina (Bogotá)

622 scdd22

Muestreo de Carbón. Una guía de análisis para el cálculo de la cantidad de muestras a recolectar en zonas de explotación

© Fundación Universitaria del Área Andina. Bogotá, diciembre de 2023

© Carlos Alfredo Marimón Pérez, Yasuanna Katyuska Britto López

ISBN (digital): 978-958-5139-93-0

Fundación Universitaria Área Andina

Calle 71 No. 13-21, Bogotá, Colombia

Correo electrónico: publicaciones@areandina.edu.co

PROCESO EDITORIAL

Dirección editorial: Omar Eduardo Peña Reina

Coordinación editorial: Camilo Andrés Cuéllar Mejía

Diseño de carátula: Proceditor Ltda.

Diagramación: Proceditor Ltda.

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra y su tratamiento o transmisión por cualquier medio o método sin autorización escrita de la Fundación Universitaria del Área Andina y sus autores.

BANDERA INSTITUCIONAL

Pablo Oliveros Marmolejo †
Gustavo Eastman Vélez
Miembros Fundadores

Carlos Patricio Eastman Barona
Presidente de la Asamblea General y Consejo Superior

José Leonardo Valencia Molano
Rector Nacional y Representante Legal

Martha Patricia Castellanos Saavedra
Vicerrectora Nacional Académica

Karol Milena Pérez Calderón
Vicerrectora Nacional de Crecimiento y Desarrollo

Erika Milena Ramírez Sánchez
Vicerrectora Nacional Administrativa y Financiera

Mauricio Andrés Hernández Anzola
Vicerrector Nacional de Experiencia y Felicidad

Felipe Baena Botero
Rector - Seccional Pereira

Gelca Patricia Gutiérrez Barranco
Rectora - Sede Valledupar

María Angélica Pacheco Chica
Secretaria General

Omar Eduardo Peña Reina
Director Nacional de Investigaciones

Carmen Victoria Meza Carrillo
Decana Facultad de Ingenierías y Ciencias Básicas

Ober Adiel Romero Arias
Director programa de Ingeniería de Minas - Sede Valledupar

Camilo Andrés Cuéllar Mejía
Subdirector Nacional de Publicaciones

Tabla de contenido

Glosario	11
Introducción.....	13
Metodología.....	15

1. Cálculo de la cantidad de muestras a recolectar en mantos de carbón.

Mejoramiento al proceso de muestreo	17
1.1 Estructura matemática	19
1.1.1 Peso de subtotaes (P)	21
1.1.2 Cantidad de subtotaes (SUBt)	21
1.1.3 Suministro para muestrear en cada ciclo (SMC)	22
1.1.4 Ciclos de muestreo (CMTTP)	22
1.1.5 Muestras para recolectar en cada ciclo (MRVFM).....	23
1.1.6 Muestras según proyectado y transportado (MSP y MST).....	23

2. Variabilidad en la frecuencia

del muestreo. Comportamiento	31
2.1 Modificación en la variación de la frecuencia del muestreo (VFM)	33
2.2 Afectación por lluvia	38

3. Relaciones de implementación. Definición estratégica.....

3.1 Eficiencia de recolección	47
-------------------------------------	----

Índice de tablas

Tabla 1. Distribución, toneladas de carbón por manto - Ejemplo A	24
Tabla 2. Valor guía - Variabilidad en la frecuencia del muestreo (VFM)	24
Tabla 3. Plan general para recolección de muestras de carbón - Ejemplo A.....	27
Tabla 4. Distribución porcentual, visitas al PIT para muestrear	28
Tabla 5. Muestras tentativas, variación VFM	34
Tabla 6. Plan general, recolección de muestras por manto - Ejemplo D.....	48
Tabla 7. Eficiencias de recolección por manto - Ejemplo D.....	49
Tabla 8. Distribución primer año, toneladas de carbón por mes - Ejemplo E	51
Tabla 9. Plan específico para recolección de muestras - Mes 1.....	52
Tabla 10. Plan específico para recolección de muestras - Mes 2.....	53
Tabla 11. Plan específico para recolección de muestras - Mes 3.....	54
Tabla 12. Plan específico para recolección de muestras - Mes 4.....	55
Tabla 13. Plan específico para recolección de muestras - Mes 5.....	56
Tabla 14. Plan específico para recolección de muestras - Mes 6.....	57
Tabla 15. Plan específico para recolección de muestras - Mes 7.....	58
Tabla 16. Plan específico para recolección de muestras - Mes 8.....	59
Tabla 17. Plan específico para recolección de muestras - Mes 9.....	60
Tabla 18. Plan específico para recolección de muestras - Mes 10.....	61
Tabla 19. Plan específico para recolección de muestras - Mes 11.....	62
Tabla 20. Plan específico para recolección de muestras - Mes 12.....	63

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo general de coordinación.....	20
Figura 2. Distribución porcentual TTP (ton) por manto.....	26
Figura 3. MST – Objetivo por manto, MSP	26
Figura 4. Relación TTP (ton) - %SMC.....	29
Figura 5. Distribución porcentual – SMC	29
Figura 6. Variación en cantidad de muestras por ciclo	33
Figura 7. Toneladas cargadas por mes	41
Figura 8. Definición estratégica.....	47
Figura 9. MR – Objetivo por mes, MSP	64
Figura 10. Eficiencia de recolección por mes	64
Figura 11. MR – Periodo anual	65
Figura 12. Ciclo específico de coordinación	66
Figura 13. Flujograma general para planeación estratégica	67
Figura 14. Flujograma específico para cálculo de muestras	68

Índice de fórmulas

Fórmula 1. P (Peso de subtotales) 21

$$P \left(\frac{\text{kg}}{\text{SUBt}} \right) = 0,06 \times D(\text{mm})$$

Fórmula 2. SUBt (Cantidad de subtotales)..... 21

$$\text{SUBt} = \frac{\text{CA}(\text{kg})}{P \left(\frac{\text{kg}}{\text{SUBt}} \right)}$$

Fórmula 3. SMC (Suministro para muestrear en cada ciclo) 22

$$\text{SMC} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ciclo}} \right) = \frac{64 \times \sqrt{\text{TTP}(\text{ton})}}{\text{ciclo}}$$

Fórmula 4. CMTTP (Ciclos de muestreo) 22

$$\text{CM}_{\text{TTP}} (\text{ciclo}) = \frac{\text{TTP}(\text{ton})}{\text{SMC} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ciclo}} \right)}$$

Fórmula 5. MRVFM (Muestras para recolectar en cada ciclo)..... 23

$$\text{MR}_{\text{VFM}} \left(\frac{\text{muestras}}{\text{ciclo}} \right) = \frac{\text{SMC} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ciclo}} \right)}{\text{VFM} \left(\frac{\text{ton}}{\text{muestras}} \right)}$$

Fórmula 6 y 7. MSP y MST (Muestras según proyectado y Transportado)..... 23

$$\text{MSP} = \text{CM}_{\text{TTP}} (\text{ciclo}) \times \text{MR}_{\text{VFM}} \left(\frac{\text{muestras}}{\text{ciclo}} \right) \qquad \text{MST} (\text{muestras}) = \frac{\text{TT}(\text{ton}) \times \text{MSP} (\text{muestras})}{\text{TTP}(\text{ton})}$$

Fórmula 8. +/- TON variación (Afectación por lluvia) 38

$$\pm (\text{TON}_{\text{variación}}) = \frac{(\text{TON}_c \times D_e) - \left(\text{TON}_c \times \left(\frac{H_{11} - P_{11}}{HO_d} \right) \right)}{DT_m}$$

Glosario

A continuación se presentan algunas definiciones importantes para comprender de mejor manera el desarrollo y contenido de este libro. Es necesario tener en cuenta que aquellas definiciones sin citar han sido propuestas por los autores; sabiendo lo anterior, se presenta el siguiente glosario:

Carbón: Es un recurso mineral que se extrae de la tierra para su uso como fuente de energía, calefacción, o para la producción de acero e industrias relacionadas; formado a partir de la acumulación y descomposición de materia vegetal en condiciones geológicas específicas, generando la aparición de capas o mantos, los cuales pueden ser extraídos mediante minería subterránea o a cielo abierto (Mejía, 2014).

Muestreo de carbón: Es un proceso que implica tomar muestras representativas de carbón de una fuente particular, de manera que reflejen con precisión las características esenciales y el comportamiento general de la unidad destinada para muestreo (Fuentes et al., 2018).

PIT: Según Martin & Stacey (2017), se refiere a una excavación a cielo abierto en la que se extraen minerales, en este caso carbón. Involucra la eliminación de grandes cantidades de tierra y roca para acceder al mineral de interés.

Evento no controlable: En minería, un evento no controlable puede ser la lluvia, debido a que las condiciones meteorológicas son impredecibles y pueden variar significativamente a lo largo del tiempo y en diferentes ubicaciones del área de operaciones.

Zonas de explotación: Área específica en la cual el manto de carbón se encuentra expuesto, limpio y preparado para ser arrancado y cargado, para posteriormente ser transportado hasta los centros de acopio. Por lo general, se organizan de manera estratégica en función de la geología de la zona y disposición de los mantos de carbón (AJS Sam, 2020).

Variación de metas de producción por clima: Se refiere a la necesidad de ajustar los objetivos de producción debido a condiciones climáticas cambiantes (en este caso, la lluvia), ya que pueden afectar significativamente las operaciones mineras y por lo tanto, también la capacidad de cumplir las metas de producción establecidas previamente por planeación y producción.

Patrón lógico: Es la secuencia de eventos que sigue la estructura matemática planteada en este documento, es decir, un orden razonable de elementos que tienen sentido; de esta manera, finalmente ayuda a organizar la información para establecer relaciones razonables entre conceptos y eventos, dentro de cada uno de los pasos propuestos.

Introducción

En minería, el principal objetivo es la extracción de un material de interés mediante herramientas técnicas, racionales y eficientes, siempre y cuando dicha actividad represente ganancias bajo la relación del costo y el beneficio. Así, los materiales que son explotados presentan comportamientos en la mayoría de los casos diferentes, y más cuando de carbón se está hablando (Rincón Mesa & Monroy, 2012).

Existe una necesidad relacionada directamente con la toma de muestras de carbón en zonas de explotación, teniendo en cuenta que en algunas ocasiones no existe claridad acerca del número que puede definir la cantidad de muestras a ser recolectadas de acuerdo con las toneladas proyectadas para extracción en cada mes, como también las transportadas día a día desde los mantos hasta los centros de acopio.

Se definirá de manera detallada una forma de cálculo para encontrar el número que define la cantidad necesaria de muestras de carbón a ser recolectadas en zonas de cargue, teniendo en cuenta el objetivo más importante de realizar muestreo, cuya determinación es la de obtener muestras representativas, comprendiendo que la distribución y proporción de características físicas y químicas son equivalentes a toda la unidad de explotación tenida en cuenta para la recolección (Ecoar-bón, 1995).

Es importante mencionar que cada uno de los valores manejados en este documento y escenarios presentados son reales, es decir, son experiencias de la vida profesional de los autores, por lo que el método ha sido puesto en práctica en diversos escenarios con resultados exitosos. Por tal motivo, este libro presenta una herramienta útil para cualquier escenario al generar un patrón lógico de obediencia, en un proceso esencial que requiere de coordinación y optimización en cuanto a la estructura que se implementa para calcular el número de muestras requeridas para recolectar en frentes de explotación.

Metodología

El punto de partida para comenzar a indagar es la forma como el cálculo puede modificar el proceso de recolección, teniendo en cuenta principalmente los tamaños de muestras y de igual forma las zonas donde se van a realizar los desprendimientos del carbón para ser recolectado. Además, se deberá corroborar que el cumplimiento de la estructura sea la correcta, pues de ello dependerá el obedecimiento de un patrón lógico con el cual se definen pautas de ejecución. Entiéndase como patrón lógico la serie de cálculos que en conjunto son una guía del proceso, los cuales se mostrarán a lo largo del desarrollo de este libro.

La elaboración de la estructura se realizó teniendo en cuenta dos aspectos, definidos para la determinación de algunas de las variables que definen su desarrollo y posterior ejecución; por tal motivo, teniendo como base los procesos definidos por ASTM (2022) en su documento Standard Practice for Collection of Channel Samples of Coal in a Mine, se consideran de manera esencial los siguientes factores.

Buenas zonas para ejecutar la recolección

Los datos generados a partir de la recolección de muestras dependen del número y espacios destinados como puntos de muestreo, además de la variabilidad de las características del carbón en un área determinada; debido a esto, una muestra de canal correctamente recolectada debe incluir el intervalo total desde el techo del manto hasta su parte inferior, es decir, el suelo; en pocas palabras, una sección transversal representativa del lecho del manto.

La importancia de escoger buenas zonas para la recolección radica en la facilidad de obtención de la muestra, lo que incluye además el ingreso y salida de las áreas donde se arranca el mineral para ser cargado y posteriormente transportado hasta los centros de acopio. En adición, la composición variable de materia orgánica y propiedades específicas del carbón depende en gran parte de la composición maceral y por ende, las zonas donde se ejecute el proceso de muestreo deben ser tenidas en cuenta, ya que las pruebas posteriores realizadas a las muestras brindarán información valiosa sobre la calidad del carbón y la caracterización para fines comerciales, entre otros aspectos.

Tamaño tope o diámetro de partículas de carbón

El tamaño tope o diámetro de las partículas del carbón deberá ser definido por los encargados, pues durante el procedimiento de explotación se rompe el carbón en partes desiguales respecto al tamaño y composición; por eso, es importante saber que el carbón degradado no es adecuado para incluirlo en una muestra de canal, ya que no se está asegurando su frescura. El término degradado va muy de la mano con la erosión, incluyendo cualquier decoloración y mancha en la cara expuesta, presencia de polvo y frentes fragmentados, lo que resulta en una pérdida de humedad inherente. Entonces, es esencial el tamaño tope o diámetro de partículas de carbón desprendidas porque son el primer contacto para el muestreador, y de ello dependerá el desarrollo acertado de la estructura planteada en este libro.

1. Cálculo de la cantidad de muestras a recolectar en mantos de carbón

Mejoramiento al proceso de muestreo

1.1 Estructura matemática Definición y aplicación de fórmulas

Antes de comenzar, es importante mencionar que aunque se supone el muestreo por canal como opción de recolección, puede usarse cualquier otro método; de acuerdo con esto, es clave decir que para la toma de una muestra de canal se debe seleccionar un frente fresco (en producción) de carbón, siendo apto aquel ubicado al interior de una mina en la cual permanentemente se está arrancando (ASTM, 2022; Rincón Mesa et al., 2010) o en frentes de explotación activos, garantizando muestras en condiciones óptimas y proporción natural considerable (Fuentes et al., 2018).

Los autores del libro sobre *Normas generales de muestreo y análisis* (Ecocarbón, 1995) proponen diferentes formas para el muestreo de carbón en producción, además de proponer dos fórmulas matemáticas para cálculo de suministros a recolectar, las cuales han sido el punto de partida con sus respectivos ajustes para la ejecución del método propuesto en este documento, teniendo entonces como referencia:

$$P(\text{kg}) = 0,06 \times D(\text{mm}) \quad \left| \quad \text{SMC}(\text{ton}) = 64 \times \sqrt{TTP(\text{ton})}\right.$$

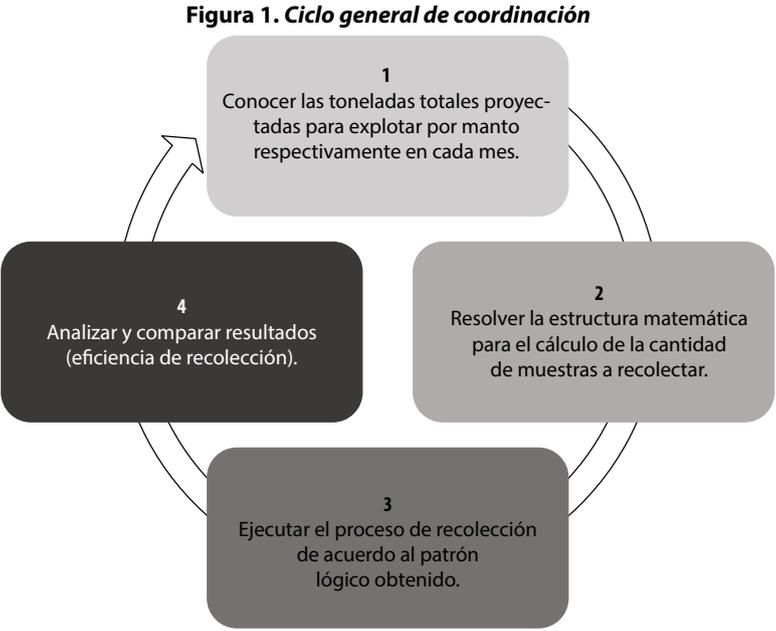
Es importante aclarar que, de ahora en adelante, todas las fórmulas propuestas hacen parte del método planteado por los autores para calcular la cantidad de muestras a recolectar en zonas de explotación y, aunque en esta sección no son explicadas de manera detallada, posteriormente se encontrarán ejemplos que ayudarán a entender cómo funcionan en combinación con las mostradas previamente.

El punto de usar las fórmulas que se proponen anteriormente radica en la forma como son ejecutadas para el cálculo de suministros en pilas cuando el carbón no está lavado, es decir, carbón que ya ha sido arrancado y transportado hasta los centros de acopio; pero, ¿qué sucede cuando se quiere muestrear carbón en zonas de explotación o mantos en producción? Resulta una tarea un poco complicada, debido a que

el ciclo productivo de una mina no puede ser detenido, por lo menos no bajo la coordinación de factores que pueden ser controlados.

Para contestar la incógnita anteriormente planteada, es necesario explicar de forma detallada la ejecución de una estructura matemática destinada para el cálculo de la cantidad de muestras a recolectar en zonas donde directamente se arranca carbón.

Para el entendimiento de la definición y aplicación de la estructura se tiene lo siguiente:



Nota. El esquema representa el ciclo general de coordinación que se debe obedecer para concretar el uso de la estructura propuesta. Elaboración propia.

Se han definido para la estructura siete fórmulas, cada una responsable de aportar al proceso información valiosa e indispensable para la toma de decisiones, por lo que es importante entender la forma como la estructura será aplicada a cada situación. Además, la ejecución propone ciertos parámetros que pueden ser modificados de acuerdo con

las necesidades que se quieran cubrir en relación con las metas planteadas. De tal modo, a continuación se define cada una de las fórmulas propuestas con sus respectivas variables.

1.1.1 Peso de subtotales (P)

Define el peso de los SUBtotales (SUBt) destinados a ser recolectados y así poder completar una muestra. Además, es importante tener definida la capacidad de almacenamiento, con el fin de escoger buenos diámetros de partículas, teniendo en cuenta de igual manera la forma como el carbón se desprende en el frente de explotación activo.

$$P\left(\frac{\text{kg}}{\text{SUBt}}\right) = 0,06 \times D(\text{mm}) \quad (1)$$

Donde:

P: Peso de un SUBtotal.

D: Tamaño tope de partículas de carbón.

0,06: Constante para conversión de unidades.

1.1.2 Cantidad de subtotales (SUBt)

Determina la cantidad de SUBtotales (SUBt) a almacenar para poder cumplir con el peso total de una muestra, cuya dependencia se sitúa en la capacidad de almacenamiento y el diámetro de las partículas que se podrán recolectar, definidas por los encargados de llevar a cabo el muestreo.

$$\text{SUBt} = \frac{\text{CA}(\text{kg})}{P\left(\frac{\text{kg}}{\text{SUBt}}\right)} \quad (2)$$

Donde:

SUBt: Cantidad de SUBtotales para cumplir con la totalidad de una muestra.

CA: Capacidad de almacenamiento (donde se almacenará en totalidad la muestra).

P: Peso de un SUBtotal.

1.1.3 Suministro para muestrear en cada ciclo (SMC)

Calcula el suministro requerido para toneladas proyectadas y representará para un ciclo de muestreo la cantidad de carbón que debe ser muestreada.

$$\text{SMC} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ciclo}} \right) = \frac{64 \times \sqrt{\text{TTP}(\text{ton})}}{\text{ciclo}} \quad (3)$$

Donde:

SMC: Suministro a muestrear en cada ciclo.

TTP: Toneladas totales proyectadas.

64: Constante para incremento del suministro cuando el carbón está *in situ*.

1.1.4 Ciclos de muestreo (CM_{TTP})

Relaciona las toneladas totales proyectadas con la cantidad de toneladas correspondientes a un ciclo de muestreo o suministro a muestrear en cada ciclo (SMC), con el fin de conocer el número de ciclos necesarios para abarcar la cantidad total de carbón a ser muestreada.

$$\text{CM}_{\text{TTP}} (\text{ciclo}) = \frac{\text{TTP}(\text{ton})}{\text{SMC} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ciclo}} \right)} \quad (4)$$

Donde:

CM_{TTP}: Ciclos de muestreo.

TTP: Toneladas totales proyectadas.

SMC: Suministro a muestrear en cada ciclo.

1.1.5 Muestras para recolectar en cada ciclo (MR_{VFM})

Determina la cantidad de muestras que deben ser recolectadas en un ciclo, relacionando el suministro a muestrear y la variabilidad en la frecuencia del muestreo (vea la Tabla 2), que puede variar con la cantidad de carbón que cada manto presenta.

$$MR_{VFM} \left(\frac{\text{muestras}}{\text{ciclo}} \right) = \frac{SMC \left(\frac{\text{ton}}{\text{ciclo}} \right)}{VFM \left(\frac{\text{ton}}{\text{muestras}} \right)} \quad (5)$$

Donde:

MR_{VFM} : Ciclos específicos para recolección.

SMC: Suministro a muestrear en cada ciclo.

VFM: Variabilidad en la frecuencia del muestreo (valor guía).

1.1.6 Muestras según proyectado y transportado (MSP y MST)

El cálculo de las muestras a recolectar según las toneladas totales proyectadas (TTP) da base para llevar el control de la actividad en tiempo real, generando una comparación con la cantidad de muestras que deben ir siendo recolectadas día a día conforme a las toneladas de carbón que se transportan (TT) desde cada uno de los mantos hasta los centros de acopio.

$$MSP = CM_{TTP} (\text{ciclo}) \times MR_{VFM} \left(\frac{\text{muestras}}{\text{ciclo}} \right) \quad (6)$$

$$MST (\text{muestras}) = \frac{TT(\text{ton}) \times MSP (\text{muestras})}{TTP(\text{ton})} \quad (7)$$

Donde:

MSP: Muestras según proyectado.

MST: Muestras según transportado.

TT: Toneladas transportadas en tiempo real.

A. Ejemplo de aplicación

En una mina se han proyectado para extracción en un mes 393.170,93 ton de carbón distribuidas en 9 mantos de la siguiente manera:

Tabla 1. Distribución, toneladas de carbón por manto - Ejemplo A

MANTO	TONELADAS PROYECTADAS
A	18.480,55
B	109.333,39
C	112.070,00
D	40.883,31
E	10.552,03
F	56.119,83
G	26.236,15
H	17.798,15
I	1.697,52

Nota. Esta tabla muestra la distribución proyectada de toneladas para extracción por manto para ejecución del ejemplo propuesto. Elaboración propia.

Se pretende elaborar un plan para la recolección de muestras y es necesario saber cuántas deberán ser recolectadas por manto de acuerdo con lo proyectado para la extracción, además de las que se espera que hayan sido recolectadas una vez se haya transportado el 30% del mineral arrancado. Para escoger el valor guía de muestreo se tiene lo siguiente:

Tabla 2. Valor guía - Variabilidad en la frecuencia del muestreo

VARIABILIDAD EN LA FRECUENCIA DEL MUESTREO (VFM)	
Toneladas totales proyectadas (TTP)	VALOR GUÍA
<5.000	TTP
5.000 – 12.000	2.000
12.000 – 70.000	5.000
70.000 – 200.000	10.000
>200.000	15.000

Nota. Esta tabla expone los intervalos de toneladas proyectadas tenidos en cuenta para escoger el valor guía de muestreo. Elaboración propia.

Para agilizar el proceso de cálculo, se determinará el patrón lógico de recolección solo para el manto A, de tal modo que sea una base para continuar con los otros mantos.

Solución

$$P \left(\frac{\text{Kg}}{\text{SUBt}} \right) = 0,06 \times D(\text{mm})$$

$$P \left(\frac{\text{Kg}}{\text{SUBt}} \right) = 0,06 \times 50\text{mm} = 3 \frac{\text{kg}}{\text{SUBt}}$$

Se definió un tamaño de partículas de 50mm, por lo que se recolectarán SUBtotales que en conjunto alcancen un peso de 3kg aproximadamente.

De acuerdo con la capacidad del recipiente donde se almacenará la muestra en su totalidad, será necesario recolectar 4 SUBtotales.

$$\text{SUBt} = \frac{\text{CA}(\text{kg})}{P \left(\frac{\text{kg}}{\text{SUBt}} \right)} \rightarrow \text{SUBt} = \frac{12\text{kg}}{3 \frac{\text{kg}}{\text{SUBt}}} = 4 \text{ SUBtotales}$$

Conforme a las toneladas de carbón proyectadas, se tienen para un ciclo de muestreo suministros de 8.700,36 ton por ciclo.

$$\text{SMC} = \frac{64 \times \sqrt{\text{TTP}(\text{ton})}}{\text{ciclo}} \rightarrow \text{SMC} = \frac{64 \times \sqrt{18480,55\text{ton}}}{\text{ciclo}} = 8700,36 \frac{\text{ton}}{\text{ciclo}}$$

Los ciclos de muestreo definidos en este caso han sido 2. Además, es importante la responsabilidad de quien realizará los cálculos, ya que muchas veces se suele obviar el análisis de los resultados, teniendo como consecuencia errar el número de ciclos necesarios.

De acuerdo con la variabilidad en la frecuencia de muestreo, se deben recolectar 2 muestras para abarcar el suministro calculado anteriormente, es decir, cada 5.000 ton se recogerá una muestra en su respectivo ciclo, respetando el suministro calculado para muestrear.

$$\text{CM}_{\text{TTP}} = \frac{\text{TTP}(\text{ton})}{\text{SMC} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ciclo}} \right)}$$

$$\text{MR}_{\text{VFM}} = \frac{\text{SMC} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ciclo}} \right)}{\text{VFM} \left(\frac{\text{ton}}{\text{muestras}} \right)}$$

$$\text{CM}_{\text{TTP}} = \frac{18.480,55\text{ton}}{87.00,36 \frac{\text{ton}}{\text{ciclo}}} = 2,14 \approx 2 \text{ ciclos}$$

$$\text{MR}_{\text{VFM}} = \frac{8.700,36 \frac{\text{ton}}{\text{ciclo}}}{5.000 \frac{\text{ton}}{\text{muestras}}} = 1,74 \approx 2 \frac{\text{muestras}}{\text{ciclo}}$$

Sin más, para el Manto A se deberán recolectar 4 muestras a lo largo de toda su extracción y para cuando se haya transportado el 30% del carbón contenido en este, lo ideal sería hasta este punto tener recolectada 1 muestra de acuerdo con los parámetros anteriormente calculados; aunque podrían existir percances en campo que no lo permitan.

$$MSP = CM_{TTP} (\text{ciclo}) \times MR_{VFM} \left(\frac{\text{muestras}}{\text{ciclo}} \right)$$

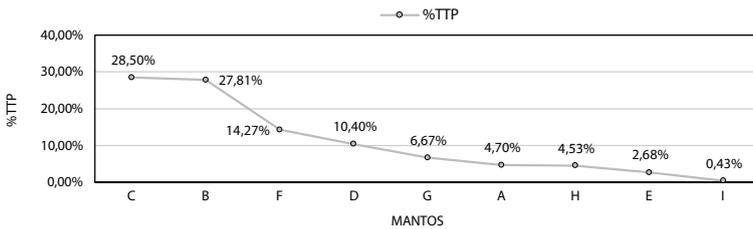
$$MSP = 2 \text{ ciclos} \times 2 \frac{\text{muestras}}{\text{ciclo}} = 4 \text{ muestras}$$

$$MST = \frac{TT(\text{ton}) \times MSP (\text{muestras})}{TTP(\text{ton})}$$

$$MST = \frac{5.544,165 \text{ ton} \times 4 \text{ muestras}}{18.480,55 \text{ ton}} = 1,2 \approx 1 \text{ muestra}$$

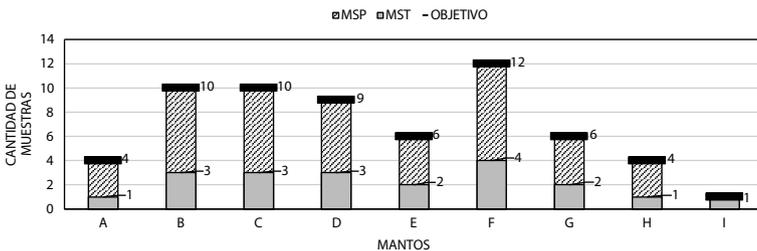
Teniendo en cuenta las toneladas para extraer en el mes propuesto se tiene:

Figura 2. Distribución porcentual TTP (ton) por manto



Nota. El gráfico representa la equivalencia en porcentajes por manto de las toneladas (TTP) mostradas en la Tabla 3. Elaboración propia.

Figura 3. MST - Objetivo por manto, MSP



Nota. El gráfico representa las muestras según proyectado y transportado mostradas en la Tabla 3. Elaboración propia.

Ejecutando el mismo proceso para cada uno de los mantos se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3. Plan general para recolección de muestras de carbón - Ejemplo A

MANTO	TTP	SMC	SUBt		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	30% TT	MST
			P	#SUBt						
A	18.480,55	8.700,36			2	5.000	2	4	5.544,17	1
B	109.333,39	21.161,98			5	10.000	2	10	32.800,02	3
C	112.070,00	21.425,19			5	10.000	2	10	33.621,00	3
D	40.883,31	12.940,56			3	5.000	3	9	12.264,99	3
E	10.552,03	6.574,28	3	4	2	2.000	3	6	3.165,61	2
F	56.119,83	15.161,36			4	5.000	3	12	16.835,95	4
G	26.236,15	10.366,45			3	5.000	2	6	7.870,85	2
H	17.798,15	8.537,98			2	5.000	2	4	5.339,45	1
I	1.697,52	1.697,52			1	1.697,52	1	1	509,26	1
ABC-DEFGHI	393.170,93		3	4	27			82	117.951,28	20

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución para recolección de muestras del ejemplo A. Elaboración propia.

Es posible presentar una distribución porcentual de la cantidad de veces que será necesario atacar un manto para recolectar las muestras. De tal modo, dicha representación se puede realizar teniendo en cuenta que en el mes propuesto será necesario visitar el PIT 27 veces, representando porcentualmente el 100% de las ocasiones en las cuales será necesario prepararse para muestrear.

Tabla 4. Distribución porcentual, visitas al PIT para muestrear

MANTO	CM _{TTP}	DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL
A	2	7%
B	5	19%
C	5	19%
D	3	11%
E	2	7%
F	4	15%
G	3	11%
H	2	7%
I	1	4%

Nota. La tabla muestra la cantidad de ciclos necesarios mostrados en la Tabla 3 para efectuar las actividades de recolección, que en algunas ocasiones podrán modificarse, esperando lograr en la mayoría de las veces una buena distribución en cuanto a la cantidad de mantos que puedan ser atacados con tan solo una oportunidad de muestreo. Elaboración propia.

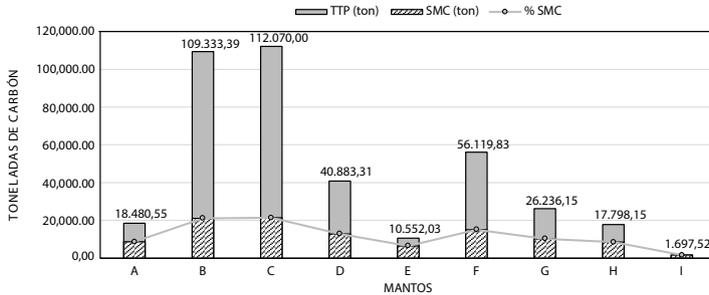
En este punto, se habrá generado por lo menos una pregunta: **¿Cuándo es correcto llevar a cabo la recolección?**

En las minas es posible conocer en tiempo real la actividad extractiva para cada uno de los bloques donde se explota, en este caso el carbón. De tal modo, siempre serán conocidas las toneladas que cada uno de los camiones ha transportado desde los mantos hasta los centros de acopio (Herrera Arango, 2005). Ahora bien, anteriormente se conoció el término suministro a muestrear en cada ciclo (SMC), el cual será el punto de partida para conocer con exactitud el momento de ejecutar el proceso.

Por otro lado, las razones que imposibilitan en mayor medida la labor de muestreo están relacionadas con la disponibilidad del personal, no contar con un buen acceso a las áreas de explotación, espesor de mantos geoméricamente exagerados y por supuesto, el clima.

Existe una relación entre las toneladas totales proyectadas (TTP) y el suministro que se calcula para muestrear en un solo ciclo (SCM), esto con el fin de representar el porcentaje de toneladas aprovechadas por ciclo para la cantidad de toneladas planeadas a extraer por manto.

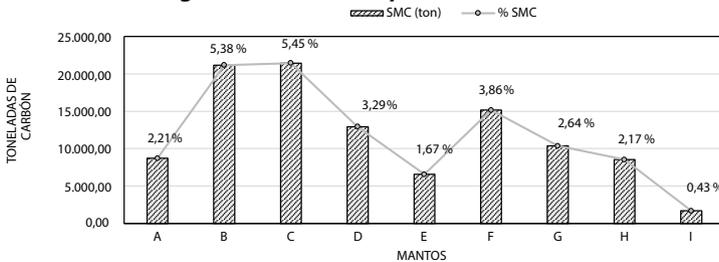
Figura 4. Relación TTP (ton) -%SCM



Nota. El gráfico presenta la relación por mantos entre toneladas totales proyectadas (TTP) y el suministro aprovechado (SCM) para muestreo mostrado en la Tabla 3, distribuido porcentualmente. Elaboración propia.

Al extraer de la gráfica anterior los suministros a recolectar por ciclo en cada manto, es posible representar el porcentaje de toneladas aprovechadas por ciclo para cada uno.

Figura 5. Distribución porcentual - SMC



Nota. El gráfico muestra la relación por mantos entre toneladas totales proyectadas (TTP) y el suministro aprovechado (SCM) para muestreo mostrado en la Figura 4, la distribución porcentual de suministro aprovechado. Elaboración propia.

2. Variabilidad en la frecuencia del muestreo

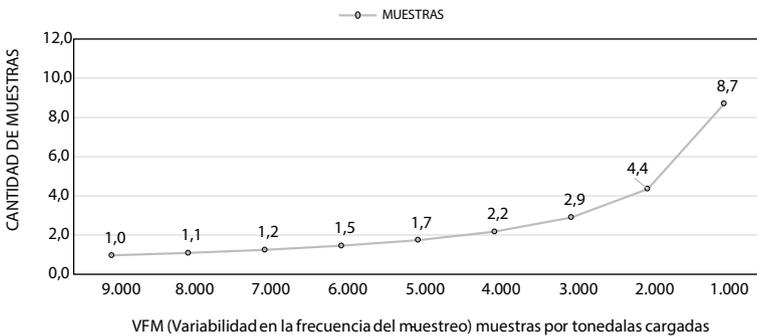
Comportamiento y afectación por clima

2.1 Modificación de la VFM

Llevar a cabo el proceso de muestreo con variabilidades diferentes a las que se han propuesto es una realidad siempre y cuando sea comprensible el comportamiento que pueden presentar los resultados que respectan a las muestras por recolectar en cada ciclo.

Con la siguiente gráfica, es posible entender la variación que la cantidad de muestras a recolectar por ciclo presenta, debido al cambio de la variabilidad en la frecuencia del muestreo (VFM), es decir, el valor guía.

Figura 6. Variación en cantidad de muestras por ciclo



Nota. Este gráfico presenta el comportamiento de la cantidad de muestras a recolectar si se modifica la variabilidad en la frecuencia del muestro (VFM). Elaboración propia.

Es claro observar que a medida se reduce el valor de la VFM, el número que define la cantidad de muestras que deben ser recolectadas por ciclo es mayor, lo que lleva a pensar en la complejidad de la tarea a ejecutar siempre y cuando se tenga en cuenta lo que anteriormente aplicaba para una variabilidad de 5.000ton; es decir, con el Manto A se decidió trabajar una VFM de 5.000 ton, lo que indica que cada vez se cargue dicha cantidad es necesario recolectar una muestra para completar dos muestras del ciclo, haciendo entender que cuando consecuentemente se decida trabajar con una variabilidad de 1.000 ton se deberá recolectar solo en el primer ciclo una muestra cada 1.000 ton cargadas.

Tabla 5. Muestras tentativas, variación VFM

TTP (ton)	MUESTRAS TENTATIVAS DE ACUERDO CON LA VFM					
	TTP (ton)	2.000	5.000	10.000	15.000	
< 5.000	1					
10.000		6				
20.000			4			
30.000			6			
40.000			9			
50.000			9			
60.000			12			
70.000			12			
80.000				8		
90.000				10		
100.000				10		
110.000				10		
120.000				10		
130.000				12		
140.000				12		
150.000				12		
160.000				18		
170.000				18		

(Continúa)

TTP (ton)	MUESTRAS TENTATIVAS DE ACUERDO CON LA VFM				
	TTP (ton)	2.000	5.000	10.000	15.000
180.000				21	
190.000				21	
200.000				21	
210.000					14
220.000					14
230.000					14
240.000					16
250.000					16
260.000					16
270.000					16
280.000					16
290.000					16
300.000					18

Nota. Esta tabla muestra el comportamiento tentativo de la cantidad de muestras a medida que las toneladas totales proyectadas (TTP) aumentan y es claro entender que el número que define la cantidad de muestras a recolectar dependerá directamente del valor guía de muestreo definido como variabilidad en la frecuencia del muestreo (VFM), guardando relación y dependencia directa con todo lo proyectado para extracción mes a mes. Elaboración propia.

Si bien, el cálculo de la cantidad de muestras se hace bajo la referencia de una variabilidad en la frecuencia de muestreo (VFM), se puede utilizar la Tabla 5 y manejar de forma tentativa la cantidad de muestras que posiblemente puedan ser recolectadas.

Aunque es posible llevar a cabo la recolección de muestras en base a las cantidades propuestas en la tabla anterior, las pautas que brinda la estructura para coordinar no serán tenidas en cuenta, por lo que la planeación para ejecutar las actividades que enmarcan el proceso podría verse modificada y aunque los encargados de ejecutar el muestreo decidan planear, deberán programar sin estructura las visitas al PIT.

Con base en lo explicado anteriormente, es posible ofrecer una segunda alternativa para definir la cantidad de muestras según la variabilidad en la frecuencia del muestreo (VFM), pero tomando como punto de partida los suministros a muestrear por ciclo (SMC) o, dicho en otras palabras, los suministros requeridos para toneladas proyectadas, brindando mayor libertad a la hora de escoger el valor guía que define la frecuencia del muestreo.

No se ha definido el procedimiento para el cálculo de la cantidad de muestras tomando como base los suministros a muestrear por ciclo (SMC); en ese orden de ideas, se tiene que el cálculo de la cantidad de muestras a recolectar en zonas de explotación puede llevarse a cabo según:

- Toneladas totales proyectadas (TTP) - Explicado en el ejemplo A.
- Suministros requeridos para toneladas proyectadas (SMC).

Para mayor comprensión de la segunda alternativa se tiene el siguiente ejemplo:

B. Ejemplo de aplicación

Se tomará como punto de referencia el valor del suministro a muestrear por ciclo calculado para el manto A en el primer ejemplo de aplicación, donde se explica el procedimiento de cálculo de la cantidad de muestras según toneladas totales proyectadas (TTP).

Los encargados de planear la campaña de muestreo para el manto escogido han decidido llevar cabo el cálculo de la cantidad de muestras a recolectar en base al suministro a muestrear por ciclo (SMC), pues desean mayor control en cuanto a las cantidades que podrían recolectar, es decir, esperan una mejor coordinación al trabajar con el valor en toneladas correspondiente al suministro a muestrear por ciclo (SMC).

En la solución del ejemplo solo se explica cómo definir la frecuencia en el muestreo, pues es el único parámetro variable en toda la estructura, sin tener en cuenta diámetros de partículas desprendidas y capacidades para almacenamiento de muestras.

De acuerdo con lo propuesto en el ejemplo se tiene lo siguiente:

$$SMC = \frac{64 \times \sqrt{TTP(\text{ton})}}{\text{ciclo}}$$

$$SMC = \frac{64 \times \sqrt{18.480,55\text{ton}}}{\text{ciclo}} = 8.700,36 \frac{\text{ton}}{\text{ciclo}}$$

Conforme a las toneladas de carbón proyectadas, se tiene para un ciclo de muestreo suministros de 8.700,36 ton por ciclo.

Ahora bien, la intención principal es obtener el número que definirá la cantidad de muestras a recolectar, pero teniendo en cuenta el suministro, es decir, a diferencia de la primera alternativa, el valor guía de muestreo no se escogerá bajo la relación de las toneladas totales proyectadas (TTP) y los valores guías correspondientes.

Para esta alternativa, la variabilidad en la frecuencia de muestreo (VFM) será estrictamente definida de acuerdo con la siguiente lógica:

Se sabe que los suministros representan para un ciclo de muestreo la cantidad de carbón que debe ser muestreada, es decir, el suministro de 8.700,36 ton representa 1 de los 2 ciclos de muestreo calculados para 18.480,55 ton de carbón contenido en el manto escogido para muestrear.

Si los encargados de la campaña de muestreo quieren conocer los ciclos de recolección, deben definir una variabilidad en la frecuencia

de muestreo (VFM); por lo tanto, si se decide que el suministro calculado anteriormente será el valor guía para definir dicha frecuencia, la cantidad de muestras a recolectar por ciclo será 1, por lo que en total se deberán recolectar 2 muestras para 18.480,55 ton de carbón. Ahora bien, si se decide que el valor guía será de 2.000 ton, las muestras a recolectar por ciclo serán 4; de tal modo, en total se deberán recolectar 8 muestras para 18.480,55 ton de carbón.

Entonces, al observar el comportamiento del número que define la cantidad de muestras en esta alternativa, se puede comprender que dependerá del valor guía propuesto por los encargados de la campaña, el cual podría ser modificado debido a factores que puedan afectar directamente las actividades de recolección, entre otras, brindando mayor libertad a la hora de coordinar.

2.2 Afectación por lluvia

Se ha mencionado anteriormente el alcance que puede presentarse con el cálculo de las cantidades de muestras que deben ser recolectadas por manto en extracción; además, es sabido que una de las causas más probables por las que la actividad puede verse afectada es el clima (lluvia), ya que existe una relación directa en cuanto a las horas que se pronostican, las horas en las que realmente se presenta el evento y la variación que existe en cuanto a la modificación del plan de extracción mensual (aumento o disminución). Por eso, si existe una variación considerada en cuanto a las horas de lluvia, el plan de recolección (cantidades de muestras) se verá modificado parcialmente, pues el plan de extracción ha alterado su meta.

Para mejor entendimiento, de ahora en adelante nos referiremos al clima como evento no controlable y cada una de las variables que se presenten a causa de mencionado evento irán siendo nombradas a medida se desarrolla esta sección. Entonces, observemos con detenimiento la siguiente fórmula:

$$\pm (TON_{\text{variación}}) = \frac{(TON_c \times D_c) - \left(TON_c \times \left(\frac{H_{11} - P_{11}}{HO_d} \right) \right)}{DT_m} \quad (8)$$

Donde:

TON_c: Toneladas de carbón planeadas para extracción.

D_e: Días ejecutados del mes.

H_{II}: Horas reales de lluvia por mes.

P_{II}: Horas pronosticadas de lluvia por mes.

HO_d: Horas operativas planeadas por día.

DT_m: Días totales del mes.

Y muestra qué tanto puede variar el plan de extracción teniendo en cuenta la relación que se presenta entre las horas reales de lluvia de un mes y las que se han pronosticado para el plan a ejecutar en cuestión (ajuste del plan de extracción por afectación de evento no controlable).

Para entender completamente el comportamiento de la fórmula anteriormente propuesta, es necesario comprender de dónde surge cada una de las variables que en ella se contienen y se puede comenzar diciendo que uno de los indicadores de gestión más importante en minería es la ejecución del plan de extracción mensual, teniendo en cuenta cada uno de los eventos por los que la operación se pueda ver comprometida.

Por orden de ideas, vamos a entender con el siguiente ejemplo cómo se ajusta el plan de extracción y cómo se puede ver afectado el plan de recolección teniendo en cuenta la relación con dicha variación:

C. Ejemplo de aplicación

En una mina donde se extrae carbón térmico, el plan mensual de extracción por lo general siempre es afectado por las horas de lluvia que se pueden presentar; de tal modo, en algunas ocasiones puede que haya más o menos horas de evento no controlable en comparación con los pronósticos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene para cierta zona del PIT A de la mina un plan de extracción de 131.711 ton de carbón con un pronóstico de lluvias de 67,60 h, de acuerdo con la información suministrada y sabiendo que en el mes se presentaron 153 h de lluvia y que las horas operativas de la mina por día son 21,5 h, se tiene el siguiente ajuste:

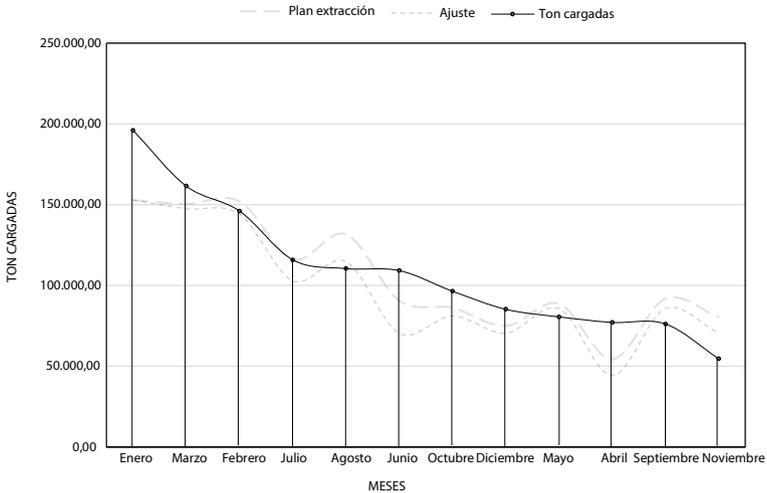
Reemplazando en la fórmula 8 se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 +/- (\text{TON}_{\text{variación}}) &= \frac{(131.711 \text{ ton} \times 31 \text{ días}) - \left(131.711 \text{ ton} \times \left(\frac{153 \text{ h} - 67,60 \text{ h}}{21,5 \frac{\text{h}}{\text{días}}} \right) \right)}{31 \text{ días}} \\
 &= \frac{(131.711 \text{ ton} \times 31 \text{ días}) - (131.711 \text{ ton} \times 3,972 \text{ días})}{31 \text{ días}} \\
 &= \frac{3'559.884,908 \text{ ton} \times \text{días}}{31 \text{ días}} \\
 &= 114.834,99 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Al calcular el ajuste de toneladas de carbón por lluvia en 114.834,99 ton, es correcto decir que la variación es 16.876,01 ton con respecto al plan de extracción de 131.711 ton, teniendo en cuenta por supuesto la relación de horas lluvia pronosticadas y reales. Ahora bien, es importante dejar en claro que el ajuste realizado tiene en cuenta la sumatoria de toneladas planeadas por zona, por lo que la diferencia presentada no contempla de forma precisa la distribución de toneladas por manto, lo que implicaría calcular la variación de la cantidad de muestras a recolectar teniendo en cuenta cada uno de los mantos contenidos en la zona mencionada.

Es posible representar gráficamente las toneladas cargadas por mes con el fin de evidenciar la comparación entre el plan de extracción y el ajuste que se hace de acuerdo con las horas de lluvia pronosticadas y reales; además, es uno de los puntos de partida necesario para comenzar los ajustes de los planes de recolección. A continuación, se muestra una gráfica que representa las toneladas de carbón cargadas y transportadas mensualmente en el PIT A anteriormente mencionado. Adicionalmente, existen dos líneas que representan el plan de extracción y el ajuste que se presenta del mismo por horas de lluvia.

Figura 7. Toneladas cargadas por mes



Nota. Este gráfico muestra la variación de ajuste por lluvia del plan de extracción. Elaboración propia.

Si bien en el ejemplo anterior se tuvo un mes completo de 31 días, pero es importante aclarar que la fórmula permite trabajar en tiempo real conforme se va ejecutando cada uno de los días destinados para producción, y para mayor entendimiento, se plantea la siguiente suposición:

En dicho mes se tiene planeado extraer 54.399,58 ton de carbón con un pronóstico de lluvias en 41,00 h. Resulta que la cantidad de horas en las que realmente hubo lluvia fueron 160. Explicado con otras palabras, transcurridos los 31 días del mes se presentaron en totalidad 160 h de lluvia; por tanto, al aplicar la fórmula de ajuste, se tiene que realmente el plan se redujo hasta 46.176,39 ton, teniendo una diferencia de 8.223,19 ton.

¿Qué sucede si se quiere tener un control diario del ajuste del plan de extracción?

Es sencillo y solo es cuestión de conocer diariamente la producción, las horas que se van presentando de lluvia y por supuesto los días que van siendo ejecutados; por tanto, si se quiere saber cómo es el ajuste para 17 días ejecutados, se deben conocer las horas de lluvia reales hasta ese día y aplicar la fórmula así:

$$\begin{aligned}
 +/- \text{ (TON}_{\text{variación}}) &= \frac{(54.399,58\text{ton} \times 17\text{días}) - \left(54.399,58\text{ton} \times \left(\frac{54,00\text{h} - 41,00\text{h}}{21,5 \frac{\text{h}}{\text{días}}} \right) \right)}{31\text{días}} \\
 &= \frac{(54.399,58\text{ton} \times 17\text{días}) - (54.399,58\text{ton} \times 0,605\text{días})}{31\text{días}} \\
 &= \frac{891.881,11\text{ton} \times \text{días}}{31\text{días}} \\
 &= 28.770,36\text{ton}
 \end{aligned}$$

Entonces, con 17 días ejecutados, 54 h de lluvia presentadas y sabiendo que es un mes de 31 días, se tiene que el plan hasta ese punto debe ser 28.770,36 ton; así, una vez se vayan ejecutando los otros días, el plan puede verse modificado en gran o poca proporción, pues todo depende de las horas de lluvia reales.

Ha sido explicado el caso en que las horas de lluvia reales son mayores a las pronosticadas, de tal modo surge una duda.

¿Qué pasa si llueve menos de lo esperado?

A diferencia del escenario donde el pronóstico es superado y se observa que el plan se reduce, se tiene que cuando las horas pronosticadas no son superadas, es decir, llueve menos de lo esperado, el plan lógicamente se espera que aumente. De tal modo, el comportamiento de la fórmula es diferente y es cuestión de entender el manejo de los signos.

Para entender, tomemos como punto de partida los mismos valores manejados en el Ejemplo C, donde únicamente variará el valor correspondiente a horas reales de lluvia, teniendo entonces 40 h y no 153 h. Sabiendo esto, se aplica la fórmula así:

$$\begin{aligned}
 +/- (\text{TON}_{\text{variación}}) &= \frac{(131.711 \text{ ton} \times 31 \text{ días}) - \left(131.711 \text{ ton} \times \left(\frac{40 \text{ h} - 67,60 \text{ h}}{21,5 \frac{\text{h}}{\text{días}}} \right) \right)}{31 \text{ días}} \\
 &= \frac{(131.711 \text{ ton} \times 31 \text{ días}) - (131.711 \text{ ton} \times -1,284 \text{ días})}{31 \text{ días}} \\
 &= \frac{(131.711 \text{ ton} \times 31 \text{ días}) - (-169.116,924 \text{ ton} \times \text{días})}{31 \text{ días}} \\
 &= \frac{(131.711 \text{ ton} \times 31 \text{ días}) + 169.116,924 \text{ ton} \times \text{días}}{31 \text{ días}} \\
 &= \frac{4'252.8157,924 \text{ ton} \times \text{días}}{31 \text{ días}} \\
 &= 137.166,38 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Es claro, el plan aumenta al tener que las horas de lluvia reales son menores que las pronosticadas.

Pero, ¿cómo es afectado el plan de recolección con los ajustes realizados a los planes de extracción?

Aunque parezca que los planes pueden verse significativamente modificados, la realidad es que todo depende por supuesto de las cantidades por cálculo que puedan disminuir o aumentar, es decir, hay que recordar el valor guía que se escoge para definir la variabilidad en la frecuencia del muestreo (Tabla 2), por lo que, si existe gran variación en el plan de extracción, dicho valor guía puede cambiar o simplemente seguir siendo el mismo; agregando que, si existe o no variación con respecto al valor guía, el suministro a muestrear por ciclo (SMC) sí

se verá afectado, entonces, la frecuencia de muestreo, a pesar de que sigue siendo la misma, puede resultar reducida en cuanto a lo que se carga y transporta.

Para entender un poco mejor se tiene lo siguiente:

Independiente del caso en que el plan de extracción pueda verse modificado, los responsables de definir los planes de recolección deben saber identificar el momento en que la frecuencia del muestro puede aumentar, disminuir o simplemente mantenerse; entonces, aunque la dependencia del ajuste del plan de extracción depende de las horas reales de lluvia, el hecho es que generar una corrección de la cantidad de muestras teniendo en cuenta dicho ajuste, también es dependiente de la coordinación y optimización de cada una de las tareas que engloba dicho proceso.

En resumen, el factor que más puede llegar afectar los planes de recolección de muestras es la variación de los planes de extracción, en este caso modificados por un factor no controlable en absoluto como lo es el clima, en el caso específico de minería, la lluvia.

3. Relaciones de implementación

Definición estratégica

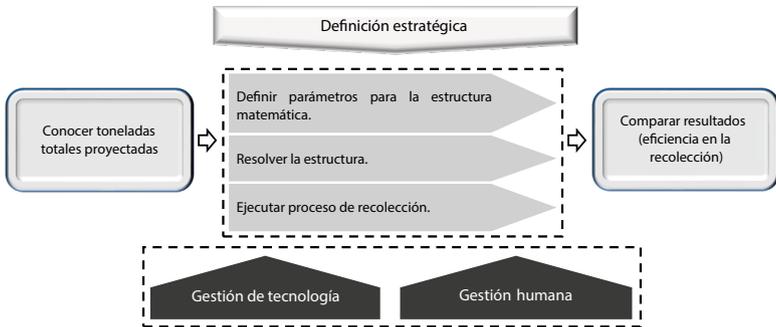
3.1 Eficiencia de recolección

Llevar a cabo un proceso donde se encuentra como factor importante el humano, implica medir de forma continua la eficiencia con la que se ejecutan las labores que conforman el proceso; de este modo, es posible identificar factores cuya finalidad es brindar ideas para el mejoramiento constante. Por eso, es importante medir la eficiencia de la recolección respondiendo la siguiente pregunta:

¿Cuántas muestras fueron recolectadas en el mes "X" para los mantos que se proyectaron respectivamente?

Se debe tener en cuenta el desarrollo de las actividades que mutuamente relacionadas interactúan para transformar las relaciones de la implementación matemática en resultados, es decir, ejecutar el proceso de recolección bajo el patrón lógico anteriormente explicado y de esa forma cumplir lo planeado.

Figura 8. Definición estratégica



Nota. Este esquema expone la importancia del factor humano y tecnológico. Elaboración propia.

Se propone el siguiente ejemplo, en el cual se busca explicar de forma detallada el comportamiento de la eficiencia de recolección por manto.

Tabla 6. Plan general, recolección de muestras por manto - Ejemplo D

MANTO	TTP	SMC	SUBt		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBt					
A	18.480,55	8.700,36			2	5.000	2	4	4
B	109.333,39	21.161,98			5	10.000	2	10	9
C	112.070,00	21.425,19			5	10.000	2	10	8
D	40.883,31	12.940,56			3	5.000	3	9	7
E	10.552,03	6.574,28	3	4	2	2.000	3	6	5
F	56.119,83	15.161,36			4	5.000	3	12	10
G	26.236,15	10.366,45			3	5.000	2	6	5
H	17.798,15	8.537,98			2	5.000	2	4	2
I	1.697,52	1.697,52			1	1.697,52	1	1	1
ABCDEFGHI	393.170,93		3	4	27			62	51

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución para recolección de muestras del ejemplo D y la cantidad de muestras recolectadas. Elaboración propia.

D. Ejemplo de aplicación

Teniendo en cuenta las muestras que deben ser recolectadas por manto, se tienen los resultados con respecto a la recolección llevada a cabo en el propuesto del Ejemplo de aplicación A contemplados en la Tabla 6. De tal modo, es importante saber cuán eficiente fue la campaña. Por lo tanto, en base a lo planteado y considerando el patrón lógico obtenido para cada manto, se tienen los siguientes resultados bajo la relación entre muestras proyectadas para recolección y por supuesto, las muestras recolectadas:

Tabla 7. Eficiencias de recolección por manto - Ejemplo D

MANTO	EFICIENCIA DE RECOLECCIÓN
A	100%
B	90%
C	80%
D	78%
E	83%
F	83%
G	83%
H	50%
I	100%

Nota. Esta tabla expone la eficiencia de recolección teniendo en cuenta los datos de la Tabla 6. Elaboración propia.

El criterio que brinda cada parámetro de coordinación juega un papel importante, independientemente de la forma que se escoja para definir la cantidad de muestras a recolectar. Entonces, la eficiencia dependerá de la plenitud coherente de los cálculos y por supuesto del factor humano.

Con el fin de generar una comparación, se tiene que, en la misma mina para un mes diferente respectivamente, se llevó a cabo una campaña de recolección sin tener en cuenta el patrón lógico alcanzado por la estructura. De este modo, se evidencian los siguientes resultados con respecto a la eficiencia de meses donde se usa la estructura y donde no se aplica.

Mes con patrón lógico

Mes sin patrón lógico

82% > 42%

Las condiciones para coordinar el mes en el cual se ejecutó la estructura por primera vez eran algo nuevo; aun así, se lograron llevar a cabo de forma estructurada, ya que a diferencia del mes sin condiciones la eficiencia logra mejorar en un 40%, casi sobrepasando la mitad.

Si se quiere ser más específico, se puede observar que, de los 9 mantos proyectados en el mes con estructura coordinada, la mayoría supera el 70% de las muestras destinadas a ser recolectadas para cada uno, a excepción del Manto H con una eficiencia del 50%; así mismo, observamos los mantos A e I con el 100%, dejando en evidencia la posibilidad de una buena coordinación al momento de llevar a cabo la recolección.

Como se ha mencionado anteriormente, la eficiencia dependerá de la forma como se ejecute la estructura y el factor humano, pero hay que reiterar nuevamente la importancia del área de planeación al momento de entregar los cálculos de reservas probadas por manto, pues como ya se sabe, es el punto de partida para comenzar a resolver la estructura.

Es posible relacionar la eficiencia de recolección mes a mes para definir lo que generalmente se considera una medida de rendimiento (KPI) anual, pues en minería es muy común entregar informes generales de actividades a periodos de tiempos finalizados en 12 meses (teniendo la posibilidad de especificar información mes a mes), principalmente para proponer metas al año siguiente.

Para mayor entendimiento se tiene el siguiente ejemplo:

E. Ejemplo de aplicación

En una mina, el área de planeación ha propuesto la siguiente campaña de extracción para el primer año de vida útil, teniendo mes a mes la siguiente información:

Tabla 8. Distribución primer año, toneladas de carbón por mes - Ejemplo E

PRIMER AÑO DE VIDA ÚTIL		
Meses	Número de mantos	Toneladas proyectadas (TON)
Mes 1	9	356.785,25
Mes 2	6	237.856,83
Mes 3	8	317.142,44
Mes 4	7	277.499,64
Mes 5	5	198.214,03
Mes 6	10	369.428,06
Mes 7	5	212.658,24
Mes 8	5	184.258,33
Mes 9	7	297.721,54
Mes 10	6	245.875,15
Mes 11	7	284.265,34
Mes 12	8	259.126,23

Nota. Esta tabla muestra la distribución proyectada de toneladas para extracción por mes para ejecución del ejemplo propuesto. Elaboración propia.

De acuerdo con la información suministrada, para el primer año se esperan extraer 3'267.831,08 ton de carbón térmico.

Se ha solicitado la planeación inicial correspondiente a la campaña de muestreo que en el primer año se ejecutará. Para ello, es necesario conocer la cantidad de toneladas proyectadas por manto, con el fin de definir los parámetros que a lo largo de toda la campaña coordinaran las actividades de recolección. En consecuencia, para este caso no se tendrán en cuenta las muestras según toneladas transportadas (MST), ya que es un valor que se calcula en orden de lo que se requiere a medida se va ejecutando la extracción.

Según lo anterior, se tiene para cada mes la información contenida en la Tabla 8.

Tabla 9. Plan específico para recolección de muestras - Mes 1

MANTO	TTP	SMC	SUBt		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBt					
A	35.678,53	12.088,81			3	5.000	2	6	4
B	42.814,23	13.242,62			3	5.000	3	9	8
C	32.110,67	11.486,29			2	5.000	3	6	5
D	46.382,08	13.783,36			3	5.000	3	9	7
E	64.221,35	16.218,84	3	4	4	5.000	3	12	9
F	14.271,41	7.645,63			2	5.000	2	4	4
G	28.542,82	10.812,48			3	5.000	2	6	5
H	53.517,79	14.805,70			4	5.000	3	12	10
I	39.246,37	12.678,85			3	5.000	3	9	6
ABCDEFGHI	356.785,25		3	4	27			73	58

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 1 para recolección de muestras. Elaboración propia.

Tabla 10. Plan específico para recolección de muestras - Mes 2

MANTO	TTP	SMC	SUBT		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBT					
A	34.893,60	11.955,09			3	5.000	2	6	5
B	44.407,87	13.486,83			3	5.000	3	9	8
C	25.379,32	10.195,77			2	5.000	2	4	4
D	49.165,01	14.190,84	3	4	3	5.000	3	9	6
E	30.136,46	11.110,31			3	5.000	2	6	5
F	53.874,57	14.854,97			4	5.000	3	12	10
ABCDEF	237.856,83		3	4	18			46	38

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 2 para recolección de muestras. Elaboración propia.

Tabla 11. Plan específico para recolección de muestras - Mes 3

MANTO	TTP	SMC	SUBT		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBT					
A	26.957,11	10.507,92	3	4	3	5.000	2	6	5
B	49.157,08	14.189,69			3	5.000	3	9	8
C	30.128,53	11.108,85			3	5.000	2	6	5
D	58.671,35	15.502,19			4	5.000	3	12	10
E	20.614,26	9.188,91			2	5.000	2	4	2
F	71.357,05	17.096,15			4	10.000	2	8	6
G	7.928,56	5.698,72			1	2.000	3	3	3
H	52.328,50	14.640,27			4	5.000	3	12	9
ABCDEF GH	317.142,44		3	4	24		60	48	

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 3 para recolección de muestras. Elaboración propia.

Tabla 12. Plan específico para recolección de muestras - Mes 4

MANTO	TTP	SMC	SUBt		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBt					
A	34.104,71	11.819,17			3	5.000	2	6	6
B	45.204,69	13.607,29			3	5.000	3	9	7
C	28.554,71	10.814,81			3	5.000	2	6	5
D	50.754,68	14.418,43	3	4	4	5.000	3	12	11
E	25.779,72	10.275,88			3	5.000	2	6	4
F	36.879,70	12.290,62			3	5.000	2	6	5
G	56.221,43	15.175,08			4	5.000	3	12	9
ABCDEFG	277.499,64		3	4	23			57	49

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 4 para recolección de muestras. Elaboración propia.

Tabla 13. Plan específico para recolección de muestras - Mes 5

MANTO	TTP	SMC	SUBt		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBt					
A	29.732,10	11.035,52			3	5.000	2	6	5
B	9.910,70	6.371,36			2	2.000	3	6	4
C	69.374,91	16.857,04	3	4	4	5.000	3	12	10
D	33.696,39	11.748,21			3	5.000	2	6	5
E	55.499,93	15.077,39			4	5.000	3	12	9
ABCDE	198.214,03		3	4	16			42	33

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 5 para recolección de muestras. Elaboración propia.

Tabla 14. Plan específico para recolección de muestras - Mes 6

MANTO	TTP	SMC	SUBT		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBt					
A	29.554,24	11.002,46	3	4	3	5.000	2	6	5
B	44.331,37	13.475,21			3	5.000	3	9	8
C	22.165,68	9.528,41			2	5.000	2	4	4
D	51.719,93	14.554,89			4	5.000	3	12	10
E	33.248,53	11.669,87			3	5.000	2	6	4
F	40.637,09	12.901,53			3	5.000	3	9	7
G	14.777,12	7.779,92			2	5.000	2	4	3
H	59.108,49	15.559,83			4	5.000	3	12	9
I	18.471,40	8.698,21			2	5.000	2	4	3
J	55.414,21	15.065,74			4	5.000	3	12	11
ABCDEFGHIJ	369.428,06		3	4	30			78	64

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 6 para recolección de muestras. Elaboración propia.

Tabla 15. Plan específico para recolección de muestras - Mes 7

MANTO	TTP	SMC	SUBt		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBt					
A	21.265,82	9.333,00			2	5.000	2	4	4
B	63.797,47	16.165,22			4	5.000	3	12	9
C	25.518,99	10.223,79	3	4	2	5.000	2	4	3
D	59.544,31	15.617,09			4	5.000	3	12	9
E	42.531,65	13.198,85			3	5.000	3	9	8
ABCDE	212.658,24		3	4	15			41	33

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 7 para recolección de muestras. Elaboración propia.

Tabla 16. Plan específico para recolección de muestras - Mes 8

MANTO	TTP	SMC	SUBt		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBt					
A	27.638,75	10.639,94			3	5.000	2	6	5
B	46.064,58	13.736,10			3	5.000	3	9	9
C	20.268,42	9.111,50	3	4	2	5.000	2	4	3
D	57.120,08	15.295,88			4	5.000	3	12	10
E	33.166,50	11.655,47			3	5.000	2	6	5
ABCDE	184.258,33		3	4	15			37	32

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 8 para recolección de muestras. Elaboración propia.

Tabla 17. Plan específico para recolección de muestras - Mes 9

MANTO	TTP	SMC	SUBT		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBt					
A	36.589,98	12.242,24			3	5.000	2	6	5
B	48.498,84	14.094,37			3	5.000	3	9	9
C	27.658,33	10.643,71			3	5.000	2	6	5
D	57.430,49	15.337,37	3	4	4	5.000	3	12	10
E	15.749,47	8.031,80			2	5.000	2	4	4
F	69.339,35	16.852,71			4	5.000	3	12	11
G	42.455,08	13.186,96			3	5.000	3	9	7
ABCDEF	297.721,54		3	4	22			58	51

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 9 para recolección de muestras. Elaboración propia

Tabla 18. Plan específico para recolección de muestras - Mes 10

MANTO	TTP	SMC	SUBt		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBt					
A	26.234,88	10.366,20			3	5.000	2	6	5
B	53.281,15	14.772,93			4	5.000	3	12	9
C	38.528,64	12.562,38			3	5.000	3	9	8
D	45.904,89	13.712,27	3	4	3	5.000	3	9	7
E	48.363,64	14.074,71			3	5.000	3	9	8
F	33.561,95	11.724,75			3	5.000	2	6	6
ABCDEF	245.875,15		3	4	19			51	43

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 10 para recolección de muestras. Elaboración propia.

Tabla 19. Plan específico para recolección de muestras - Mes 11

MANTO	TTP	SMC	SUBT		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBT					
A	29.250,90	10.945,85			3	5.000	2	6	6
B	51.992,13	14.593,14			4	5.000	3	12	9
C	26.408,25	10.400,39			3	5.000	2	6	5
D	54.834,78	14.986,77	3	4	4	5.000	3	12	11
E	23.565,61	9.824,70			2	5.000	2	4	4
F	60.520,09	15.744,53			4	5.000	3	12	8
G	37.693,58	12.425,49			3	5.000	2	6	4
ABCDEF	284.265,34		3	4	23			58	47

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 11 para recolección de muestras. Elaboración propia.

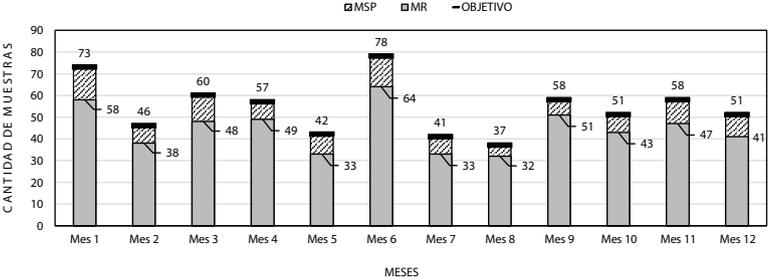
Tabla 20 . Plan específico para recolección de muestras - Mes 12

MANTO	TTP	SMC	SUBt		CM _{TTP}	VFM	MR _{VFM}	MSP	MR
			P	#SUBt					
A	27.208,25	10.556,75	3	4	3	5.000	2	6	5
B	37.573,30	12.405,65			3	5.000	2	6	4
C	14.251,94	7.712,45			2	5.000	2	4	2
D	50.529,61	14.386,43			4	5.000	3	12	10
E	29.799,52	11.048,02			2	5.000	2	4	3
F	34.982,04	11.970,23			3	5.000	2	6	5
G	16.843,20	8.306,01			2	5.000	2	4	3
H	47.938,37	14.012,69			3	5.000	3	9	9
ABCDEFGH	259.126,23		3	4	22			51	41

Nota. Esta tabla muestra los criterios de ejecución del Mes 12 para recolección de muestras. Elaboración propia.

Una vez estructurada la planeación y ejecutadas las campañas de recolección correspondiente a cada mes, es posible representar gráficamente las cantidades de muestras esperadas a ser recolectadas (MSP), por supuesto teniendo en cuenta las que han sido recolectadas en cada mes (MR).

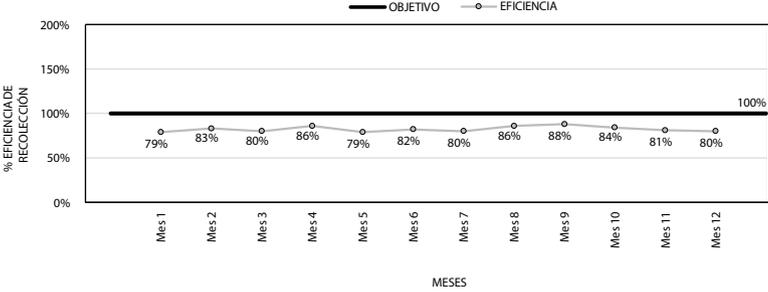
Figura 9. MR - Objetivo por mes, MSP



Nota. Este gráfico representa la recolección total de muestras por mes teniendo cuenta los datos de la Tabla 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 y 20; evidenciando el objetivo de muestras según lo proyectado (MSP). Elaboración propia.

Teniendo en cuenta las muestras recolectadas (MR) mes a mes al igual que las cantidades específicas proyectadas para muestreo (MSP), es necesario calcular la eficiencia con respecto a la recolección concretamente.

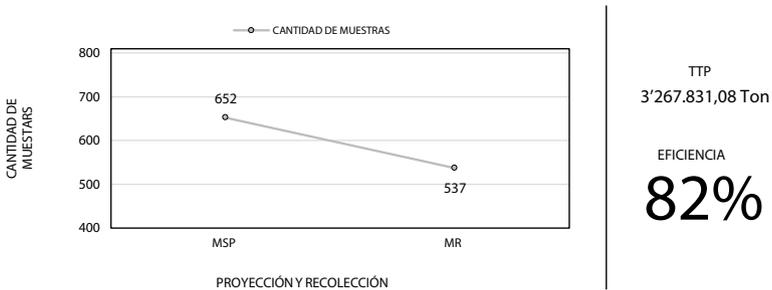
Figura 10. Eficiencia de recolección por mes



Nota. En este gráfico se representa la eficiencia de recolección por mes, teniendo en cuenta la información ofrecida por la Figura 9. Elaboración propia.

Sabiendo que la eficiencia de recolección no es más que la relación que existe entre muestras proyectadas para recolectar (MSP) y muestras recolectadas (MR), se tiene entonces la medida de rendimiento del año correspondiente, obteniendo lo siguiente:

Figura 11. MR - Periodo anual



Nota. En este gráfico se representan todas las muestras recolectadas (MR) en comparación con las muestras según proyectado (MSP), teniendo en cuenta que es el resumen a fin de cuentas del Ejemplo de aplicación E. Elaboración propia.

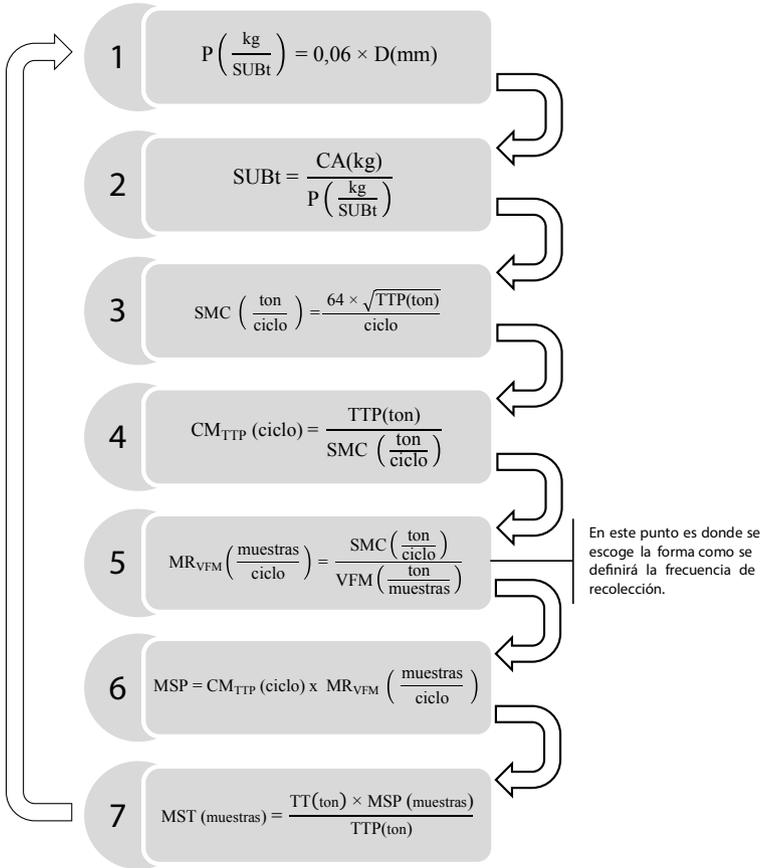
Como se ha podido mencionar, la coordinación del proceso para recolección depende de muchos factores, algunas veces no controlables (clima, voladura, áreas no disponibles, entre otras), pero la verdadera importancia radica en la buena ejecución del esquema matemático planteado para definir el patrón lógico que progresivamente irá brindando pautas para el desarrollo de las diferentes actividades que en conjunto definen el proceso.

Se ha propuesto una metodología donde lo más importante es la cantidad de carbón proyectada para extracción mensualmente, lo que obliga en algunas ocasiones a actualizar de manera continua los modelos geológicos, para tener cálculos definidos y parcialmente precisos cuando de reservas probadas se habla.

Es importante tener en cuenta que, a lo largo de todo un año en mina operativa se hacen necesarios los informes de gestión a ciertos periodos de tiempo (mensual, trimestral, entre otros), con el fin de sentar bases en el análisis y desarrollo de herramientas o estrategias de optimización en procesos.

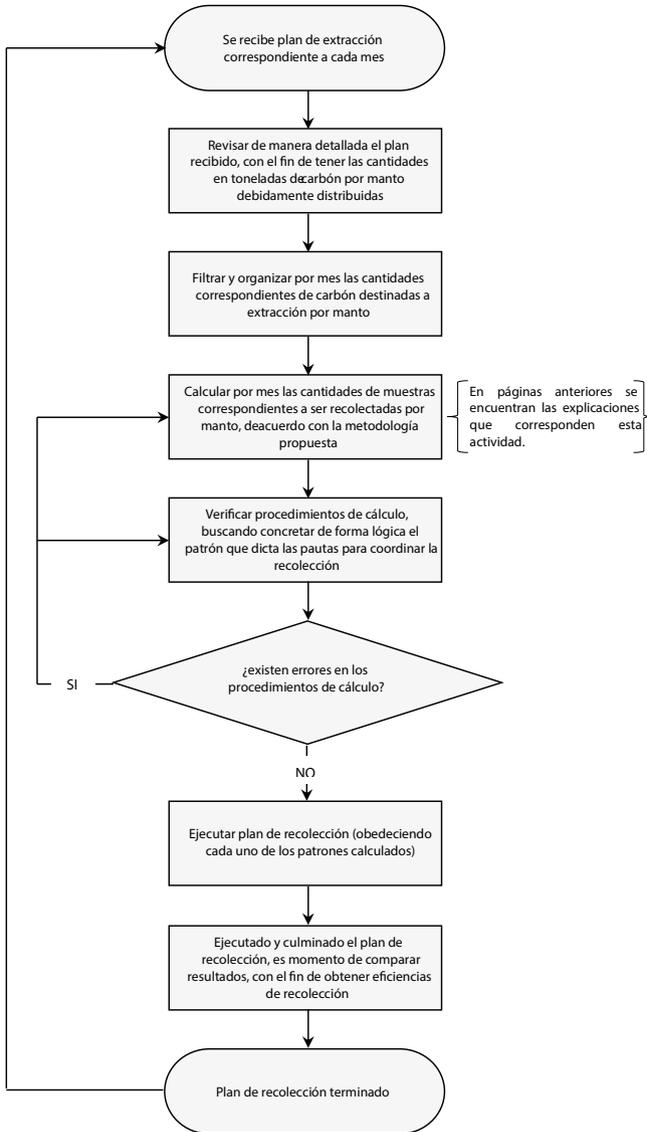
En resumen, el cálculo de la cantidad de muestras a recolectar en zonas de explotación se reduce a la secuencia progresiva del siguiente esquema, obedeciendo periodos mensuales en cuanto a toneladas de carbón proyectadas para explotación.

Figura 12. Ciclo específico de coordinación



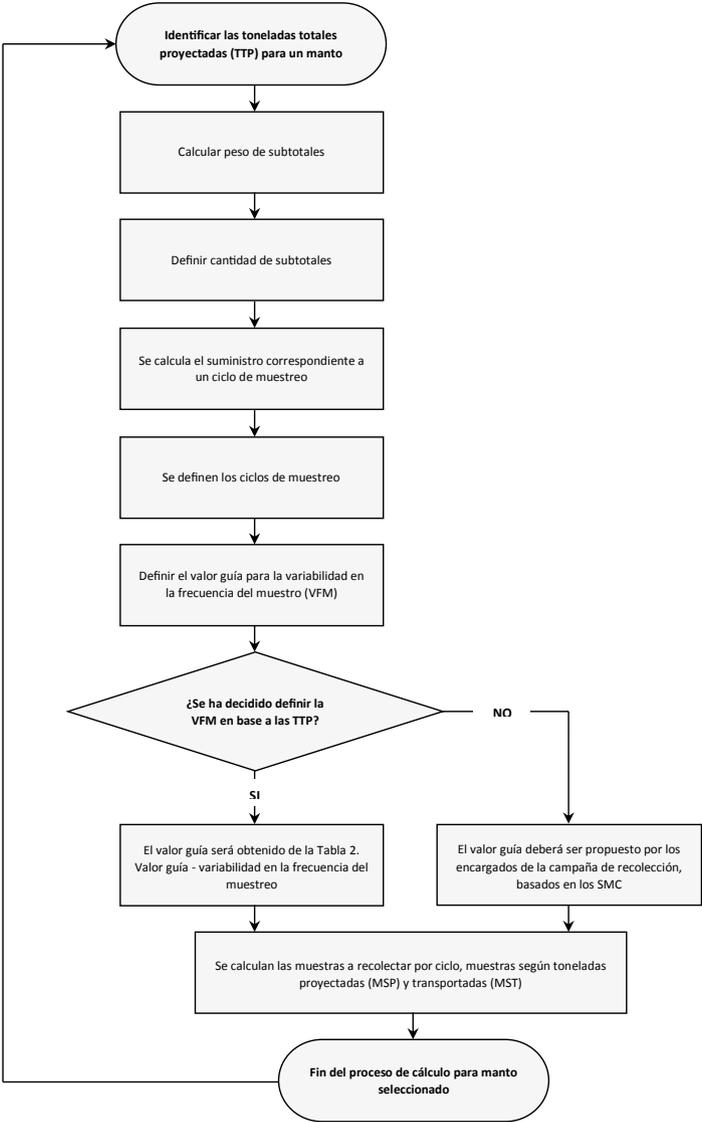
Nota. En este esquema se muestra el orden repetitivo de ejecución de la estructura matemática. Elaboración propia.

Figura 13. Flujograma general para planeación estratégica



Nota. Este flujograma muestra el orden lógico general para la planeación estratégica. Elaboración propia.

Figura 14. Flujograma específico para cálculo de muestras



Nota. En este flujograma se expone la secuencia para el cálculo de la cantidad de muestras. Elaboración propia.

Es importante tener en cuenta los diagramas anteriormente planteados (figuras 13 y 14), con el fin de comprender y sobre todo diferenciar cada una de las actividades que enmarcan todos los procesos relacionados con el cálculo de las cantidades de muestras a ser recolectadas en zonas de explotación.

El primer diagrama propone de manera generalizada el proceso que se debe tener en cuenta desde que el plan de extracción es entregado por planeación, hasta que es terminada la campaña o plan de recolección de muestras (planeación estratégica), pero sin tener en cuenta de manera específica cómo es el cálculo de las diferentes cantidades de muestras por recolectar en cada manto; pues, dicha especificación, se encuentra plasmada en el segundo diagrama, donde se muestran las actividades que se deben cumplir para concretar toda la metodología de cálculo en un solo manto de carbón. En pocas palabras, estos diagramas presentan en resumen cada uno de los apartados contenidos en este documento, bien sea entendible el deber de cada lector para analizar y comprender las explicaciones expuestas para cada una de las situaciones propuestas, teniendo en cuenta las variaciones de los planes de extracción por consecuencias de eventos no controlables.

Conclusión

Los mantos de carbón se comportan como bloques orgánicos en algunas ocasiones indefinidos, es decir, si se sabe que el proceso de formación del carbón es completamente dependiente de la descomposición temporal de diversos tipos de plantas entre otros seres orgánicos, puede ser posible que el comportamiento presentado en una pequeña porción del bloque no sea el mismo que en otro seleccionado al azar, es por eso que en definitiva todos los procesos de muestreo deben tener consigo la definición de una cantidad específica y variable de muestras a ser recolectadas, teniendo en cuenta toneladas proyectadas para extracción.

Se conoció el proceso de cálculo para definir la cantidad de muestras a recolectar en zonas de explotación, el cual se convirtió en base importante para determinar todos aquellos factores que definen los puntos para desarrollar e implementar de forma constante mejoras y de esa manera concluir que el porcentaje de recuperación o eficiencia de muestreo puede presentar variaciones positivas siempre y cuando existan condiciones que brinden pautas para coordinar las labores que enmarcan el proceso.

Se recomienda seguir de forma coordinada cada una de las condiciones que el esquema brinda no solo por definir patrones lógicos de muestreo, sino por la obtención de muestras que puedan representar el comportamiento variable que los mantos de carbón pueden llegar a presentar, teniendo en cuenta que un bloque o manto no precisa su comportamiento de forma equilibrada en toda su disposición, pues no es lo mismo recolectar una muestra por día que recolectar tres días a día, de acuerdo a las características geométricas que el manto pueda tener y las toneladas transportadas día a día.

En última instancia, es muy importante dejar claro que los argumentos utilizados en las campañas de muestreo mensuales sobre los mantos de carbón pueden hacer que se pierda objetividad en relación con el propósito de garantizar la calidad del carbón para los clientes, ya que hay procesos de mezcla, producción simultánea en varios frentes y variaciones en las condiciones de los mantos por presencia de agua,

acumulación de material en el techo y el piso, efectos de la meteorización y la existencia de intercalaciones. A pesar de lo mencionado anteriormente, sigue siendo válido planificar la toma de un número adecuado de muestras como un punto de referencia para su comparación con la cantidad de muestras procesadas en los laboratorios.

Referencias

- AJS Sam, S. (2020). *Green Coal Mining Techniques 2020*. MDPI Books. https://www.google.com.co/books/edition/Green_Coal_Mining_Techniques_2020/XeoOEAAAQBAJ?hl=es&gbpv=1
- ASTM. (2022). Standard Practice for Collection of Channel Samples of Coal in a Mine (ASTM D4596 - 22). <https://www.astm.org/d4596-22.html>
- Ecocarbón. (1995). *Normas generales sobre muestreo y análisis de carbones*. Grafivisión Editores.
- Fuentes, R., Molina, J., & Blandón, A. (2018). Colombia Parámetros explosivos para muestras de carbón (Antioquia, Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, (17), 19-38. <https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a1>
- Herrera Arango, J. (2005). *EL CARBÓN COLOMBIANO, fuente de energía para el mundo*. Ministerio de Minas y Energía. https://www1.upme.gov.co/Hemeroteca/Impresos/Cadena_carbon_ESP_2005.pdf#search=CADENA%20DEL%20CARB%C3%93N
- Martin, D., & Stacey, P. (2017). *Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks*. CSIRO PUBLISHING. https://www.google.com.co/books/edition/Guidelines_for_Open_Pit_Slope_Design_in/WvIFDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1
- Mejía, L. (2014). *El carbón, origen, atributos, extracción y usos actuales en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá) - Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/80036/El%20carb%C3%B3n%209789587617283.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Rincón Mesa, M. A., Gómez M, H., & Monroy V, W. O. (2010). *El carbón. Muestreo, análisis y clasificación de recursos y reservas*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/77>
- Rincón Mesa, M. A., & Monroy V, W. O. (2012). *El carbón colombiano. Recursos, reservas y calidad*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/64>

En orden de su importancia, *Muestreo de carbón: Una guía de análisis para el cálculo de la cantidad de muestras a recolectar en zonas de explotación*, es un escrito sobre coordinación y optimización de procesos mineros que pone a disposición una metodología de cálculo para definir la cantidad de muestras de carbón destinadas en campañas de muestreo, siempre y cuando se ejecuten en frentes expuestos (en producción) y sean geoméricamente permitidos para quienes realizan la labor.

