

Modelación de la propagación de incendios de carbon a gran escala producidos por la combustión espontánea en los frentes de explotación en minería de carbón a cielo abierto y diseño de estrategias de apagado para el cierre de minas

Modeling the propagation of large-scale coal fire produced by spontaneous combustion in the operating fronts in open pit mining and design of shut-off strategies for mine closure

Bustamante Rúa M.O.¹
Bustamante Baena P.¹
Daza Aragón A.J.¹

¹Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, Carrera 65 No. 63-20 Bloque 54, Colombia
pabustamanteba@unal.edu.co

RESUMEN

La combustión espontánea de carbón es un problema que afecta la operación minera y genera impactos ambientales, económicos, sociales y geotécnicos, siendo un tema de gran preocupación para el cierre de mina. Este fenómeno ha sido dividido en dos procesos: ignición y propagación. La propagación de incendios en mantos de carbón se desarrolla debido a un conjunto de factores como la dirección y la velocidad del aire, el fracturamiento y la temperatura. En este trabajo la transferencia de calor y la cinética química es estudiada a partir de las ecuaciones de conservación de energía y especies, respectivamente, usando el software COMSOL Multiphysics para simular la propagación de los incendios en los mantos de carbón. Se analizaron dos posibles escenarios que usualmente ocurren en las paredes de los mantos de carbón como los focos de incendio, donde la reacción se encuentra en una etapa temprana, y la pantalla completa cuando el incendio se encuentra en una etapa avanzada de propagación y se extiende en una gran área. Se encontró que la cinética de propagación del incendio cambia dependiendo de la temperatura, del fracturamiento del macizo rocoso y el área de influencia del incendio. Se planteó el método PROPEX como una propuesta innovadora de extinción de incendios a largo plazo para el correcto cierre de minas.

Palabras claves: carbón, combustión espontánea, extinción de incendios, cierre de minas.

ABSTRACT

Spontaneous coal combustion is a problem that affects the mining operation and generates environmental, economic, social and geotechnical impacts, being an issue of great concern for mine closure. This phenomenon has been divided into two processes: ignition and propagation. Fire propagation develops in coal seams because of a set of factors such as direction and wind speed, fracturing and temperature. In this work, heat transfer and chemical kinetics are studied from conservation equations of energy and species, respectively, using the software COMSOL Multiphysics to simulate the propagation of fires in coal seams. We analyze two possible scenarios that usually occur in the walls of the coal seams, such as fire focus, when the reaction is at an early stage, and the complete screens, when the fire is in an

advanced state and extends to a greater area. It was found that the propagation kinetics of the fire changes depending on the temperature, the fracturing of rock mass and the area of fire influence. The PROPEX method is proposed as an innovative long-term fire extinguishing proposal for the correct closure of mines.

Keywords: coal, spontaneous combustion, fire extinction, mine closure.

INTRODUCCIÓN

Combustión espontánea de carbón

La combustión espontánea es un tema de gran preocupación en las minas de carbón del mundo, ya que provoca problemas ambientales, al generar emisiones de material particulado y gases contaminantes a la atmósfera como el dióxido de carbono y el monóxido de carbono como se observa en la Figura 1, pérdidas económicas por el consumo de las reservas [1], problemas de inestabilidad debido a la afectación geotécnica del macizo rocoso [2] y problemas de salud pública por la cercanía con comunidades [3].



Figura 1. Incendios de carbón por combustión espontánea en la mina.

El origen de la combustión espontánea se puede explicar a partir de una secuencia de reacciones químicas y a procesos de oxidación en la superficie del carbón, ayudado de factores tales como los geológicos, estructurales, tipos de forestación cercana, cercanías a costas, mineralogía, composición, humedad relativa del aire, composición interna del carbón, etc. [4]–[8]. La propagación de incendios de carbón es generada por una secuencia de reacciones químicas, acompañadas de una intensa liberación de calor en el frente de reacción en minas a cielo abierto y puede ser estudiada teniendo en cuenta la termodinámica y la cinética química, las cuales obedecen a las ecuaciones de conservación de energía y especies, respectivamente. La detección de incendios en estado de propagación es útil para predecir su desa-

rollo en el manto y puede proporcionarnos información valiosa para controlar y extinguir los incendios de carbón, lo cual debe ser tenido en cuenta para la etapa de abandono. La etapa de cierre de minas en Colombia está enmarcada en el artículo 84 y 95 de la ley 685 de 2001, el decreto 2811 de 1974, entre otros, estableciendo el desarrollo obligatorio por parte del titular minero. El país cuenta principalmente con ejemplos en la minería de carbón a gran escala en la parte norte del país. Allí se tiene el reporte de restauración morfológica efectuada en sus áreas y la recuperación del uso del suelo. En el caso de Cerrejón, los incendios en los mantos de carbón se presentaron en mayor medida durante la operación, por lo cual la empresa ha realizado un conjunto de modificaciones con respecto al plan de cierre inicial a causa de los problemas ambientales. Desde el punto de vista técnico en la minería los procesos de cierre de mina, son tan variados como el tipo de minería puede desarrollarse, a nivel general se dice que los planes pretenden asegurar la estabilidad química, física y el uso del territorio en las áreas minadas. En este sentido, es de vital importancia realizar acciones para controlar y extinguir los incendios desarrollados en los tajos de la mina, ya que dichas áreas posterior a la explotación deben quedar en óptimas condiciones para futuros usos y adicionalmente se debe garantizar que las comunidades de la región no se vean afectadas por la presencia de gases contaminantes.

MODELOS MATEMÁTICOS

Para resolver un problema relacionado con transferencia de calor y transferencia de masa en un fluido, es conveniente comenzar con ecuaciones basadas en leyes de conservación de sistemas físicos. Estas ecuaciones incluyen: la ecuación de la energía (conservación de la energía), ecuación de conservación de las especies y la ecuación de continuidad. Para un volumen estacionario la conservación de las especies [9]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (C_i V) - \nabla \cdot J_i + r_i \quad (1)$$

donde $\partial C_i / \partial t$ es la tasa de generación de especies i por unidad de volumen, $\nabla \cdot (C_i V)$ es la tasa neta de convección de especies i por unidad de volumen, $\nabla \cdot J_i$ es la tasa neta de difusión de especies i por unidad de volumen y r_i es la tasa de producción de especies i por unidad de volumen. Para un elemento de un volumen estacionario a

través del cual fluye un fluido puro, se tiene la ecuación de energía para la transferencia de calor a través de medio poroso es [9]:

$$(1 - \theta)\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = (1 - \theta)\nabla \cdot (K_s \nabla T_s) + (1 - \theta)q_s^m \quad (2)$$

y en la fase fluida es:

$$\theta(\rho c_p) \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f u \cdot \nabla T_f = \theta \nabla \cdot (K_f \nabla T_f) + \theta q_s^m \quad (3)$$

donde θ es la porosidad del medio, c es la capacidad calorífica del sólido, c_p es la capacidad calorífica del fluido, u es el campo de velocidad a través del medio, K_s y K_f son los coeficientes de transferencia de calor del sólido y el fluido, respectivamente, q_s^m es la tasa de generación de calor (reacción exotérmica).

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para determinar valores iniciales de la simulación en COMSOL se hicieron diferentes estudios previos referentes a la velocidad de propagación y el volumen de carbón consumido bajo condiciones normales de los incendios de la mina, obteniendo valores de 5,6 a 7 cm/día. En laboratorio se desarrolló una prueba, en la cual se sometió un bloque de carbón a altas temperaturas y se miró el comportamiento de transformación de carbón a ceniza para así tener una base de la combustión de carbón. Los resultados de los ensayos para evaluar el consumo de carbón en una muestra con exceso de oxígeno fue de 59,5 cm³/min y para las muestras sin exceso de oxígeno fue de 35 cm³/min.

Simulaciones

Los balances obtenidos están constituidos por un Sistema no lineal de ecuaciones diferenciales parciales que se resolvieron por medio de métodos numéricos usando COMSOL Multiphysics que implementa método de elementos finitos (MEF). Los parámetros utilizados para la simulación se muestran en la Tabla 1, algunos de estos fueron calculados experimentalmente y otros se obtuvieron a partir de la literatura.

Tabla 1. Parámetros usados en la simulación [6], [7], [9]–[11]

	Carbón	Arenisca	Conglomerado
Conductividad Térmica (W/m K)	0,20	2,90	2,15
Densidad del Carbón (kg/m ³)	1.200	2.600	2.000
Calor específico(J/kg K)	1.130	745	819

PROPEX

El PROPEX es un método novedoso a nivel mundial que utiliza un producto compuesto por nanoclinker, sales de ácido carbónico y un agente espumante, que se usa para la extinción de incendios a alta temperatura en las minas de carbón, y además actúa como un agente ignífugo sobre el mineral evitando la propagación y reactivación del incendio. Las ventajas que tiene este método es que tiene la capacidad de extinguir incendios a alta temperatura mayores a 700 °C, generando una capa protectora en el carbón, evitando que el oxígeno entre en contacto con las paredes finales de los tajos de la mina.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se observa la tasa a la que se consume el carbón en el tiempo, dependiendo de la temperatura del incendio. Se tiene que la tasa de consumo de carbón aumenta con el incremento de la temperatura. Por lo tanto, si el manto de carbón presenta un incendio con una temperatura de 200°C, la tasa de consumo de carbón es aproximadamente 200 cm³/hora, mientras que, si el incendio presenta una temperatura de 1.200 °C, la tasa de consumo de carbón es aproximadamente 3.000 cm³/hora. Los campos de velocidades altos con valores de 0,005 y 0,001 m/s, los diámetros están asociados a fisuras en el macizo. Por otro lado, para campos de velocidades bajos con valores entre 0,0001 y 0,00007 m/s, los diámetros están asociadas a grietas para las paredes finales y tajos abandonados. En la Figura 2 se muestra la relación que existe entre la propagación de los incendios con los diámetros característicos de fractura, donde se observa que macizos con fisuras la propagación es de 10-17 cm/día, esto sujeto a la reacción química, ya si las fracturas aumentar el diámetro característico la tasa disminuye, llegando a valores de hasta 4-8 cm/día, favorecido por la convección del aire en el carbón.

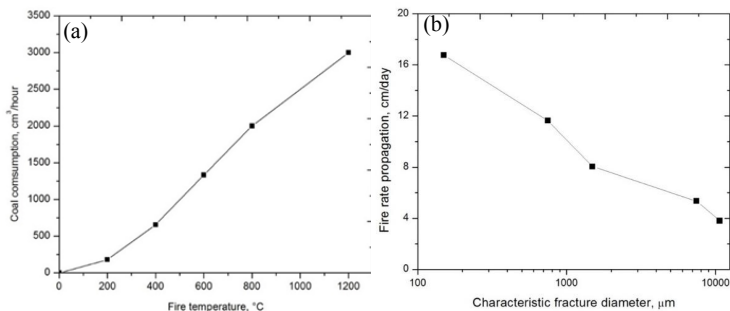


Figura 2. (a) Escala de consumo de carbón dependiendo de las diferentes temperaturas que pueden tener los incendios. (b) Tasa de propagación del incendio dependiendo de los valores de los diámetros característicos de las fracturas predominantes en el macizo rocoso.

Resultado del PROPEX

En la Figura 3, se presenta la aplicación del producto en campo en diferentes zonas donde se llevaron a cabo las pruebas.



Figura 3. Pruebas en campo del PROPEX.

Las pruebas realizadas a incendios incipientes, de mediana y gran magnitud se presentan en la Figura 4, donde se refleja una disminución drástica de la temperatura del incendio hasta su extinción, teniendo en cuenta que los incendios incipientes se lograban extinguir en un tiempo aproximado de 5 minutos, los incendios de mediana magnitud (superiores a 400 °C) se lograban extinguir en aproximadamente 15 minutos, mientras que para los incendios de gran magnitud (superiores a 750°C) se lograban extinguir en un tiempo de 30 minutos.

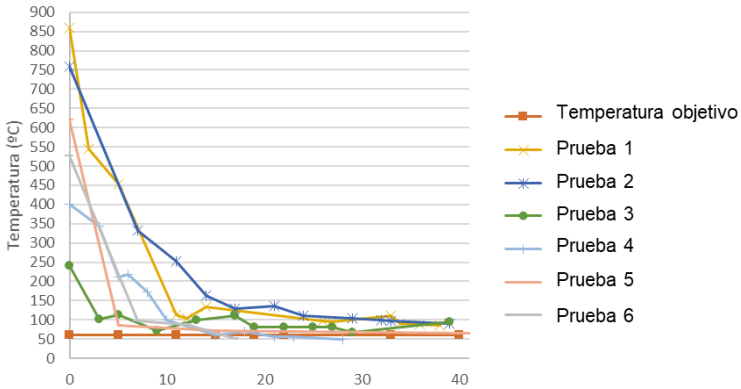


Figura 4. Distribución de temperaturas durante el tiempo de aplicación del PROPEX.

CONCLUSIONES

Las variables que inciden en la propagación de los incendios son variables intrínsecas, como la densidad, capacidad calorífica y coeficiente de conductividad térmica y las extrínsecas que son la porosidad asociado al micro fracturamiento y fracturamiento.

Las propagaciones de los incendios se pueden dividir en dos motores principales: el primer motor relacionado el comportamiento físico-químico de los carbones del Cerrejón, si el manto de carbón presenta un incendio con una temperatura de 200 °C, la tasa de consumo de carbón es aproximadamente 200 cm³/hora (1 ton—166 días~5,5 meses), mientras que, si el incendio presenta una temperatura de 1.200 °C, la tasa de consumo de carbón es aproximadamente 3.000 cm³/hora (1 ton- 12 días). El segundo motor corresponde a los factores relacionados a la actividad minera, las estructuras geológicas, los gases de combustión y la velocidad de los vientos. Todos estos factores producen un campo de velocidad de aire en el macizo rocoso, dicho campo es una expresión analítica o una interfaz de flujo de fluido. Para campos de velocidades altos (0,005 y 0,001 m/s), los diámetros característicos están asociados a fracturas de tipo fisuras con velocidades de propagación de 9-17 cm/día, mientras que para campos de velocidades bajos (0,0001 y 0,00007 m/s), los diámetros característicos están asociados a fracturas de tipo grietas con velocidades de propagación de 3-8 cm/día.

Con el método PROPEX, se logró la efectiva extinción de los incendios, lo cual fue evidenciado a partir de los posteriores monitoreos

que se desarrollaron en las zonas donde se llevaron a cabo las pruebas, lo que lo convierte un mecanismo de control de gran relevancia que debe ser implementado con el fin de garantizar el correcto cierre de minas.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Minerales CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia y a la empresa Cerrejón por el apoyo y acompañamiento brindado para el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Quintero, S. A. Candela, C. A. Ríos, C. Montes, and C. Uribe, “Spontaneous combustion of the Upper Paleocene Cerrejón Formation coal and generation of clinker in La Guajira Peninsula (Caribbean Region of Colombia),” *Int. J. Coal Geol.*, vol. 80, no. 3–4, pp. 196–210, 2009.
- [2] E. Díaz, J. Fernández, S. Ordóñez, N. Canto, and A. González, “Carbon and ecological footprints as tools for evaluating the environmental impact of coal mine ventilation air,” *Ecol. Indic.*, vol. 18, pp. 126–130, 2012.
- [3] R. B. Finkelman, “Potential health impacts of burning coal beds and waste banks,” *Int. J. Coal Geol.*, vol. 59, no. 1–2, pp. 19–24, 2004.
- [4] P. K. Gangopadhyay and K. Lahiri-Dutt, “Detecting Coalfires with Remote Sensing: A Comparative Study of Selected Countries,” *Resour. Manag. Asia-Pacific Progr.*, p. 17, 2005.
- [5] K. G. P. Nunes and N. R. Marcilio, “Determination of the kinetic parameters of Oxy-fuel combustion of coal with a high ash content,” *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 32, no. 1, pp. 211–223, 2015.
- [6] J. D. N. Pone *et al.*, “The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and Sasolburg coalfields of South Africa,” *Int. J. Coal Geol.*, vol. 72, no. 2, pp. 124–140, 2007.
- [7] W. Lu, Y.-J. Cao, and J. C. Tien, “Method for prevention and control of spontaneous combustion of coal seam and its application in mining field,” *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 5, pp. 839–846, 2017.
- [8] N. T. Moxon and S. B. Richardson, “Development of a self-heating index for coal.” *Coal Preparation*, pp. 91–105, 1985.
- [9] R. Warren M, H. James P, and C. Young I, *Handbook of Heat*

Transfer Calculations, MCGRAW-HILL., vol. 99, no. 3. New York San Francisco Washington, D.C. Auckland Bogota Caracas Lisbon London Madrid Mexico City Milan Montreal New Delhi San Juan Singapore Sydney Tokyo Toronto, 2008.

- [10] E. G. Manger, "Porosity and Bulk Density of Sedimentary Rocks," *Geol. Survey Bull. 1144-E*, p. 62, 1963.
- [11] D. Wu *et al.*, "Numerical investigation on the self-ignition behaviour of coal dust accumulations: The roles of oxygen, diluent gas and dust volume," *Fuel*, vol. 188, pp. 500–510, 2017.