

MEDICIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA OPERACIÓN DE DESPACHO DE CARBÓN A TRAVÉS DE MODELOS ESTADÍSTICOS R&R

MEASURING AND IMPROVING THE OPERATION OF COAL DISPATCH THROUGH STATISTICAL R&R MODELS

MARTIN DARIO ARANGO SERNA,

Ph.D. Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería de la Organización, Director grupo GICO, Universidad Nacional, mdarango@unal.edu.co

RODRIGO ANDRÉS GÓMEZ M.

M.Sc. Magister en ingeniería administrativa, Docente Tecnológico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, rodrigomez1986@gmail.com

JULIAN ANDRES ZAPATA CORTES

M.Sc. Magister en ingeniería administrativa, Docente tiempo Completo Institución Universitaria ESUMER, jzapatac@esumer.edu.co

Recibido para evaluación: 24 de mayo de 2012 / Aceptación: 03 de Mayo de 2013 / Recibida versión final: 6 de Junio de 2013.

RESUMEN: El presente artículo tiene como objetivo presentar una propuesta para medir la variabilidad del pesaje en la operación de despacho del carbón, en una mina de explotación de mediana escala, ubicada en el departamento de Boyacá, a través de la aplicación de la metodología estadística de Reproducibilidad y Replicabilidad (R&R). A partir del desarrollo del artículo, se puede concluir que la metodología R&R permite identificar el comportamiento, causas y factores críticos, relacionados con la báscula y operarios, los cuales afectan la variabilidad de las mediciones de pesaje del carbón, que para la empresa en estudio, impacta en los costos logísticos de transporte y en la satisfacción de los clientes. Además, el enfoque desarrollado permitió incluir herramientas cuantitativas, en un proceso logístico crítico para la sostenibilidad de las empresas y el aprovechamiento de los recursos mineros.

PALABRAS CLAVES: Logística, Minería, Gestión de almacenes, Despacho, Repetibilidad, Reproducibilidad (R&R).

ABSTRACT: This paper aims to present a proposal to improve efficiency and decrease the variability of weighing on the dispatch operation of coal medium-sized mine, located in Boyacá through the application of the statistical methodology of Reproducibility and Repeatability (R & R). With the development of the paper, it can be concluded that the methodology R & R can reduce the variability of measurements of weighing coal, which, impacts the logistical costs of transportation and the customer satisfaction. Moreover, the approach developed allowed include quantitative tools in a logistics process, critical to the sustainability of mining and exploitation of mineral resources.

KEYWORDS: Mining Logistics, Warehouse Management, Dispatch, Coal, Repeatability and Reproducibility (R&R).

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, la logística ha cobrado importancia en diferentes sectores económicos, incluyendo la minería, por su impacto en la satisfacción de los clientes, los costos de operación, las relaciones con proveedores, distribuidores y otros actores de la cadena de suministro. Por su parte, el despacho es una operación logística que hace parte de la minería, la cual se encarga de verificar y enviar los pedidos de los clientes, intentando garantizar las fechas y cantidades de los productos vendidos, de allí la importancia de su adecuada planificación, ejecución, control y mejoramiento.

El presente artículo tiene como objetivo, presentar una propuesta para medir la variabilidad del pesaje en la operación de despacho del carbón, en una mina mediana ubicada en Sogamoso, municipio del departamento de Boyacá, a través de la aplicación de la metodología estadística de Reproducibilidad y Replicabilidad (R&R). El público del artículo incluye investigadores y profesionales interesados en la utilización de técnicas estadísticas en operaciones logísticas mineras.

La metodología utilizada para desarrollar el artículo, incluye la descripción y caracterización de la operación de despacho de empresas mineras, a partir de la revisión de información secundaria contenida en libros, revistas

científicas y comerciales relacionadas con el tema. De otro lado, se desarrolla un caso de aplicación, en el cual se describe la operación de despacho y pesaje del carbón, para posteriormente desarrollar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R), que permite reducir la variabilidad de esta operación.

Finalmente, se puede indicar que el artículo se divide en tres partes. En la primera parte, se presentan los conceptos de logística y operación de despacho en la minería del carbón. En la segunda parte, se revisan las características y aplicabilidad de los estudios R&R en la operación de despacho, realizando énfasis en el pesaje del carbón. Por último, se desarrolla un caso de estudio del método R&R en el pesaje de carbón para despacho en la empresa de estudio, que permite ejemplificar el uso de la técnica estadística R&R como estrategia de control, para contribuir a la eficiencia y orientación hacia la satisfacción de las necesidades de los clientes.

2. LOGÍSTICA, GESTIÓN DE ALMACENES, OPERACIÓN DE DESPACHO EN LA MINERÍA DEL CARBÓN Y RELACIÓN CON LOS ESTUDIOS R&R

La logística consiste en el flujo de información, productos y dinero en la cadena de suministro, lo cual permite desarrollar los procesos e interacciones que se realizan entre proveedores, productores, distribuidores y clientes (Frazelle y Sojo, 2007). Por otra parte, la logística también puede ser concebida como planeación, implementación y control del flujo de información, productos y servicios entre el punto de origen hasta los clientes, con el fin de satisfacer sus necesidades (Gold y Seuring, 2011; CSCMP, 2010).

En el ámbito de la minería del carbón, la logística ha cobrado importancia en la productividad y la satisfacción de los clientes, ya que esta permite planear, ejecutar y controlar las actividades de aprovisionamiento de insumos y servicios, administración de inventarios, gestión de almacenes, servicio al cliente, transporte y distribución (Arango et al., 2010; Correa y Gómez, 2010). En la minería, se hace imperante realizar procesos logísticos adecuados en las operaciones de explotación, beneficio y transformación del carbón, ya que la eficiencia y eficacia en el uso de recursos y atención de los pedidos de los clientes, depende de una adecuada gestión logística (Arango et al., 2010; Correa y Gómez, 2010).

En la logística de la minería del carbón, el proceso de gestión de almacenes puede ser considerado de alto impacto en la eficiencia y la productividad, ya que este permite administrar adecuadamente el inventario y las relaciones con los proveedores, respecto a la recepción de los insumos, equipos y herramientas utilizados en los diferentes procesos. Además, la logística permite gestionar el almacenamiento del carbón después de los procesos de extracción, beneficio o transformación, lo cual contribuye a mejorar la operación y la capacidad de atención de los pedidos, permitiendo reducir los costos totales de estas actividades.

La gestión de almacenes en la minería del carbón puede ser clasificada en diferentes tipos, resaltando los almacenes de materias primas, insumos, equipos y herramientas, tanto en las minas, como en los centros de distribución y acopio de carbón. La figura 1, muestra como estos almacenes son utilizados dependiendo de la etapa de producción minera.

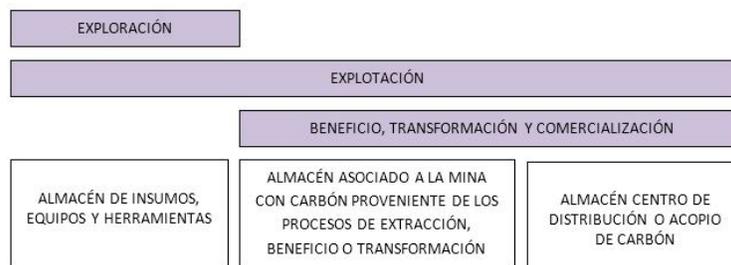


Figura 1. Tipos de gestión de almacenes para la minería del carbón.

En los diferentes tipos de gestión de almacenes para el carbón, generalmente se desarrolla un conjunto de operaciones, tales como recepción, acomodo,

almacenamiento, preparación de pedidos y despacho, las cuales permiten utilizar adecuadamente los recursos, alcanzar los objetivos operacionales y atender las

necesidades de los clientes (Frazelle y Sojo, 2007). A continuación, se detallan algunas operaciones y recursos que se utilizan en cada uno de los tipos de gestión de almacenes descritos con anterioridad (Frazelle y Sojo, 2007; Van Den Berg, 2007; Baker y Canessa, 2009; Correa y Gómez, 2009 y Gómez, 2010). Es importante

resaltar, que después de realizar una búsqueda bibliográfica exhaustiva, no se identificaron autores que describan la gestión de almacenes de manera detallada desde la perspectiva logística que se realizará en este artículo. En la Tabla 1, se muestran las operaciones de la gestión de almacenes en la minería del carbón.

Tabla 1. Operaciones de la gestión de almacenes en la minería del carbón.

Almacén de insumos, equipos y herramientas	
Se realizan operaciones de recepción, acomodo y almacenamiento de los insumos, equipos y herramientas.	
Para los insumos, se realizan el descargue e inspección, con el fin de garantizar que estos cumplan con las especificaciones de los clientes.	
Los equipos y herramientas se reciben e inspeccionan cuando son adquiridos de los proveedores. Pero puede ser común realizar la recepción e inspección, después de que estos son utilizados en la operación minera para garantizar su buen estado.	
Las operaciones de preparación de pedidos y despacho de insumos, equipos y herramientas, contribuyen a que los procesos de exploración, explotación, beneficio y transformación se realicen adecuadamente.	
Almacén asociado a mina	Almacén centros de distribución o acopio
Recepción: Se realiza la recepción del carbón proveniente de la mina, que puede consistir en la inspección, pesaje y registro de las características químicas respecto a la humedad, cenizas, entre otras.	
Acomodo: Consiste en trasladar el carbón desde la zona de recepción hasta la de almacenamiento, a través del uso de equipo de manejo de materiales.	
Almacenamiento: Permite mantener, proteger y gestionar el carbón, después de que este pasa por los procesos de explotación, beneficio o transformación.	
Preparación de pedidos: A partir de los pedidos de los clientes, se debe recoger la cantidad y tipo de carbón de la zona de almacenamiento. Esta operación puede incluir el acondicionamiento o embalaje del carbón según las especificaciones del cliente.	
Despacho: Una vez el carbón es preparado, este debe ser inspeccionado y cargado a los medios de transporte. En el caso del carbón que proviene del proceso de extracción o beneficio, el despacho debe considerar su caracterización química y el pesaje del carbón para garantizar que su envío, a los centros de acopio, distribución y venta a los clientes, sea adecuada.	
Crossdocking: En los centros de acopio o distribución se utiliza esta operación, con el fin que el carbón proveniente de la mina o su almacén asociado, se reciba y el producto no se almacene, si no que se envíe a la operación de despacho, para atender pedidos de los clientes. Inclusive, en esta operación se pueden realizar actividades de consolidación, desconsolidación o transbordo del carbón según las exigencias del mercado.	

De las diferentes operaciones de la gestión de almacenes para la minería del carbón revisadas y descritas, se puede indicar que la recepción, el almacenamiento, la preparación de pedidos y el despacho, suelen ser comunes e indispensables para que las empresas gestionen adecuadamente el inventario del carbón y atiendan adecuadamente los pedidos de los clientes,

de allí la importancia de su adecuada planeación, implementación y control.

El despacho es una operación de la gestión de almacenes de la minería del carbón, que genera impacto en la eficiencia y eficacia de las relaciones entre la empresa proveedora y el comprador, ya que por medio

de este, se entregan los pedidos a los clientes a través de procesos logísticos de transporte y distribución.

2.1. Operación de despacho y pesaje en la minería del carbón

La operación de despacho puede ser entendida como el momento en que los productos, en este caso el carbón, están en el puerto o proceso de embarque. Por lo anterior, se requiere la verificación de la cantidad a enviar a través de la actividad de pesaje, la identificación de daños o el incumplimiento de especificaciones pactadas con los clientes, la revisión de la documentación y cargue al medio de transporte, en que se realiza el traslado del carbón (Hamdan y Rogers 2008; Baker y Canessa, 2009; Gu et al., 2010).

La operación de despacho involucra el uso de los siguientes recursos:

- Recursos humanos u operarios.
- Equipos de manejo de materiales como: montacargas, bandas transportadoras, retroexcavadores o cargadores.
- Tecnologías de Información y Comunicaciones tales como: WMS (Warehouse Management System), ERP (Enterprise Resourcing Planning), entre otros.
- Equipos de pesaje o básculabásculas, muelles de cargue y plataformas niveladoras.

Dentro de las actividades de despacho de carbón, el pesaje es una actividad crítica, ya que permite determinar los costos de transporte y garantizar el cumplimiento de los pesos máximos de carga a movilizar establecidos por la ley, además de entregar las cantidades correctas de carbón negociadas (Tompkins y Hamerlink, 2004; Frazelle y Sojo, 2007; Correa y Gómez, 2009).

2.2. Estudios estadísticos de repetibilidad y replicabilidad (R&R) aplicados en las operaciones de despacho en la minería del carbón

En la operación de despacho de carbón, es fundamental garantizar que los equipos de pesado o básculas, se encuentren calibrados y sean estables en las mediciones

en el tiempo, buscando reducir su variabilidad. Esta variabilidad, no solo depende de su operación, sino también de la variabilidad de los equipos de medición y los operadores que toman (miden) los datos, ya que estos afectan su precisión y exactitud (Mason et al., 2003; Gutiérrez y De La Vara, 2009). La precisión se relaciona con la variación que se obtiene al medir un producto o procesos, con un mismo equipo de medición e iguales operadores. Por su parte, la exactitud se refiere a la desviación que tienen las mediciones respecto a un valor estándar o referencia definido como aceptable.

Para controlar la variabilidad asociada a la precisión de los equipos de medición o básculabásculas de pesaje, en la operación de despacho en la minería del carbón, se puede utilizar el método estadístico de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) (Gutiérrez y De La Vara, 2009; Montgomery, 2004). En el pesaje, la repetibilidad se relaciona con la variación en las mediciones del peso de la carga del camión a enviar, cuando se utiliza una báscula que es manipulada por un solo operario. Por su parte, la reproducibilidad consiste en medir la variación en el pesaje de la carga, cuando la báscula es manipulada por diferentes operarios.

El enfoque del estudio R&R en la minería del carbón, permite mejorar la precisión de la operación de despacho a través de técnicas estadísticas, lo que permite el mejoramiento de los procesos logísticos bajo un enfoque de eficiencia, eficacia y productividad.

Luego de realizar una revisión y análisis de libros y revistas científicas relacionadas con la operación de despacho en la minería del carbón, y en específico con el pesaje del mismo, no se identifican propuestas específicas enfocadas en la solución de estos problemas. Lo que se pudo encontrar, son propuestas genéricas relacionados con el tipo de básculas y métodos para la medición de su precisión, pero sin contextualización alguna con la minería del carbón. Algunas de los artículos identificados en la literatura fueron: Metsaev et al. (2001) y Hwang (2006).

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada se fundamentó en realizar una contextualización teórica de la actividad de pesaje en la operación de despacho, y en la relación con la técnica estadística de repetibilidad y reproducibilidad

R&R para empresas de minería del carbón térmico, esta última basada en la revisión de información secundaria, obtenida de libros, revistas científicas e informes del sector.

Después de esta revisión, se propuso la adaptación de la técnica R&R para la medición y control de la variabilidad de la actividad de pesado con báscula, en la operación de despacho en empresas mineras de carbón térmico. Para ello, se desarrolló un estudio de caso que incluye etapas como: descripción de la

empresa, caracterización de la operación de despacho y la presentación de los componentes del estudio R&R, adaptado al ámbito del despacho de carbón. Para realizar el análisis estadístico, se utilizan datos del peso de la carga en toneladas despachados por la empresa analizada. Finalmente, se presentan las conclusiones que se obtienen del desarrollo. La figura 2, presenta el esquema metodológico utilizado para desarrollar el estudio de R&R en la actividad de pesado en la operación de despacho.

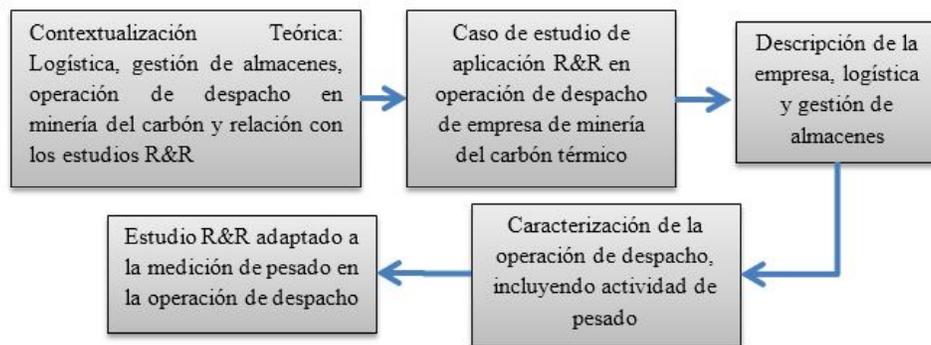


Figura 2. Metodología de medición de báscula en operación de despacho basado en R&R.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para ejemplificar el uso de los estudios R&R en la actividad de pesado con báscula en la operación de despacho, se desarrolló un caso de estudio, basándose en una empresa minera de carbón térmico de escala mediana (tecnificación intermedia de las operaciones, y actividad principal la explotación). A partir del desarrollo planteado, se buscó obtener un marco metodológico que permitiera utilizar la técnica R&R, como herramienta de medición y control de la variabilidad de la báscula de despacho, lo cual debía impactar en la eficiencia, los costos de operación y la satisfacción de los clientes.

A continuación se presentan las diferentes etapas de la metodología propuesta.

4.1. Descripción de la empresa, logística y gestión de almacenes.

La empresa tomada como caso de estudio, explota en promedio 8.000 toneladas mensuales de carbón térmico para atender la demanda de diferentes empresas

ubicadas en el Valle del Cauca, Antioquia y el Pacífico colombiano. El sistema logístico de esta empresa minera cubre los eslabones de explotación, beneficio, almacén (insumos y materiales), almacenamiento en patios o centro de distribución y transporte hasta el cliente final. En el eslabón de patio de almacenamiento, se realiza la operación de despacho y cargue de camiones, principalmente volquetas.

4.2. Caracterización de la operación de despacho, incluyendo la actividad de pesado de la carga.

La tabla 2 presenta la caracterización de la operación de despacho y pesaje, lo cual permite conocer el estado actual e identificar las oportunidades de mejora.

Cabe señalar que la adecuada planeación, ejecución y control de la operación logística de gestión de almacenes no solo permite garantizar que los pedidos enviados a los clientes cumplen con las condiciones negociadas, sino también el seguimiento a cabalidad de la normativa asociada al transporte de carga en Colombia.

Tabla 2. Operación de despacho de empresa de minería del carbón..

OPERACIÓN DE DESPACHO				
Objetivo	Determinar las actividades y recursos para realizar la operación de despacho, garantizando la atención de los pedidos de los clientes y exigencias legales del transporte de carga			
Alcance	Cubre desde la verificación del carbón hasta el cargue en el medio de transporte	Responsable	Administrador	
Proveedor	Entrada	Procesos	Salidas	Clientes
Cliente	Pedido del cliente y carbón para el despacho	Verificar las condiciones establecidas por el cliente, y compararlo respecto a la carga de carbón separada para el envío	Registro de Verificación	Operación de despacho
Operación de despacho	Pedidos de los clientes	Programar y asignar personal, equipos y medio de transporte al cargue y la distribución	Plan de despacho	Operación de despacho
Cliente	Pedidos de los clientes	Realizar facturas y preparar documentación asociada al despacho y transporte de carbón	Documentación despacho y transporte	Operación de despacho
Operación de despacho	Carbón para el despacho	Realizar pesaje del carbón a cargar	Registro de pesaje	Operación de despacho
Operación de despacho	Plan de despacho	Cargar medio de transporte con el carbón a despachar	Registro de despacho	Cliente
Recursos		Indicadores		
Personal		Cantidad de carbón despachado		
Herramientas		Costos de transporte		
Báscula		% de pedidos entregados a tiempo		

De la caracterización anterior, se encontró que el peso de despacho aproximado es de 10 toneladas de carbón, el cual es transportado en volquetas principalmente. Adicionalmente, se consideró la necesidad de que para este tipo de operaciones, las empresas cuenten con tecnologías de la información y las comunicaciones empresariales (TIC's) (Van Den Berg, 2007; Correa y Gómez, 2009; Zapata et al., 2010). Respecto, al personal en la operación de despacho, la empresa cuenta con un operario que se encarga de registrar la información de los pedidos, realizar y verificar el pesaje de la carga y coordinar el cargue de los vehículos.

El pesaje de los vehículos cargados en la operación de despacho, se realiza con una báscula por ejes, la cual se encuentra ubicada en el patio de almacenamiento de la empresa de minera.

4.3. Oportunidades de mejora en la medición y gestión de la variabilidad de la báscula en la operación de despacho.

En la operación de despacho, se identificó que frecuentemente se presentan las siguientes situaciones:

- Clientes que manifiestan que el carbón enviado no cumple con las cantidades negociadas en peso (kg o Ton). Inclusive, se consideran problemas con la precisión de la báscula de pesaje de camiones, en la operación de despacho.
- Multas económicas impuestas por el tránsito por sobrepasar el peso de la carga transportada.

- Sobrecostos de transporte, los cuales se pagan a las empresas que movilizan la carga de carbón de la mina hasta los clientes, debido a la descalibración o poca confiabilidad del pesaje de la báscula utilizada en el despacho (Minercol, 2004).
- Incumplimiento en los tiempos de entrega o pedidos incompletos, lo cual afecta la productividad y estabilidad de la empresa minera. En ocasiones, esta situación conlleva a reprocesos o reenvíos de cantidades de carbón a los clientes, generando mayores costos de operación (Metsaev et al., 2001).

De la caracterización y la información presentada anteriormente, se identifica que la empresa presenta una oportunidad de mejora real, en la actividad de pesaje y carga de carbón.

Una vez identificadas las oportunidades de mejora, estas fueron analizadas considerando las características técnicas y económicas de la empresa, las necesidades de los clientes y las prácticas de despacho presentadas

en libros y revistas científicas (Frazelle y Sojo, 2007; Baker y Cannessa, 2009; Gu et al., 2010).

Para desarrollar la propuesta de mejora, se propone la utilización del método estadístico de Repetibilidad y Replicabilidad (R&R), el cual permite estudiar, analizar y determinar la precisión de equipos e instrumentos de medición y la incidencia que tienen los operadores que hacen estas medidas.

4.4. Estudio R&R para la calibración de báscula de pesaje de carbón a despachar.

El estudio R&R busca determinar de manera experimental, que parte de la variabilidad total del pesaje se debe a la medición realizada por el operario, la báscula o las características del carbón a despachar. Esto permite verificar las oportunidades de mejora de manera cuantitativa, respecto a la variabilidad del sistema de pesaje. La figura 3 presenta la metodología que se utilizó en el estudio R&R.



Figura 3. Metodología de R&R utilizada.

A continuación, se desarrolla cada una de las etapas de la metodología R&R para el pesaje de la operación de despacho en la empresa minera. El enfoque desarrollado se basa en las propuestas teóricas sobre métodos estadísticos de autores como: Montgomery (2004) y Gutiérrez y De la Vara (2009). Respecto al despacho, se consideran los aportes de autores como: Baker y Canessa (2009), Gómez (2011) y Gu et al. (2010).

Definir el problema u oportunidad de mejora: El objetivo del estudio es mejorar la precisión de la medición de la báscula de pesado, en la operación de despacho, para aumentar la satisfacción de los clientes,

reducir costos y cumplir la normativa de transporte nacional.

Seleccionar dos o más operarios para realizar mediciones: Para realizar el estudio, la empresa toma la decisión de utilizar dos operarios. El primer operario (A), es la persona que normalmente realiza la medición del pesaje del carbón a despachar. El segundo operario (B), es un asistente del patio de almacenamiento, que ocasionalmente realiza despachos.

Seleccionar diez o más pedidos de carbón para despachar: Se decide seleccionar 12 pedidos de

carbón para despacho, los cuales tienen características similares en su peso. Los pedidos que se utilizaron, se midieron en el periodo de un mes. La decisión del tamaño se basa en recomendaciones encontradas en la literatura (Montgomery, 2004; Gutiérrez y De La Vara, 2009).

Decidir el número de ensayo o veces que cada operario mide el pedido: En este caso, cada uno de los dos operarios realizará dos mediciones sobre la carga de carbón a despachar.

Planear y recolectar las mediciones con los diferentes operarios A y B, para seleccionar los doce pedidos para tomar las mediciones en la báscula por eje: Se desarrolló la siguiente estrategia: A cada pedido que llega a la empresa, se le asigna un número de identificación, es decir, el primer pedido que llega, se le asigna 01, el segundo 02, etc. A través de selección de números aleatorios, se obtienen los doce pedidos para

medir el peso en el estudio. En este caso, utilizando Ms Excel, se obtuvieron los siguientes pedidos: 01, 04, 07, 08, 12, 13, 15, 17, 19, 20. Por las características asumidas en el estudio, se consideró que el tamaño de cada envío a despachar en peso se encuentra entre 7.5 y 11.5 Toneladas.

Respecto al planteamiento teórico de los estudios R&R, la recolección de los datos tiene la condición que los dos operarios deben medir el peso en la báscula para el mismo pedido. Esto se debe a que los pedidos se deben despachar casi inmediatamente después de ser pesados, y así atender las necesidades de carbón a los clientes en las condiciones pactadas.

En la tabla 3 se presentan las 12 mediciones, las cuales permitieron realizar el estudio estadístico que permite orientar decisiones y estrategias con la utilización del R&R en el despacho.

Tabla 3. Datos medidos en TON en la báscula de los pedidos de carbón despachados..

Pedido	Operario A (ton.)		Operario B (ton.)	
	Medición	Medición	Medición	Medición
	1	2	1	2
01	10,2	9,8	10,5	10,3
04	10,3	9,7	10,4	10
07	8,8	8,1	7,9	8,6
08	7,8	7,6	7,6	7,6
12	9	9,5	9,8	9,7
13	10	10	10,2	10,2
15	9,4	9,2	10,9	9,5
17	11,2	11	11,1	11,3
19	10,5	10,4	10,8	9,6
20	9,2	9,5	8,1	9,8

Realizar el análisis estadístico a través de la ANOVA: Para realizar el análisis estadístico de los datos medidos,

se realizó la medición de la variabilidad, representada por la siguiente ecuación (Gutiérrez y De La Vara, 2009):

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{carbón(c)} + \sigma^2_{oper(o)} + \sigma^2_{oper(o) \times carbón(c)} + \sigma^2_{báscula(b)}$$

$$\sigma^2_{reproducibilidad} = \sigma^2_{oper(o)} + \sigma^2_{carbón(c) \times oper(o)}$$

$$\sigma^2_{repetibilidad} = \sigma^2_{báscula(b)}$$

(1)

Se asume que σ^2 repetibilidad = σ^2 báscula (b), ya que consiste en medir la variación o error que se presenta en el pesaje del carbón a despachar, cuando lo realiza un mismo operario, es decir, se repite la medición sobre la misma carga de carbón. Por su parte, σ^2 reproducibilidad = σ^2 oper(o) + σ^2 carbón (c)x oper(o), permite medir la variación cuando se utilizan diferentes operarios que toman la medición en la báscula. Se debe indicar que se incluye la interacción entre la variabilidad de la carga de carbón con el operario, debido a que no se puede suponer la no interacción entre estos factores para el análisis estadístico, luego, esta no interacción debe probarse. Además, el modelo estadístico cumple con los supuestos de normalidad, independencia y varianza constante, lo cual garantiza la validez para el análisis de las mediciones del pesaje.

Para realizar el análisis de la precisión de la báscula, se utilizó un modelo factorial de efectos aleatorios ANOVA, sugerido por Montgomery (2004) y Gutiérrez y De La Vara (2009), lo cual implica medir la variación total en términos de sumas de cuadrados (SC), las cuales se expresan a continuación.

$$SC_{total} = SC_{carbón} + SC_{oper} + SC_{oper \times carbón} + SC_{error(báscula)} \tag{2}$$

La repetibilidad de la operación de pesaje, es la suma de cuadrados del error, que corresponde a la variabilidad de la báscula utilizada por la empresa. Respecto a los grados de libertad del modelo factorial de efectos aleatorios, se tiene que:

$$con-1 = (c-1) + (o-1) + (o-1)(c-1) + co(n-1) \tag{3}$$

Donde,

c = carbón

o = operarios

n = número de muestras o ensayos para realizar mediciones o pesaje

Otro aspecto a considerar para realizar el análisis de variabilidad de la operación del pesaje, son los cuadrados medios (CM), el cual consiste en dividir cada uno de los componentes de las sumas de cuadrados (sc) por sus respectivos grados de libertad. Respecto a los estimadores de los componentes de varianza, se tiene que (Gutiérrez y De La Vara, 2009):

$$\begin{aligned} \sigma^2_{báscula(b)} &= CM_{error} \\ \sigma^2_{carbón(c)} &= \frac{CM_{carbón} - CM_{oper \times carbón}}{on} \\ \sigma^2_{oper(o)} &= \frac{CM_{oper} - CM_{oper \times carbón}}{nc} \\ \sigma^2_{carbón(c) \times oper(o)} &= \frac{CM_{oper \times carbón} - CM_{error}}{n} \end{aligned} \tag{4}$$

Tabla 4. Tabla ANOVA de dos con interacción para sistema de medición de pesaje.

Fuente	ANOVA				
	GL	SC	MC	F	P
Carbón	9	37,5222	4,16914	26,7968	0,000
Operadores	1	0,1822	0,18225	1,1714	0,307
Carbón * Operadores	9	1,4002	0,15558	0,7313	0,676
Repetibilidad	20	4,255	0,21275		
Total	39	43,3597			

Dónde:

c =carbón

o =operarios

n = número de muestras o ensayos para realizar mediciones o pesaje

A partir de los estimadores de los componentes de la varianza (Ecuación 4), se realiza el análisis de la variabilidad que aporta la carga de carbón a despachar, el operario y la báscula utilizados en la operación de despacho de la empresa. Para realizar el análisis estadístico de la ANOVA, se utiliza el software estadístico Minitab 15 ®, el cual ofrece los siguientes resultados.

De la tabla ANOVA, se identifica que la interacción entre el pedido de carbón y los operarios (A y B) no es significativa, al igual que con los operarios A y B, ya que sus valores p son menores al 5% (0.05). Esta situación conlleva a profundizar el análisis sobre la báscula, a la que se asocia la variación que se mide por la repetibilidad.

Para determinar la contribución al problema de pesaje en el despacho de la empresa, se analizan los siguientes indicadores estadísticos:

- Porcentaje de contribución (% contribución): Mide la participación de cada uno de los componentes del sistema de medición R&R sobre la varianza total, lo cual se muestra en la tabla 5. Se tiene como criterio, que a mayor % de contribución de parte a parte (pedidos de carbón), es mejor la capacidad del sistema de pesaje para distinguir entre pesos de pedidos.
- Porcentaje de variación del estudio (% var. estudio): Se utiliza para comparar la variación del sistema de medición con la variación total del pesaje en la operación de despacho, tal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. R&R del sistema de medición de pesaje actual.

Fuente	VarComp	%Contribución (de VarComp)
R&R del sistema de medición total	0,19501	16,41

Fuente	VarComp	%Contribución (de VarComp)
Repetibilidad	0,19501	16,41
Reproducibilidad	0,00000	0,00
Operadores	0,00000	0,00
Parte a parte	0,99353	83,59
Variación total	1,18854	100,00

Tabla 5 (cont.). R&R del sistema de medición de pesaje actual.

Fuente	% Var. de estudio
R&R del sistema de medición total	40,51
Repetibilidad	40,51
Reproducibilidad	0,00
Operadores	0,00
Parte a parte	91,43
Variación total	100,00

Para analizar los resultados, se deben tener en cuenta los siguientes criterios, sugeridos por Botero et al. (2007):

- Si % R & R < 10%, el sistema de medición es aceptable.
- Si 10% <= R& R < 30%, el sistema de medición puede ser aceptable según su uso, aplicación, costo del instrumento de medición, costo de reparación.
- Si R& R > 30%, el sistema de medición es considerado como no aceptable y requiere de mejoras en cuanto al operador, equipo, método, condiciones, etc.

En este caso, se debe considerar para el análisis, que R&R es representado por el valor del estadístico % var. estudio.

Del análisis del porcentaje de contribución, se puede indicar que un 16.41% de la variación total que se presenta en el pesaje se debe a la báscula, lo cual confirma la sospecha que su calibración actual no ofrece la precisión adecuada para garantizar que los pedidos lleguen en las cantidades acordadas. Adicionalmente, la variación de los operarios A y B relacionada con la replicabilidad es del 0.0%, por lo

cual se confirma que estos no afectan las mediciones en la báscula con el carbón despachado, tal y como se puede concluir con la ANOVA.

Respecto al % de variación del estudio, se puede concluir que un 40.51% de variación de la repetibilidad en la medición del pesaje, se debe a la báscula, lo cual conlleva a concluir que este equipo es inaceptable para esta operación de despacho, ya que esta está orientada a la satisfacción de los clientes y a obtener costos adecuados de transporte, como se indicó anteriormente. Además, considerando la evaluación de los criterios planteados por Botero et al. (2007), el sistema de medición del pesaje se considera inadecuado para la empresa, ya que el % variación del estudio es mayor a 30%, lo cual indica que la variabilidad que aporta la báscula (repetibilidad) está causando problemas en la atención a clientes y altos costos, tal y como se afirmó anteriormente.

4.5. Propuestas de mejora al pesaje en la operación de despacho.

A partir de la identificación de la problemática asociada al pesaje en la operación de despacho, y la alta variabilidad asociada al equipo de pesaje, se realizan las siguientes propuestas de mejora:

- Realizar la calibración de la báscula camionera por ejes, con el fin de garantizar que su variabilidad no afecte el desempeño de la operación, lo cual tiene incidencia en la atención a los clientes y los costos logísticos.
- Después de realizar la calibración de la báscula y capacitar a los operarios en su utilización, se debe volver a realizar un estudio de medición R&R con las mismas condiciones de operación, es decir, los mismos dos operarios A y B, 12 pedidos y dos mediciones en el lapso de un mes. En dicho estudio, debe analizarse el % contribución y % de variación del estudio del sistema de repetibilidad y reproducibilidad, de la medición del pesaje en la operación de despacho.
- El % de contribución y el estudio de variabilidad en el estudio R&R para la báscula, después de la calibración, debe estar en el rango de 0 al 20% para garantizar que la operación de despacho se enfoque

a la satisfacción de las necesidades de los clientes, y que permita desarrollar los costos de transporte a niveles adecuados. En caso que dichos niveles no se alcancen, la empresa debe evaluar la alternativa de adquirir una nueva báscula, lo cual implicaría realizar una evaluación técnica y económica.

5. CONCLUSIONES

- El despacho debe considerarse como una operación crítica en la gestión de almacenes de la minería del carbón, ya que esta se encarga de verificar, acondicionar y enviar los pedidos de los clientes, garantizando tiempos de entrega y cantidades. Por lo anterior, es importante realizar un adecuado pesaje de la carga a despachar, lo cual permite realmente enfocarse en la satisfacción del cliente y en obtener los costos logísticos adecuados de transporte.
- El método estadístico de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R), permite medir la variabilidad o el error del sistema de medición de pesaje del carbón en la operación de despacho, respecto a la variación total del proceso de pesaje, logrando de esta manera establecer el impacto en la variación que proporcionan los operarios y el equipo de medición. Para el presente caso, la báscula de camiones es el elemento que generó la variabilidad en la operación de pesaje. Este enfoque permite establecer la contribución que ofrece cada componente del sistema de medición, lo cual mejora las capacidades de identificación, cuantificación y solución de mejora, en los procesos logísticos en la minería del carbón.
- Se comprobaron los beneficios que ofrece el método estadístico R&R en la identificación, priorización y mejoramiento de procesos logísticos relacionados con la medición. Este planteamiento se justifica, ya que en el diagnóstico del sistema de pesaje se identificó que un 40.51% de la variabilidad en la operación de despacho se debía al error de medición, generado por la báscula que utiliza la empresa.
- Como trabajos futuros, se puede considerar ampliar el alcance del estudio, incluyendo aspectos relacionados con estudios de estabilidad de la

báscula, exactitud de las mediciones, e inclusive analizar el impacto en el sistema de medición de rediseño de la operación o la adquisición de una nueva báscula, lo que puede permitir aumentar la productividad, la satisfacción de los clientes y disminuir los costos transporte. Además, se pueden identificar otros procesos que requieran mejorar la medición de variables críticas en la empresa de estudio, lo cual permite analizar y mejorar las condiciones de operación, contribuyendo al aprovechamiento continuo de los recursos empresariales.

REFERENCIAS

- Arango, M. D., Zapata, J. A. y Gómez, R., 2010, Estrategias en la cadena de suministro para el distrito minero de Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 28, 27-38.
- Baker, P. y Canessa, M., 2009, Warehouse design: A structured approach. *European Journal of Operational Research*, 193 (2), 425-436.
- Botero, M., Arbeláez, O. y Mendoza, J., 2007, Método ANOVA utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. *Scientia et Technica de Universidad Tecnológica de Pereira*, 37 (1), 533-537.
- Correa, A. y Gómez, R., 2009, Cadena de Suministro para el sector minero como una estrategia para la productividad. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 25, 93-102.
- Council of Supply Chain Management Professionals, CSCMP, 2010, Glossary of Terms. <<http://cscmp.org/digital/glossary/glossary.asp>>
- Frazelle, E. y Sojo, R., 2007, *Logística de Almacenamiento y Manejo de Materiales de Clase Mundial*, Bogotá: Grupo Editorial Norma. 8 p.
- Gold, S. y Seuring, S., 2011, Supply chain and logistics issues of bio-energy production. *Journal of Cleaner Production*, 19 (1), 32-42.
- Gómez, R., 2010, Desarrollo de modelo para apoyar el diseño o mejoramiento de las operaciones y recursos de la gestión de almacenes basado en simulación discreta y diseño experimental, Tesis. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2011.
- Gu, J., Goetschalckx, M., McGinnis, L., 2010, Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 203 (3), 539-549.
- Gutiérrez, H. y De La Vara, R., 2009, *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*, McGraw Hill, México, 298p.
- Hamdan, A. y Rogers, J., 2008, Evaluating the efficiency of 3PL logistics operations *International Journal of Production Economics*, 113 (1), 235-244.
- Hwang, Y., 2006, The practices of integrating manufacturing execution systems and Six Sigma methodology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31, 145-154.
- Metsaev, R., Thorn, C. y Tseytlin, A., 2001, Light-cone superstring in AdS space-time, *Nuclear Physics B*, 596 (1-2), 151-184.
- MINERCOL, 2004, *Guía Ambiental Transporte del Carbón*. Bogotá: Editorial Marín Vieco Ltda, 42 p.
- Montgomery, D., 2004, *Control Estadístico de la Calidad*. Limusa Willey, 56p.
- Van Den Berg, J., 2007, *Integral Warehouse Management: Next Generation Transparency, Collaboration and Warehouse Management System*. The Netherlands: Management Outlook Publications, 25p.
- UPME, 2007, *La Cadena del Carbón*, Bogotá: UPME. 25p.
- Zapata, J. A., Arango, M. D. y Adarme, W., 2010, Herramientas tecnológicas al servicio de la gestión empresarial. *Avances en Sistemas e Informática*, 7 (3), 87-101.