

Optimización económica de la transportación combinada camiones-elevadores en una mina a cielo abierto profunda

Economic optimization of combined truck-elevator transportation in a deep open pit mine

Manuel Fidel Sonhi-Manassa^{1*}, Ramón Gilberto Polanco-Almanza², Arístides Alejandro Legrá-Lobaina², Domingos M. dos S. Neves-Margarida³

¹Escuela Superior Politécnica de Luanda Sur, Angola.

²Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

³Universidad Agostinho Neto, Luanda, Angola.

*Autor para la correspondencia: fidelmanassa@hotmail.com

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue describir un procedimiento para diseñar un sistema de óptima eficiencia económica para el transporte minero combinado camión-elevador que tenga en cuenta la elección de los modelos de camiones y elevadores así como la cota Z_c donde se realiza el cambio de tecnología. El procedimiento de cuatro niveles que se propone permite obtener la mejor combinación entre varios modelos de camiones y elevadores para el transporte eficiente en minas a cielo abierto profundas.

Palabras clave: transporte combinado óptimo; transporte minero combinado; elevadores skip; camiones; minas a cielo abierto profundas.

Abstract

The general principle for the combined use of trucks and elevators in deep open-pit kimberlite mines is described and a procedure is established to obtain among several models of trucks and elevators the best combination for efficient transportation in this mine if it is known in advance year of the beginning of the joint use of these technologies. An optimization problem is presented whose solution is the most economical combination of trucks and elevators in the best year of application of efficient combined transport in

this mining. A exhaustive four-level procedure is described to solve this maximum problem.

Keywords: optimal combined transport; combined mining transport; elevators; trucks; deep open pit mining.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando existe una adecuada relación escombros/mineral y las características del cuerpo mineral facilitan el uso eficiente de tecnologías de minado y acarreo del escombros y del mineral, la minería a cielo abierto, es en muchos casos, la opción económicamente más conveniente para explotar un yacimiento mineral (Bajturin 2009).

Según Yakovlev, Tarasov y Shurabliov (2006) las minas a cielo abierto se clasifican a partir de las condiciones de operación del transporte minero y en función de la pendiente de los caminos y del modelo adecuado de vehículo en:

- minas de montañas –sobre el nivel del terreno y profundidad máxima de 50 m;
- minas poco profundas –con profundidad de hasta 200 m;
- minas profundas –con profundidad de hasta 400 m;
- minas extra profundas –con profundidad de hasta 600 m;
- minas super profundas –con profundidad superior a 600 m.

En los últimos años la profundidad de muchas minas a cielo abierto ha sobrepasado los 400 m-500 m, la distancia de transportación de la masa minera aumenta hasta los 8 km-10 km, los tramos con pendientes alcanzan hasta el 70 % y más de la traza total; además, con la profundización de las operaciones aumenta el volumen de rocas estériles a remover. Todo ello reduce la productividad, incrementa el consumo de energía y empeora las condiciones ecológicas (Rasskasov 2010).

En la medida en que se incrementa la profundidad en la mina, el gasto por transportación del mineral también aumenta. La transportación supera el 55 % de los gastos de explotación y puede llegar ocasionalmente hasta el 70 % de los gastos totales de explotación de la mina (Yakovlev, Batjurin y Yurabliov 2015).

El transporte automotor es el más difundido en la explotación de minas a cielo abierto profundas, incluyendo los esquemas cíclicos y cíclico-continuos. En las minas profundas a cielo abierto el traslado del mineral lo ejecuta el transporte interior que adquiere, entre otras, la necesidad de utilización de diferentes tipos de transporte minero para lograr un mejor resultado. A partir de la profundidad de 150 m los mejores índices económicos lo muestra el esquema combinado automotor-elevador *skip*, que a pesar de ello no ha tenido gran difusión debido a las limitaciones de la capacidad de carga de los elevadores que no supera las 40 t-50 t (Nikolaev 2012).

Aunque se conoce en el modelo clásico (López-Jimeno 2014) la conveniencia de emplear camiones para el transporte del mineral desde los frentes hasta algún punto intermedio de la mina de manera, que desde este punto hasta la superficie exterior el transporte se realice mediante elevadores, siempre será necesario obtener un diseño económicamente eficiente tal que considere específicamente la elección de los modelos de transporte y el mejor momento para combinarlos.

Los contextos para la optimización de transporte minero se refieren principalmente a tres escenarios: el energético, el medioambiental y el económico (González-Pernía, Días-Aguado y Folgueras-Díaz 2014; Dagdelen 2001; Vemba 2004; Rodríguez-Salinas 2013). Desde el punto de vista metodológico los enfoques son diversos y van desde la clásica programación lineal (Moncayo-Martínez 2014) hasta los recientes enfoques difusos (Bazzazi, Osanloo y Karimi 2009), metaheurísticos (Blum y Oli 2003) y mediante simulaciones (Sáez-Muñoz 2014).

El objetivo de presente trabajo fue describir un procedimiento para diseñar un sistema de óptima eficiencia económica para el transporte minero combinado camión-elevador, que tenga en cuenta la elección de los modelos de camiones y elevadores, así como la cota Z_c donde se realiza el cambio de tecnología.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir el propósito de este trabajo es necesario el conocimiento previo de:

1. las características geotécnicas, físico mecánicas y minero técnicas del terreno;
2. las características geométricas del yacimiento y un modelo de cono truncado para la minería profunda a cielo abierto o de su variante de paraboloides circular truncado;

3. el diseño de su explotación, especialmente la traza de un camino minero para la transportación del mineral mediante camiones;
4. los parámetros tecnológicos y económicos de la actividad de transportación durante la explotación;
5. las características técnicas y económicas de modelos de camiones y elevadores.

El principio básico de la investigación radica en que es posible hacer óptima la transportación a partir de los parámetros de la modelación económica y del modelo geométrico del diseño de la explotación. La metodología que se aplicó se describe mediante las siguientes tareas:

1. establecimiento de un modelo de la transportación combinada anual por camiones-elevadores en una mina a cielo abierto profunda para una cota de tránsito predefinida;
2. descripción para el modelo anterior del indicador económico anual Valor Actual Neto;
3. descripción de un procedimiento para analizar con cuál de las combinaciones de los modelos de camiones disponibles se define para cierta cota de tránsito el plan de transportación económicamente óptimo para todo el tiempo de duración del proyecto.

Para las minas kimberlíticas profundas a cielo abierto el modelo geométrico ha sido descrito (Sonhi-Manassa, Polanco-Almanza y Legrá-Lobaina 2019) en dos variantes: modelo de cono circular truncado y modelo de paraboloide circular truncado. En el trabajo citado, se explica que en ambos casos es posible determinar la traza del camino minero, tomando como parámetro decisor principal su pendiente M . Esta traza se modela mediante una secuencia de pequeñísimos segmentos rectos caracterizados por sus puntos inicial y final.

La información inicial para determinar la eficacia del sistema de transportación en una mina es la relacionada con los flujos temporales de producción que generalmente se maneja como una tabla de flujos volumétricos o máscos anuales F_i para $i=1,2,\dots, Q$ años de duración del proyecto minero. A partir de esa información se pueden diseñar diversos sistemas de transporte minero, cuya característica común es su eficacia, o sea: garantizan los flujos $F_1, F_2, F_3 \dots F_Q$ anuales planificados.

La eficiencia de cualquier actividad de transporte minero se puede caracterizar mediante el Valor Actual Neto (VAN) tal como explica. En el

caso que se estudia, el VAN se calcula para cada posible diseño de transportación mediante la expresión (1) (López-Jimeno 1991):

$$VAN_{QV} = -E_o + \sum_{j=1}^{QV} \frac{(I_j - E_j)}{(1 + TI)^j} \quad (1)$$

Donde TI es la tasa de interés y E_o es el egreso por la inversión inicial antes de comenzar el proceso de transportación; E_j son los egresos en cada año j ; I_j son los ingresos en cada año j donde se tienen en cuenta los impuestos; y QV es el año seleccionado para calcular el VAN_{QV} y realizar el análisis de la eficiencia del diseño que se considera.

También se ha descrito previamente un procedimiento para determinar los planes de transportación de mejor VAN_{QV} para las combinaciones posibles de varios (tres) tipos de camiones disponibles de los cuales se conocen sus características económicas, tales como precio, costo de explotación y mantenimiento, disponibilidad bajo las condiciones de la mina e ingresos que se obtienen por sus operaciones (Sonhi-Manassa, Polanco-Almanza y Legrá-Lobaina 2019)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Nivel 1. Procedimiento para diseñar un sistema eficaz de transporte minero mediante elevadores

Los elevadores usualmente se definen mediante secciones (metros de longitud de bandas, skip, cubetas, etc.) y en este escenario el parámetro esencial para caracterizar a un elevador de modelo j es su altura S_j .

De manera semejante a como se realiza el cálculo para los camiones (Sonhi-Manassa, Polanco-Almanza, Legrá-Lobaina, 2019) el primer paso es calcular cuántas secciones de un elevador modelo j pueden ubicarse consecutivamente en la distancia dz_i , que es el duplo de la distancia entre el origen y destino del transporte con elevadores en el año i . A este número máximo de secciones se le denota **Ne**.

El número máximo de viajes ida y vuelta de una sola sección del elevador j en un día se calcula como (2):

$$CV_{ij} = \left(\frac{24}{\frac{dz_i}{Ve_j}} \right) \quad (2)$$

Donde Ve_j es la velocidad media del elevador. Si CV_{ij} no es entero entonces se aumenta en una unidad.

Ahora pueden calcularse para $k=1, \dots, N_e$ el valor del volumen anual que transporta el elevador en el año, tal como se muestra en (3):

$$V_{ijk} = 365 \left(\frac{k}{2} \right) V_j C V_{ij} \quad (3)$$

Donde V_j es el volumen que eleva una sección del elevador j en el año i . Cuando $V_{ijk} \geq F_i$ entonces finaliza el ciclo de cálculo, entendiéndose que la propuesta es admisible y, por tanto, $K_{ij}=k$.

La propuesta es exactamente eficaz cuando se determina la velocidad adecuada para que $V_{ijk}=F_i$, en tanto garantiza exactamente el flujo solicitado. De manera condensada en ocasiones es conveniente asumir por razones de notación: $V_i=V_{ijk}$.

3.2. Nivel 2. Combinación de camiones y elevadores en una mina kimberlítica profunda a cielo abierto

El principio general es que durante un primer período de trabajo la transportación del material se realice solo mediante camiones y en un segundo período temporal se combinen los camiones para acarrear el material desde los frentes hasta cierta cota intermedia Z_c (eslabón colector) que se supone prefijada e invariante para cada etapa que se analiza; desde dicha cota intermedia hasta la superficie de cota Z_s el material se acarrea mediante elevadores (eslabón principal).

Al iniciar el diseño de esta variante se debe elegir una cota de referencia Z_c como la cota superior en el año Q_c que pertenece al intervalo $[1; Q]$. A Q_c se le define como el año en el cual se transita al esquema de transporte combinado.

En términos de años y cotas debe entenderse que durante los años $i=1, \dots, Q_c-1$ el transporte desde los frentes hasta la cota Z_s solo lo realizan camiones y se diseña mediante el procedimiento explicado por Sonhi-Manassa, Polanco-Almanza y Legrá-Lobaina (2019).

A partir del año Q_c los camiones transportan el material desde los frentes de arranque hasta la cota Z_c y desde esta cota hasta la cota Z_s el material es transportado mediante elevadores (Figura 1). Su diseño se realiza combinando el procedimiento mencionado en el párrafo anterior, conjuntamente con el procedimiento descrito en el presente trabajo.

Nótese que si se toma $Q_c=1$ entonces solo se utilizarán camiones porque $Z_c=Z_s$. Para este enfoque en ningún caso se emplearán solo elevadores.

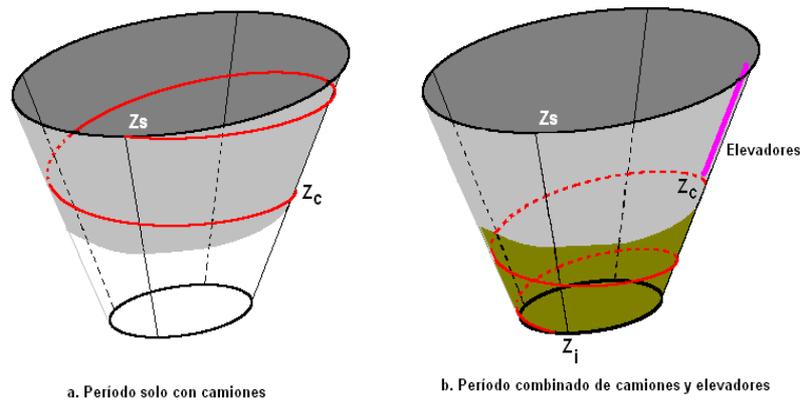


Figura 1. Sistema de transporte combinado camiones-elevadores.

El primer procedimiento básico permite determinar el sistema combinado eficaz de camiones y elevadores y su indicador de eficiencia. Consiste en:

- A) determinar para los años $i=1, \dots, Q_c-1$ un esquema de transporte por camiones con el modelo j_c y los egresos e ingresos correspondientes. En este período el camino minero y el trabajo de los camiones se desarrollará desde la cota Z_i de cada frente anual hasta la cota Z_{s_i} , garantizando en cada año el flujo F_i ;
- B) determinar para los años $i=Q_c, \dots, Q$ el esquema de transporte por camiones usando el modelo j_c y los egresos e ingresos correspondientes; en este período el camino minero y el trabajo de los camiones se desarrollará desde la cota Z_i hasta la cota Z_{c_i} , asegurando en cada año el flujo F_i ;
- C) determinar para los años $i=Q_c, \dots, Q$ el esquema de transporte por elevadores empleando el modelo j_e y los egresos e ingresos correspondientes desde la cota Z_c hasta la cota Z_{s_i} , garantizando en cada año el flujo F_i ;
- D) calcular el VAN_{CE} de la variante combinada de camiones y elevadores.

3.3. Nivel 3. Procedimiento para obtener la mejor combinación de camiones y elevadores

Fijados el año Q_c y la cota Z_{c_i} , y conocido que se tiene un total de m_c modelos de camiones y m_e modelos de elevadores entonces para obtener la combinación óptima de modelos de camiones y de modelos de elevadores se propone el denominado segundo procedimiento básico para conseguir la combinación más eficiente de modelos de camiones y modelos de elevadores para un esquema de transporte combinado cuando se fija Q_v y se conoce Q_c :

- A) se obtienen las $t = m_c \times m_e$ combinaciones posibles de los modelos de camión y elevador;
- B) para cada combinación $j = 1, \dots, t$ se aplica el primer procedimiento básico descrito en este epígrafe, alcanzándose el valor correspondiente VAN_j ;
- C) se comparan los valores de VAN_j y aquel que sea el más adecuado permite seleccionar la combinación más eficiente de camiones y elevadores para el año de tránsito Q_c .

Debe notarse que para cada posible año Q_c se adquieren combinaciones particulares y posiblemente diferentes de camiones y elevadores que maximizan el VAN para ese año.

3.4. Nivel 4. Procedimiento para optimizar económicamente el diseño de la transportación camión-elevador

A partir de todo lo explicado aún falta por determinar el valor del año A_s para el cual es más eficiente alguna de las posibles combinaciones de camiones y elevadores (o sea, económicamente óptima bajo el criterio de mayor Valor Actual Neto).

Para alcanzar ese resultado se aplica el segundo procedimiento básico descrito en el epígrafe anterior para todos los valores posibles del año Q_c , variando este entre 1 y Q (donde Q es el último año del proyecto de explotación). De esta forma se obtendrá para cada Q_c la combinación más eficiente de camiones y elevadores y el VAN_{Q_c} correspondiente.

Será seleccionado como el más eficiente aquel sistema de transporte que combine un modelo de camiones m_{C_s} y un modelo de elevadores m_{E_s} y un año $Q_c = A_s$, tal que se obtenga el $\text{MAX}_{Q_c=1, \dots, Q} \{VAN_{Q_c}\}$. En términos de teoría de optimización matemática (Blum y Oli 2003) ahora el problema se puede describir como:

Función objetivo:

Maximizar la función económica:

$$VAN(m_C, m_E, Q_c) \quad (4)$$

Restricciones o ecuaciones de enlace:

Garantizar que el volumen transportado en cada año i (V_i) es mayor o igual que el flujo volumétrico anual F_i planificado:

$$V_i \geq F_i \text{ para } i=1,\dots,Q. \tag{5}$$

Un procedimiento exhaustivo en cuatro niveles permite resolver el problema de optimización. El algoritmo correspondiente se ilustra en la Figura 2.

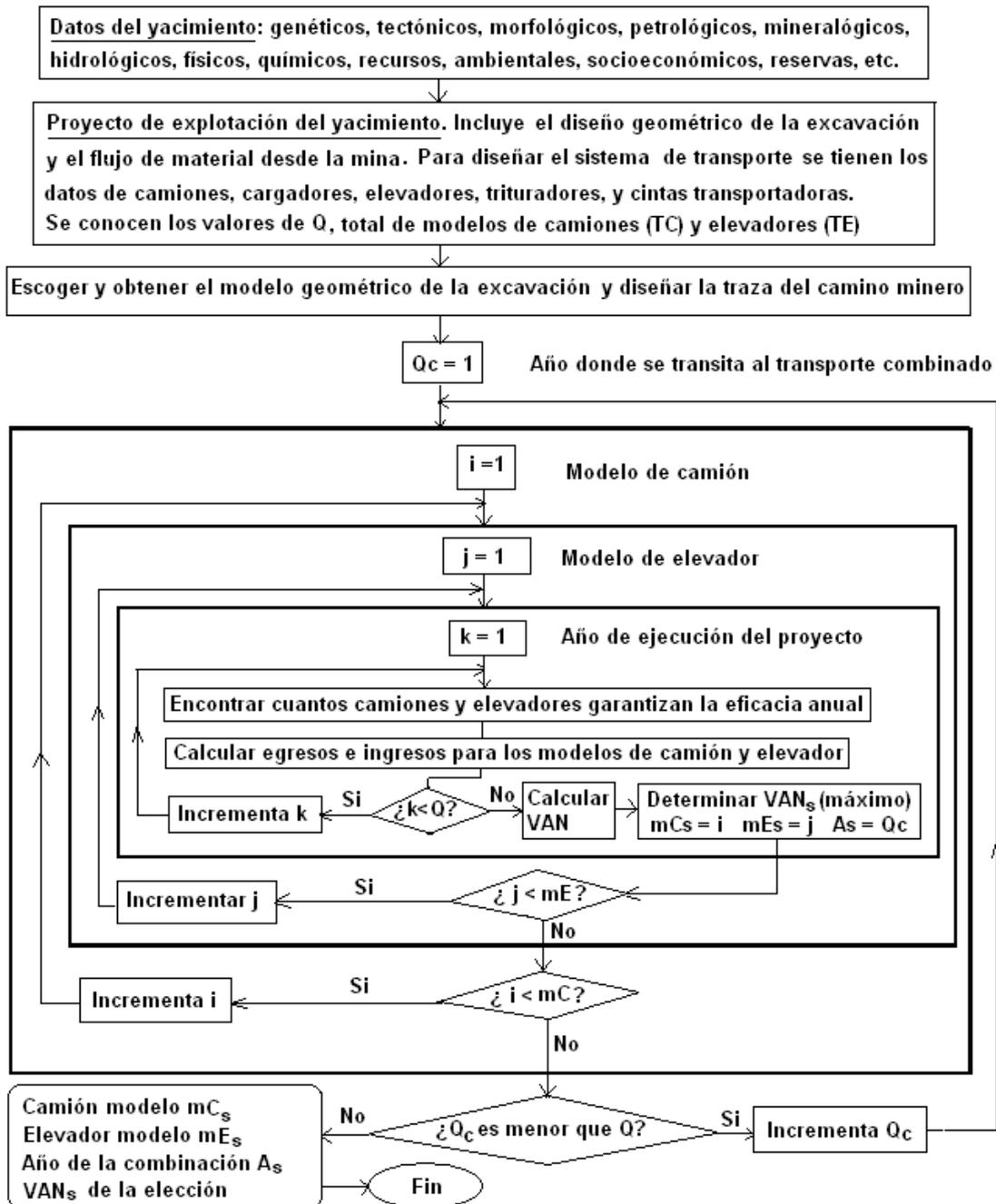


Figura 2. Algoritmo del procedimiento para optimizar la eficiencia del sistema de transporte de una mina a cielo abierto profunda.

4. CONCLUSIONES

- Se establece un procedimiento en cuatro niveles que permite obtener un sistema de transporte de óptima eficiencia económica, eligiendo entre varios modelos de camiones y elevadores la combinación recomendable para el acarreo en una mina kimberlítica profunda a cielo abierto.

5. REFERENCIAS

- Bajturin, Y. A. 2009: Tendencias actuales de desarrollo del transporte minero. *Boletín Informativo-analítico Minero*, 7: 403-414. Consultado: 20/11/2018. Disponible en: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tendentsii-razvitiya-kariernogo-transporta>.
- Bazzazi, A. A.; Osanloo, M. y Karimi, B. 2009: Optimal open pit mining equipment selection using fuzzy multiple attribute decision making approach. *Archives of Mining Sciences*, 54(2): 301-320. Consultado: 20/11/2018. Disponible en: <http://archiwum.img-pan.krakow.pl/index.php/AMS/article/view/419>
- Blum, A. y Oli, R. A. 2003: Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3): 268-308. Consultado: 20/11/2018. Disponible en: <http://kursinfo.himolde.no/forskningsgrupper/optimering/phdkurs/Metaheuristics%20in%20Combinatorial%20Optimization.pdf>.
- Dagdelen, K. 2001: Open pit optimization-strategies for improving economics of mining projects through mine planning. Proceedings of the 17 International Mining Congress and Exhibition of Turkey IMCET2001. Consultado: 20/11/2018. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/fbd8/79285038605a5ee16b0d461a69a1824bc76a.pdf>
- González-Pernía, P.; Días-Aguado, M. B. y Folgueras-Díaz, M. 2014: *Eficiencia en el transporte en minería a cielo abierto. Aplicación a una cantera caliza*. Tesis de maestría. Universidad de Oviedo. España. Consultado: 20/11/2018. Disponible en: <http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/27928/6/TFMPabloGonzalezPernia.pdf>
- López-Jimeno, C. 1991: *Manual de evaluación técnico-económica de proyectos mineros de inversión*. España: Instituto Tecnológico Geominero de España. 632 p. ISBN: 84-7840-077-X. Consultado: 20/11/2018. Disponible en: http://info.igme.es/SidPDF/067000/513/67513_0001.pdf
- López-Jimeno, C. 2014: Técnicas de explotación mineras. Foro de Desarrollo Minero Sostenible. Madrid, España. Consultado: 20/11/2018. Disponible en:

http://www.ifema.es/web/ferias/foro_minero/ponencias_2014/carlos_lopez_jimeno_comunidad_de_madrid_16jun.pdf

- Moncayo-Martínez, L. A. 2014: *Algoritmos especiales: el problema de transporte*. Grupo Editorial Patria. Consultado: 20/11/2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Luis_A_Moncayo-Martinez/publication/286252660_Algoritmos_especiales_el_problema_de_transporte/links/5667284f08ae34c89a022dca/Algoritmos-especiales-el-problema-de-transporte.pdf?origin=publication_detail
- Nikolaev, Y. A. 2012: Perspectiva de utilización de diferentes tipos de transporte en minas a cielo abierto profundas. *Revista Minera de Kazajstán*, 2: 22-26.
- Rasskasov, V. A. 2010: *Pronóstico de los parámetros de fiabilidad de camiones de gran capacidad en minas a cielo abierto profundas*. Tesis doctoral. Biblioteca Electrónica de Tesis de Doctorados. Moscú. 134 p. Consultado: 20/11/2018. Disponible en: www.dissercat.com/content.
- Rodríguez-Salinas, D. E. 2013: Modelo analítico para el dimensionamiento de flota de transporte en minería a cielo abierto: análisis de prioridades de atención según rendimiento. Tesis de maestría. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile. 156 p. Consultado: 20/11/2018. Disponible en: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/1788>.
- Sáez-Muñoz, N. E. 2014: *Simulación on-line para el despacho de camiones mineros en operaciones a cielo abierto*. Tesis de maestría. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile. 156 p. Consultado: 20/11/2018. Disponible en: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/4911>
- Sonhi-Manassa, M. F.; Polanco-Almanza, R. G. y Legrá-Lobaina, A. A. 2019: Optimización económica de la transportación con camiones en una mina a cielo abierto profunda. *Minería y Geología*, 35(1): 1-16.
- Vemba, M. M. D. S. 2004: Loading and transport system at SMC—optimization. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, abril: 139-147. Consultado: 20/11/2018. Disponible es: <https://www.saimm.co.za/Journal/v104n03p139.pdf>
- Yakovlev, A. G.; Batjurin, Y. A. y Yurabliov, A. G. 2015: Aspectos principales y nuevas direcciones de la investigación de sistemas de transportación. *Ciencia y Educación*, 4.
- Yakovlev, A. G.; Tarasov, V. L. y Shurabliov, P. I. 2006: Teoría y práctica de la utilización de recursos energéticos en la explotación minera a cielo abierto. Consultado: 20/11/2018. Disponible en: <https://cyberleninka.ru/stm-010.xml>.

Recibido: 11/03/2019

Aceptado: 24/05/2019