Evaluación de las posibilidades de desgasificación en minas de carbón de Socotá (Boyacá, Colombia)

Degasification possibilities evaluation in Socotá coal mines (Boyacá, Colombia)

Avaliação das possibilidades de desgaseificação em minas de carvão de Socotá (Boyacá, Colômbia)

Fecha de recepción: 4 de septiembre de 2015
Fecha de aprobación: 30 de marzo de 2016

Jorge Eliécer Mariño-Martínez*
Marco Tulio Ortegón-Cuéllar**
Natalia Mariño-Santos***

Resumen

En la zona de la Peña de Socotá, en Boyacá (Colombia), se han reportado altos contenidos de gas asociado al carbón, por lo que se hicieron mediciones adicionales y se consideraron diferentes posibilidades de desgasificación. Para medir los contenidos de gas se utilizaron los sistemas de desorción de gas cánisters con control de presión y temperatura, siguiendo la metodología de USBM y GRI, y se determinaron gas perdido, desorbido y residual por separado; también se hicieron análisis inmediatos. En algunas de las muestras analizadas, los contenidos de gas alcanzaron los 100-200 pies³/t; estos contenidos presentan buenas posibilidades para aprovechar el gas como recurso energético comercial (CBM), por lo que se propone la perforación de pozos verticales para extraerlo. Esos pozos, a su vez, desgasificarían las zonas mineras donde se adelantaría la futura minería subterránea. La combinación de desgasificación y ventilación permitirá disminuir considerablemente el riesgo de explosiones. Las altas concentraciones de metano permiten plantear la posibilidad de utilizar ese gas en las minas para producir energía, o para conectarlo a la red de distribución de gas natural. La zona de Socotá tiene las condiciones ideales para adelantar un proyecto piloto que podría servir de referencia para otros proyectos de desgasificación en Colombia.

Palabras clave: carbón; cánister; CBM; desgasificación; Guaduas; metano; Socotá.

* Ph.D. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Sogamoso-Boyacá, Colombia). jorge.marino@uptc.edu.co.
** ANTEK S.A (Bogotá D.C., Colombia).
*** Profesional Independiente.

Abstract

In the Socotá area in Boyacá, Colombia, high contents of coalbed methane have been reported. In order to prove it, additional gas measurements were done and different possibilities of degassing were considered. To measure the gas content, the canisters desorption system were used, with control of pressure and temperature, according to the USBM and GRI methodology. Lost, desorbed and residual gases were determined separately, and proximate analyses were also carried out. In some samples the content of gas reached the 100-200 SCF/t. These gas contents have good possibilities for energy production (CBM) by drilling vertical wells to extract it.

Those wells would not only produce gas, but would also degas the future underground mining areas. The combination of degasification and ventilation would considerably allow a decrease in the explosions risk. The high coalbed methane content in the area could produce energy for the mining company or commercial gas for the natural gas distribution network. The Socotá area has the ideal conditions for a pilot project, which could be a model for other degasification projects in Colombia.

Keywords: canisters; CBM; coal; desgasification, Guaduas; methane; Socotá.

Resumo

Na região da Peña de Socotá, em Boyacá (Colômbia), tem-se reportado altos conteúdos de gás associado ao carvão, pelo que foram feitas medições adicionais e se consideraram diferentes possibilidades de desgaseificação. Para medir os conteúdos de gás utilizaram-se os sistemas de dessorção de gás canisters com controle de pressão e temperatura, seguindo a metodologia de USBM e GRI, e determinaram-se gás perdido, dessorvido e residual por separado; também foram feitas análises imediatas. Em algumas das amostras analisadas, os conteúdos de gás alcançaram os 100-200 pés³/t; estes conteúdos apresentam boas possibilidades para aproveitar o gás como recurso energético comercial (CBM), pelo que se propõe a perfuração de poços verticais para extraí-lo. Esses poços, por sua vez, desgaseificariam as regiões mineiras onde se realizaria a futura mineração subterrânea. A combinação de desgaseificação e ventilação permitirá diminuir consideravelmente o risco de explosões. As altas concentrações de metano permitem sugerir a possibilidade de utilizar esse gás nas minas para produzir energia, ou para conectá-lo à rede de distribuição de gás natural. A região de Socotá tem as condições ideais para realizar um projeto piloto que poderia servir de referência para outros projetos de desgaseificação na Colômbia.

Palavras chave: carvão; canister; CBM; desgaseificação; bambu; metano; Socotá.

I. Introducción

El carbón se establece como uno de los principales minerales generadores de energía, porque a su vez, produce y almacenan gas, especialmente, metano. En las minas de carbón, ese gas no se utiliza y causa accidentes y explosiones que ponen en riesgo la vida de los trabajadores, y, además, se va a la atmósfera como uno de los principales gases de efecto invernadero. Debido al riesgo que el gas asociado al carbón (también conocido como gas grisú) representa en las minas, se han establecido técnicas para desgasificar o sacar ese gas de ellas, y en algunos casos se ha utilizado como fuente para producir energía.

La zona carbonífera de Boyacá es una de las principales productoras de carbón en Colombia, especialmente hacia el norte del departamento. En la Peña de Socotá, ubicada al occidente del municipio de Socotá, en los límites con Socha (Figura 1), se han reportado varios accidentes causados por gas, y en los estudios preliminares se han reportado altos contenidos de metano [1,2]. La región de Socotá se ha considerado una de las regiones en Boyacá con mejores perspectivas para gas asociado al carbón, por contener carbones de alto rango, o bituminosos bajos en volátiles, con características coquizables [1]. Mojica y Mariño reportan contenidos de gas total que sobrepasan los 200 pies³/t, lo que corresponde a uno de los mayores contenidos reportados en Boyacá [2].

Por lo anterior, se acordó un proyecto de investigación conjunta entre la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC), para confirmar los contenidos de gas reportados anteriormente y para considerar la posibilidad de desgasificar los mantos de carbón, para disminuir riesgo de explosión y costos de ventilación, y de utilizar ese gas para producir energía localmente [3, 9], pues la zona de Socotá tiene las condiciones ideales para adelantar un proyecto piloto que podría servir de base para otros proyectos de desgasificación en Colombia. Para esto no solo fue necesario determinar las condiciones geológicas, sino también medir de manera directa los contenidos de gas en los carbones, lo cual se hizo en los mantos 1 al 7, utilizando los equipos de desorción cánister que hacen parte del "*Laboratorio de materiales, carbón, gas asociado al carbón y Shales gas*", de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Sogamoso. Además, fue necesario analizar los diferentes métodos de desgasificación, con el fin de establecer el más adecuado de acuerdo con las condiciones de la zona.

Fig. 1. Ubicación del área de estudio.

II. Marco geológico

La secuencia estratigráfica presente en el área de Socotá corresponde a una sucesión de rocas sedimentarias, conformada de base a techo por: formación Ermitaño, formación Guaduas (portadora de los carbones), formación Areniscas de Socha, formación Arcillolitas de Socha, formación Picacho, formación Concentración y depósitos cuaternarios que pertenecen al reciente (Figura 2).

Alvarado y Sarmiento (1944) [4] denominó formación Guaduas el conjunto de estratos que tienen mantos de carbón explotables, por la analogía con la formación definida por Hettner [5] en la región de Guaduas, Cundinamarca. Van Der Hammen y Hooghiemstra asignaron a esta formación una edad Maestrichtiano superior, con base en el análisis palinológico de los mantos de carbón [6]. En el área de trabajo la formación se divide en dos conjuntos litológicos, superior e inferior, y tiene cerca de 400 m de espesor.

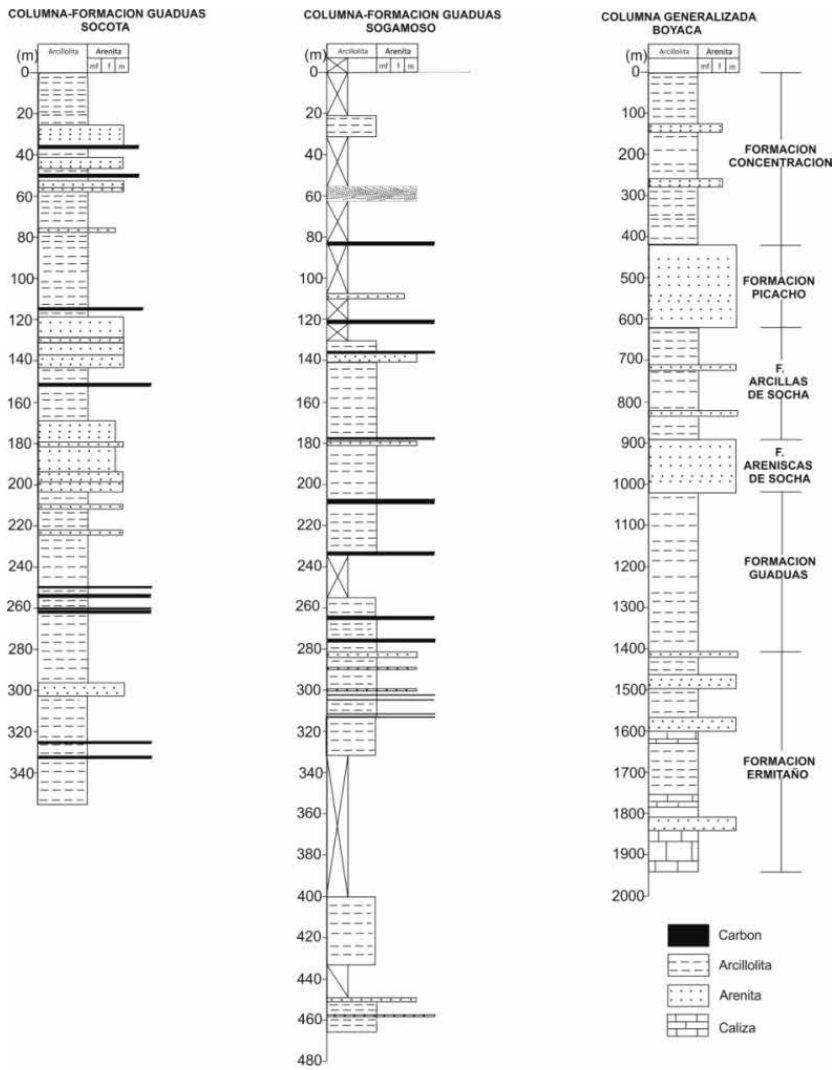

Fig. 2. A la derecha, estratigrafía regional. A la izquierda, estratigrafía de la formación Guaduas en inmediaciones de Sogamoso y Socotá (Boyacá).

El conjunto litológico inferior está compuesto de arcillolitas grises, que se encuentran intercaladas por limolitas silíceas y capas delgadas de areniscas cuarzosas de grano fino a medio y de carbón. El conjunto litológico superior es el más conocido y consta de intercalaciones de areniscas de grano fino a medio, limolitas, arcillolitas y mantos de carbón explotables, los cuales tienen espesores que varían de 0.8 a 2.80 metros. El muestreo para gas asociado al carbón se hizo sobre siete mantos muestreados en frentes de minas y perforaciones, abarcando 200 m estratigráficos (Figura 2, Tabla 3).

El anticlinal de Socotá es la estructura más sobresaliente del área, tiene una dirección NE-SW, sus flancos son asimétricos y se encuentra afectado por la Falla del Cómeza, en su núcleo, y por las fallas inversas, normales y direccionales, en sus flancos. La presente investigación se centró sobre el flanco occidental porque allí se concentra la minería en el área, por su buena continuidad regional. Su núcleo lo conforman rocas de la formación Ermitaño, y sus flancos, rocas de las formaciones Guaduas, areniscas de Socha Inferior y arcillolitas de Socha. En la Figura 3 se aprecian las labores de acceso o bocaminas (flecha grande) de la mina La Esperanza en la formación Guaduas. Igualmente, se aprecia el contacto neto con las areniscas de la formación areniscas de Socha, las cuales forman el escarpe típico de la peña de Socotá.

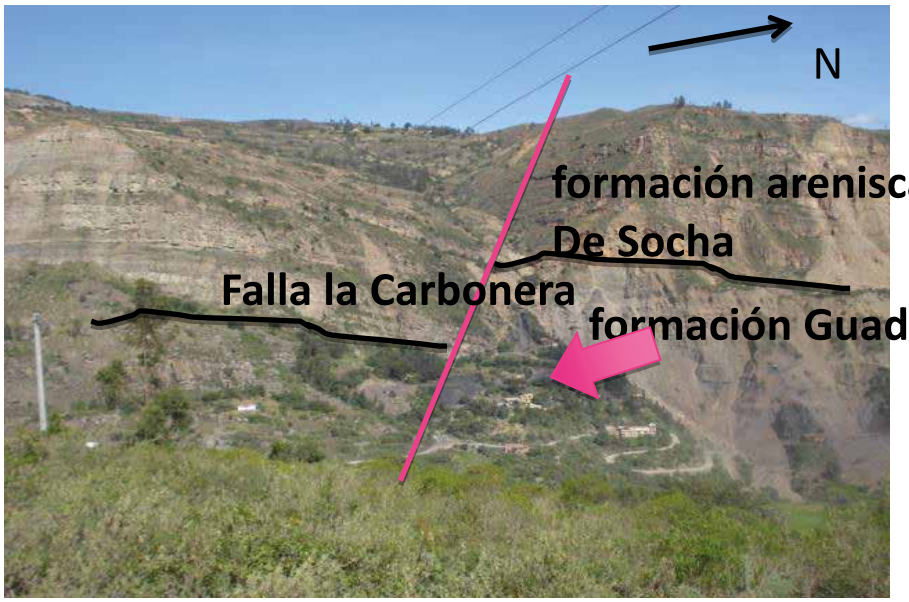

Fig. 3. Labores de acceso de la mina La Esperanza. La flecha grande indica la dirección de los inclinados (al oeste con inclinación de 45°).

La formación Guaduas reposa concordantemente sobre la formación Ermitaño, que es equivalente del grupo Guadalupe; el límite superior se localiza por debajo de unos paquetes de areniscas duras de grano grueso a conglomerática con estratificación cruzada de la formación areniscas de Socha, que presentan unos escarpes característicos a nivel regional (Figuras 2 y 3).

III. Método

Los contenidos de gas asociados en carbón en el presente estudio están basados en métodos directos de medición, que consisten en medir la cantidad de gas que tiene una muestra de carbón mediante la desorción de núcleos de perforación con los equipos de desorción cánisters (recipientes sellados herméticamente) [7,11]. El proceso de medición comprende tres métodos diferentes, teniendo en cuenta que el contenido total de gas es la sumatoria de tres componentes, así: gas perdido + gas desorbido + gas residual [1, 9]. El gas perdido corresponde al escapado del carbón entre el tiempo en que el manto de carbón es penetrado por la broca y el tiempo en que la muestra es puesta dentro del cánister y sellado. El gas desorbido es el que está absorbido en la muestra de carbón, y se determina empleando los cánister: las muestras de carbón son introducidas en el cánister y selladas; posteriormente, este cánister es conectado a la bureta y se abre la válvula que permite la salida del gas, que es medido por el desplazamiento del agua en una columna volumétrica en la bureta a temperatura del yacimiento y presión atmosférica (Figura 4). El gas residual es el que permanece atrapado en la matriz del carbón, que no salió como gas perdido o desorbido; se obtiene pulverizando el carbón con un molino hermético adaptado a un sistema de medición de gas.

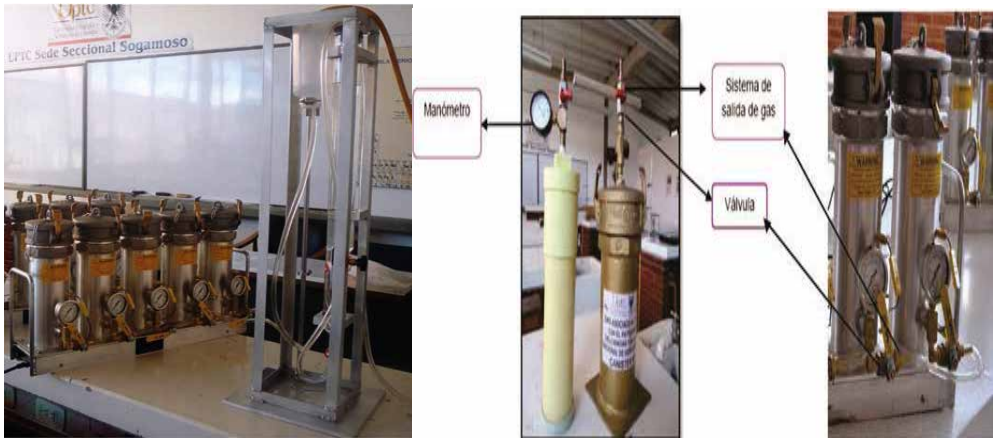

Fig. 4. Montaje del sistema de desorción cánisters para medición de gas.

Los volúmenes de gas medidos se corrigieron de acuerdo con las temperaturas y presiones del sitio o profundidad donde se tomó la muestra. Las mediciones directas aportan pruebas de que el gas está realmente presente y permiten calcular las reservas y determinar el grado de saturación de gas en el carbón. Los métodos directos también suministran información sobre la tasa de desorción del gas y permiten obtener muestras para hacer ensayos de cromatografía para determinar la composición del gas desorbido. En el *Laboratorio de Materiales, Carbón, Gas asociado al Carbón y Shales Gas,* de la UPTC-Sogamoso, se siguen, en general, las indicaciones del método de la USBM (Oficina de Minas de Estados Unidos), pero las muestras se mantienen a temperatura del yacimiento, como lo sugiere el método del GRI (Gas Research Institute). La cantidad de gas perdido se calculó por el método de la USBM y por el método de Smith y Williams [7, 9].

Adicional a la medición del contenido de gas, se hicieron ensayos inmediatos en las muestras de carbón que incluyeron: humedad, ceniza, materia volátil, carbono fijo, poder calorífico y azufre. Los componentes no orgánicos (materia mineral o cenizas) también se determinaron con petrografía (Tabla 2); esto porque los componentes no orgánicos se deben restar de la parte orgánica para determinar el contenido de gas libre de cenizas (Tablas 1 y 3), y porque el gas asociado al carbón se genera solamente en la parte orgánica.

Para determinar el contenido de gas se analizaron 14 muestras: 4 en los frentes de minas y 10 en una perforación. Las muestras de los frentes de mina se tomaron como muestras de zanja en los mantos 1, 2 y 3 en los frentes de trabajo de la Mina La Esperanza (Tabla 1). Las 10 muestras restantes se tomaron en el pozo Socotá 1, sobre la carretera Socha-Socotá. En el pozo se muestrearon dos areniscas, siete mantos de carbones que se identificaron y un manto que no se identificó (Tabla 3).

El pozo Socotá 1 no se pudo hacer en la zona donde se sugiere la perforación de desgasificación por problemas de acceso, por lo que finalmente se ejecutó al sur de la zona, pero dentro del área de la Peña de Socotá; por lo tanto, se considera representativo de la zona.

IV. Resultados

Las Tablas 1 y 3 presentan los resultados de desorción hallados en Socotá en frentes de mina y en el pozo de exploración Socotá 1. El gas total ha sido ajustado por el contenido en el carbón de sustancias que no generan metano, como humedad, ceniza y azufre (gas total libre de cenizas), por lo tanto, se incrementan los valores de gas total.

Tabla 1

Listado por manto del contenido de gas en los frentes de mina

ID de muestra	Manto	Espesor (m)	Profundidad(m)	Material (roca)	Gas perdido (pies³/t)	Gas desorbido (pies³/t)	Gas residual (pies³/t)	Gas total (pies³/t)	Gas total libre de cenizas (pies³/t)
C4	3 superior	0.40	2185.81	Carbón	2.74	64.28	0.501	67.521	70.49
C3	3 inferior	0.30	2185.81	Carbón	4.27	70.15	5.013	79.433	85.96
C2	2	2.10	2261.07	Carbón	18.09	81.39	14.00	113.48	120.39
C1	1	1.15	2238.21	Carbón	4.10	83.49	7.520	95.11	120.71

Los análisis inmediatos de las muestras tomadas en los frentes de mina (Tabla 2) permiten hacer la corrección por contenido de cenizas y humedad, lo que eleva ligeramente el contenido de gas en la última columna de las Tablas 1 y 3.

Tabla 2

Resultados de análisis inmediatos a muestras de carbón

Manto	Humedad residual (%)	Cenizas (%)	Materia volátil (%)	Carbono fijo (%)
3superior	0.62	3.73	21.39	74.26
3inferior	0.69	6.39	21.88	71.04
2	0.86	4.52	22.48	72.14
1	0.61	19.07	19.48	60.48

Tabla 3

Pozo Socotá 1. Listado del contenido de gas en 10 muestras.

ID de muestra	Manto	Espesor (m)	Profundidad (m) Desde	Hasta	Material (roca)	Gas perdido (pies³/t)	Gas desorbido (pies³/t)	Gas residual (pies³/t)	Gas total (pies³/t)	Gas total libre de cenizas (pies³/t)
PSoc-1:1	Arenita fina	0.25	196.65	196.90	Arenita	2.25	1.02	9.43	12.7	-
PSoc-1:2	Manto	0.40	252.35	252.75	Carbón	3.26	2.35	11.42	17.03	84.33
PSoc-1:3	Manto 7	0.85	254.01	254.31	Carbón	8.67	1.70	9.93	20.30	42.32
PSoc-1:4	Manto 6	1.90	282.40	282.80	Carbón	2.97	4.91	27.32	35.20	39.33
PSoc-1:5	Arenita fina	17.40	306.55	306.95	Arenita	0.34	1.18	14.40	16.22	-
PSoc-1:6	Manto 5	2.0	319.30	319.70	Carbón	15.57	16.22	39.73	71.52	105.62
PSoc-1:7	Manto 4	0.40	336.33	336.73	Carbón	7.05	13.52	34.70	55.27	66.21
PSoc-1:8	Manto 3	2.45	398.60	399.00	Carbón	6.04	15.61	45.02	66.67	76.51
PSoc-1:9	Manto 2	1.30	408.10	408.50	Carbón	70.46	40.97	31.00	142.43	253.03
PSoc-1:10	Manto 1	0.50	412.95	413.40	Carbón	2.70	14.16	53.86	70.72	78.09

La Tabla 1 presenta los resultados de las muestras tomadas en los mantos 1, 2 y 3 en los frentes de la mina La Esperanza. En el manto 3 se tomaron dos muestras: una en su parte inferior, y otra en su parte superior. La muestra del manto 2 reportó los mayores resultados, con un total de 113 pies³/t, seguida por el manto 1, con 95 pies³/t. Después de las correcciones por ceniza y humedad (Tabla 2), los valores de contenido de gas se elevan en el manto 1 de 95.11 a 120.71 pies³/t. En el manto 2 los valores se incrementan de 113.48 a 120.39 pies³/t.

La Tabla 3, del Pozo Socotá 1, presenta los valores de gas total, que fluctuaron entre 12 y 142 pies³/t,

con un promedio de 50 pies^3/t. Se notó un ligero incremento en el contenido de gas con la profundidad. Los mantos con mayor contenido son el 2 (muestra 9 a 408 m de profundidad), con 142.42 pies^3/t, y el 5 (muestra 6 a 319 m de profundidad), con 71.52 pies^3/t. Después de las correcciones por ceniza y humedad, los contenidos de gas se incrementaron entre 23 % y 36 %, respectivamente. Ese incremento se debe, principalmente, a que los valores de gas perdido de los contenidos son altos; por ejemplo, el gas perdido en la muestra 9 es de 70,46pies^3/t, lo que es inusualmente alto. Por lo anterior, los valores totales libres de cenizas se incrementaron en las muestras de diferente forma, dependiendo del contenido de ceniza. Los mayores valores se encontraron en los mantos 2 y 5, con 253 y 105 pies^3/t, respectivamente.

La Figura 5 presenta el proceso de medición del gas desorbido en la muestra de carbón tomada en el frente de mina del manto 1 en la mina La Esperanza (gas desorbido, Tabla 1). La desorción de gas fue significativa hasta el día 66; después de esto fue mínima, hasta que la desorción fue cero en las últimas mediciones, por lo tanto, se considera que la desorción fue regular y completa.

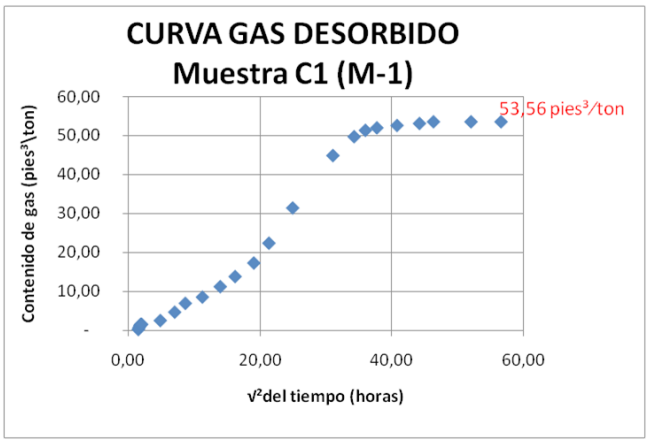

Fig.5. Curva de desorción del manto 1 en el frente de mina La Esperanza.

Para todas las muestras, las mediciones de desorción se hicieron, como en la Figura 5, hasta que la muestra no desorbió nada de gas por varios días y, por lo tanto, la curva acumulativa de gas se tornó horizontal [3].

V. Análisis sobre riesgo

Desde el punto de vista de riesgo relacionado con la presencia de gases se consideran dos fuentes: 1) combustión espontánea y 2) explosiones de acumulaciones de gas metano por una chispa de ignición.

La combustión espontánea es más probable en carbones de bajo rango, como los lignitos y los sub-bituminosos. Hay una relación directa entre la susceptibilidad del carbón a la combustión espontánea y la materia volátil [8]; en términos generales, entre mayor sea el porcentaje de materia volátil, mayor será la susceptibilidad del carbón a la combustión espontánea (ver Tabla 4).Los carbones del sector de Socha-Socotá se clasifican como bituminosos medios a bajos en volátiles, con características coquizables, y sus valores de materia volátil, que están alrededor del 20%, los ubica dentro del rango de menor susceptibilidad (baja) a la combustión espontánea (ver las Tablas 2 y 4).

Tabla 4
Porcentaje de materia volátil y suceptibilidad del carbón a la combustiónespontánea(adaptado de [8])

Materia volátil (%)	Susceptibilidad del carbón a la combustión espontánea
<36	Menos susceptible
36-41	Moderadamente susceptible
41-46	Altamente susceptible

A. Explosiones de acumulaciones de gas metano por una chispa de ignición

Las muertes por explosiones de metano constituyen el mayor riesgo en la minería del carbón. En Boyacá son frecuentes los accidentes por la presencia del metano, y el número de fatalidades cada año puede estar alrededor de 20 personas [9]. Esto hace que las compañías tengan un seguimiento continuo de los contenidos de gases, con ayuda de multidetectores de gases que determinan, por porcentaje, el contenido relativo de cada uno de los gases, pero desconocen los contenidos reales de gas en los carbones. En Colombia, de acuerdo con el reglamento de seguridad en labores subterráneas (Decreto 1886 de 2015 del Ministerio de Minas y Energía), los porcentajes máximos permisibles de metano en los frentes de explotación de carbón son de 1 % [10]. El conocimiento por anticipado de los contenidos de metano en los diferentes mantos y sectores de la mina facilita el planeamiento y diseño de la ventilación para reducir el riesgo y los costos de ventilación. A escala de gran minería, las compañías que planean hacer explotación subterránea de carbón están haciendo mediciones de gases durante la exploración, sobre corazones obtenidos en perforaciones, como requisito de los interventores internacionales y de los encargados del diseño minero.

En la mina La Esperanza se utiliza el método de explotación de cámaras y pilares, que es el más utilizado en la zona; este método produce menos cantidad de gas que el método de tajo largo, porque deja mayor cantidad de reservas soportando el techo de la explotación [3]. A pesar de esto, los contenidos de gas son relativamente altos, como lo demostraron los ensayos de desorción (Tablas 1 y 3), y la mina se considera "gasífera", por los frecuentes accidentes relacionados con gas en la zona y porque los carbones son de alto rango (coquizables). En la zona se utilizan los sistemas de ventilación con el fin de mantener bajos los niveles de metano en los frentes de explotación, sin embargo, esa ventilación debe ser constante e intensa, para mantener los niveles de metano por debajo de los límites legales y en condiciones de seguridad. Esto hace que la ventilación sea costosa, por los altos costos de energía que se manejan en Boyacá.

Desde el punto de vista de contenido de gas, en la mina La Esperanza los contenidos más altos en los frentes mineros en los mantos 1 y 2 alcanzaron los 120 pies^3/t, y en el pozo Socotá1algunos valores estuvieron sobre 100 pies^3/t, y una muestra del manto 2 sobrepasó 250pies^3/t. Con los anteriores valores se puede confirmar que la mina es gasosa ("gassy"), por lo que justificaría un proceso de desgasificación. A continuación, se consideran las diferentes posibilidades de desgasificación para la peña de Socotá, y después se sugiere el método que sería más óptimo dadas las condiciones geológicas y de contenido de gas de la zona.

B. Consideraciones sobre el método óptimo para desgasificar el bloque minero en la Peña de Socotá

La extracción del gas grisú de las minas, o desgasificación, requiere de un complejo proceso de desgasificación, que tiene lugar antes, durante y posterior al minado. Existen cinco formas diferentes de extraer el gas de una mina:1) CBM o extracción previa al minado por perforación vertical o dirigida desde superficie en áreas vírgenes por desarrollar; 2) perforación horizontal desde el interior de la mina para extraer gas de la zona próxima al frente de explotación (CMM); 3) posterior al minado, a través de perforaciones verticales desde superficie, para extraer el gas localizado en los caídos minados o material derrumbado(GOB-GM); 4) durante el minado, por ventilación intensa de los sitios de trabajo a través de extractores mecánicos desde superficie (VAM), y 5) gas extraído de minas abandonadas (AMM). Estos métodos son ilustrados en la Figura 6.

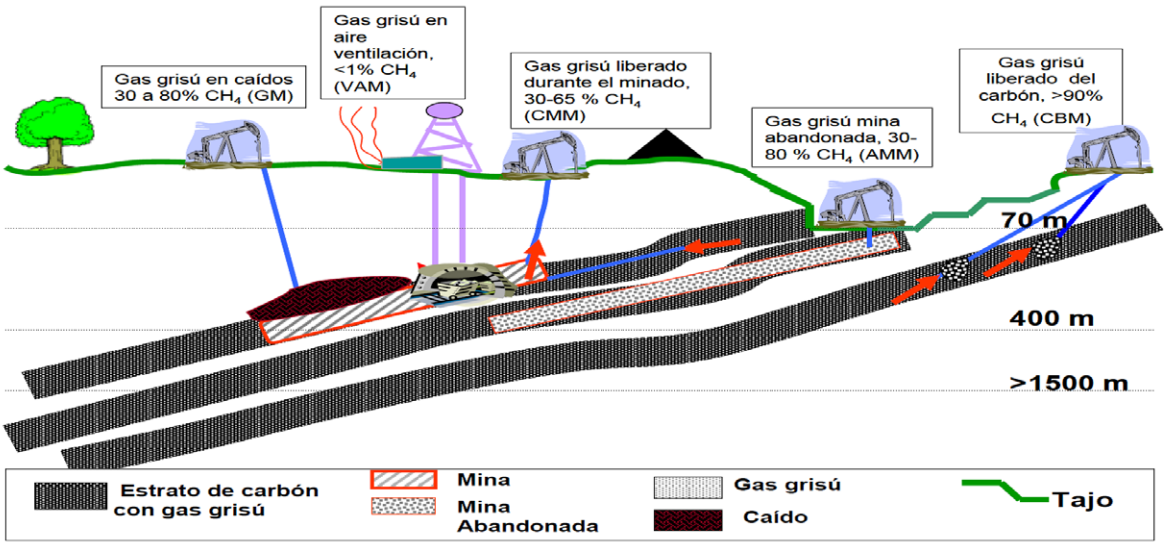

Fig. 6. Formas de extracción del gas metano asociado al carbón. Adaptado de [12].

1) Perforaciones verticales preminado (CBM): Consisten en perforaciones verticales desde superficie en zonas donde no se ha hecho minería, por lo que permite obtener gas de buena calidad. Es similar a los pozos petroleros, aunque de tamaño menor, y se perforan con varios años de anticipación al minado del carbón. La longitud de los barrenos depende de la profundidad de las capas de carbón. Los pozos verticales requieren, normalmente, de una preparación de las capas a drenar, que consiste en el fracturamiento de la roca misma con objeto de incrementar la permeabilidad de la roca y aumentar el área de influencia del pozo. La extracción requiere de un sistema de vacío en superficie. Debido a que se trata de capas que normalmente están por debajo del nivel freático, la mayor parte de los pozos extraen agua al inicio del proceso, y no es hasta que el agua está casi agotada que el metano empieza a fluir debido a la depresión de la presión hidráulica. La calidad del gas asociado al carbón recuperado, normalmente, supera un contenido de 90% de metano. Esta metodología es ideal para extraer gas de una calidad lista para gasoductos de gas natural, después de procesos sencillos de purificación.

2) Perforaciones horizontales (CMM): realizadas dentro de la mina; sirven para drenar zonas que están por minarse y que normalmente pertenecen a bloques de paneles de minado continuo. La longitud de los barrenos varía entre 100 y 250 metros, según las necesidades del minado. Puede haber muchos barrenos horizontales en la mina, los cuales se conectan a un tubo de drenado vertical para su extracción de la mina. La recuperación del gas grisú por este método es baja, entre 10 % y 18 % del gas que normalmente se produce en la mina, aunque puede llegar a 30 %; este método es muy utilizado porque puede llegar a bajar la concentración de gas en la cara de minado hasta en el 60 %, reduciendo de esta manera el volumen de ventilación. La calidad del gas depende de muchos factores, pero puede llegar a tener hasta 90% de metano. Hay una variación conocida como de Perforaciones en ángulo o cruzados (CMM), que tienen como fin desgasificar las rocas que sobreyacen y subyacen a las capas de carbón; son cortas, se perforan en abanico hacia arriba o hacia abajo de la mina durante el minado y tienen el mismo objeto que la perforación horizontal, excepto que están encaminadas a extraer el gas de las rocas encajantes.

3) Barrenos GOB o caídos-derrumbados (GM): Son perforaciones verticales con una profundidad de hasta 4 o 15 metros por arriba de los mantos de carbón que van a ser extraídos. Se realiza antes del minado, con la idea de que, una vez que el minado ha pasado por ellos, la roca fracturada del caído o derrumbado (denominado GOB en inglés) genera gran permeabilidad, que permite que el gas que queda una vez extraído el carbón no regrese a la mina, sino que sea extraído a superficie con la ayuda de un sistema de vacío de las capas superiores del caído. La calidad del gas de los barrenos GOB es variable, pues mientras al principio

es puro gas grisú, con el tiempo va diluyéndose con el aire de la mina hasta llegar a concentraciones hasta de 35% de metano. La cantidad y calidad de gas de estos pozos puede ser considerable si se monitorean adecuadamente; su producción puede variar desde 2 Mpies^3/día hasta 100 Mpies^3/día. En general, esta metodología puede recuperar hasta el 50 % de las emisiones de metano en las minas [9, 12].

***4) La Ventilación (VAM)*:** tiene por objeto diluir las concentraciones de gas grisú en el ambiente de la mina, con el fin de brindar seguridad a los mineros y a la operación misma. La ventilación tiene lugar a través de extractores mecánicos desde superficie, ya sea por túneles inclinados o verticales. La cantidad de aire que fluye en cada mina es variable, dependiendo del tamaño de la operación, y va desde 91 m^3/s a 140 m^3/s, de manera que la calidad del aire se mantenga por debajo de los niveles de seguridad especificados, que normalmente son de 0.7-1% de metano en promedio [10].

5) Gas presente en la mina después de la explotación del carbón (AMM): Una vez que la mina se abandona, el metano en ella comienza a concentrarse, producto de la desorción de las labores no explotadas. Este método no se considera en este caso porque la mina aún permanece activa.

De acuerdo con las características de la minería desarrollada en la Peña de Socotá, el método óptimo para implantar en la mina La Esperanza sería el de desgasificación preminado con perforaciones, conocido como CBM; seguido por la desgasificación de la ventilación (VAM). Los otros métodos requieren introducir máquinas de perforación a las minas, lo que se dificulta en La Esperanza por la estreches y longitud de los inclinados.

C. Método óptimo de desgasificación en la Peña de Socotá

Como se indicó, el método óptimo para la desgasificación es el drenado de los mantos de carbón del bloque carbonífero que a**ú**n no se han explotado, o CBM, el cual se debe proyectar sobre el costado oeste del bloque carbonífero, pues es la zona de proyección para la explotación futura en la mina La Esperanza. Para el drenado de la zona de proyección se deben perforar pozos verticales ubicados al menos 200 m al oeste de los frentes actuales, aunque lo ideal sería a 500 m (Figura 7). Se debe considerar la posibilidad de fracturar la zona adyacente al pozo (fracking), a fin de incrementar la permeabilidad y facilitar el drenado del gas por las fracturas ocasionadas. En superficie hay que montar un sistema de captación basado en bombas de succión o vacío; las primeras extracciones llevar**án** consigo agua, que disminuirá a medida que se abate el nivel freático. Se debe tener un sistema de filtros que separe el agua del gas. El gas debe depositarse en tanques de gran tamaño para controlar las presiones antes de transformarlo en energía para la mina. Específicamente, el gas se podría ventear a la atm**ó**sfera, se podría utilizar en la mina para alimentar calentadores o para generar energía, o se podría conectar a la red de gaseoductos del gas natural. La posibilidad de que la mina produzca su propia energía es muy atractiva, debido a los altos costos de energía que operan en Boyacá y en Colombia en general. La tercera posibilidad, que el gas producido se venda a los proveedores de gas, es posible, ya que el gas de CBM tiene, generalmente, muy buena calidad (metano≈90%) y se podría adicionar directamente a la red de distribución de gas natural [2, 9].

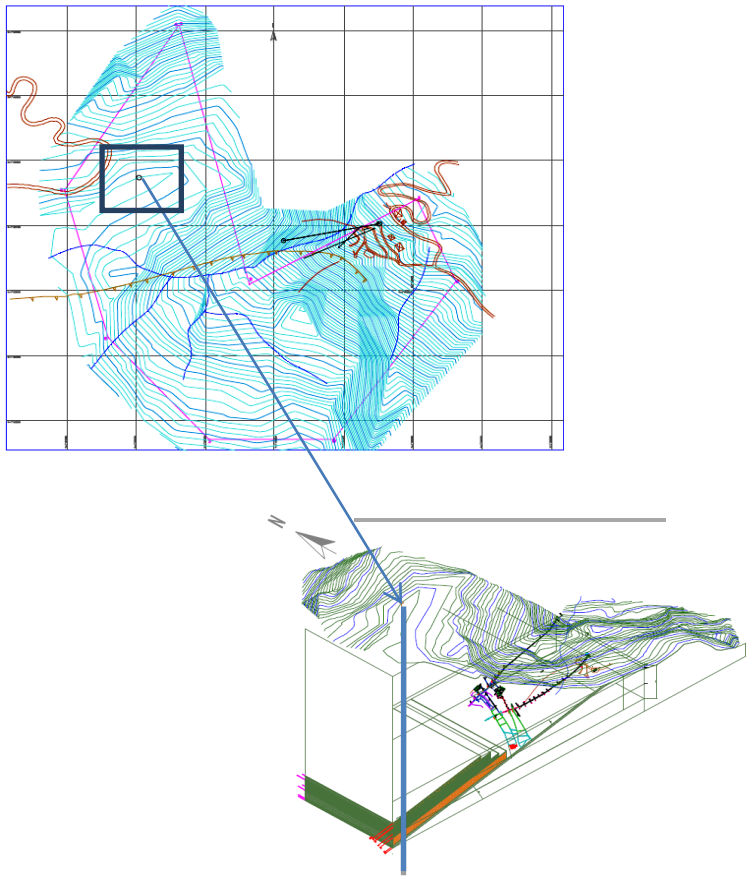

Fig. 7. Ubicación de un pozo de desgasificación en corte y sobre el plano topográfico de la mina La Esperanza, Peña de Socotá (Boyacá).

Los contenidos de gas asociado al carbón (CBM) en la zona de Socotá son de los más altos encontrados en Boyacá; se han encontrado sobre 200 pies^3/t a más de 400m de profundidad. Adicionalmente, la zona se considera gasífera, porque son frecuentes los accidentes relacionados con explosiones por presencia de gas metano. A medida que avanzan los inclinados, y la minería se hace más profunda, los contenidos de gas aumentarán por el aumento de la presión y del gradiente geotérmico. Lo anterior porque se ha encontrado que, en Colombia, y específicamente en Boyacá, los contenidos de gas metano aumentan con la profundidad [2,9]. Por esto se sugiere un programa de desgasificación CBM preminado para intentar bajar los porcentajes de metano por debajo del 50%, si es posible. Para conocer la factibilidad del programa se sugiere un pozo piloto localizado al occidente de las actuales labores mineras (Figura 7), con una profundidad cercana a los 600 m y que intercepte los mantos 1 al 4. También se puede considerar la construcción de una red de varios pozos con separaciones entre 200 y500 m.

VI. Conclusiones

Las muestras de carbón analizadas en la formación Guaduas, en el bloque carbonífero de la Peña de Socotá, muestran un contenido variable de gas. Los mayores contenidos de gas desorbido (medido) se encontraron en el manto 1, con 83.49 pies^3/t; el mayor contenido de gas total se encontró en los mantos 1 y 2, con valores sobre 120 y 253 pies^3/t. Se nota un ligero incremento del contenido con la profundidad; los mantos más profundos presentan contenidos mayores.

En general, las muestras analizadas tienen contenidos de gas apreciables, por el orden de los 100-200 pies^3/t. Estos contenidos de gas presentan desafíos para la minería, por el riesgo de explosiones, pero, igualmente,

ofrecen buenas posibilidades para aprovecharlo como recurso energético.

La realización de un pozo beneficiaría la seguridad de las minas del sector, al drenar parte del gas presente en los carbones; esto, a su vez, reduciría los costos de ventilación.

Para la desgasificación de la Peña de Socotá se sugiere perforar varios pozos, teniendo en cuenta la futura zona de explotación; esto permitirá tener mayores volúmenes de gas para utilizar en la mina o para comercializar.

Se sugiere perforar a profundidades mayores a 500 m, pues a esas profundidades los contenidos de gas podrían ser mayores.

Se recomiendan ensayos de cromatografía de gases sobre algunas de las muestras de gases para precisar los contenidos de metano (CH_4) y de otros gases que, como azufre (H_2S), pueden ser letales.

También se recomienda adelantar un cálculo de reservas como base para determinar la factibilidad del proyecto.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), como parte de los convenios de investigación 014 de 2014 y 025 de 2012.

Referencias

[1] J. E. Mariño, *Estudios preliminares del gas asociado al carbón (GAC o CBM) en Boyacá*, Trabajo de ascenso en el escalafón, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, 2010.

[2] L. Mojica and J. E. Mariño, "Estado de la exploración y posibilidades de gas asociado al carbón (GAC) en Boyacá (Colombia)," *Boletín de Geología*, vol. 35(2), pp. 31-41, 2013.

[3] M. Ortegón, *Valoración de contenidos de gas metano asociado al carbón y caracterización del carbón de los mantos uno, dos, cuatro, en la peña de Socotá al occidente del municipio de Socotá, con expectación de adecuar un sistema de desgasificación*. Proyecto de grado. UPTC-Sogamoso. Escuela de Ingeniería Geológica, 2014.

[4] B. Alvarado and R. Sarmiento, *Informe geológico general sobre los yacimientos de hierro, carbón y caliza de la región de Paz de Río, Departamento de Boyacá*. Informe N.° 468, Servicio Geológico Nacional, Bogotá, 1944.

[5] A. Hettner, "La naturaleza de la geografía y sus métodos," J. Gómez, J. Muñoz and N. Ortega, *El pensamiento geográfico*. Buenos Aires: Alianza Universidad, pp.311-322, 1982.

[6] Van Der Hammen and H. Hooghiemstra, "The El abra Stadial, a Younger Dryas equivalent in Colombia," *Quaternary Science Reviews*, vol. 14(9), pp. 841-851, Jan. 1995. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/0277-3791(95)00066-6.

[7] D. M. Smith and F. L. Williams, "A new technique for determining the methane content of coal," *Conf. Am. Soc. Mech. Eng.*, p.1272-1277,1981.

[8] D. Pattanaik, P. Behera, and B. Singh, "Spontaneous Combustibility Characterization of the Chirimiri Coals, Koriya District, Chhatisgarh, India," *Indian Journal of Geology*, vol. 2(3), pp. 336-347, 2011.

[9] J. E. Mariño, "Desarrollo del CBM en Colombia," in *Gas asociado al carbón (CBM o GMAC). Geología, contenidos, reservas, minería y posibilidades en Colombia*, pp. 110-130, Tunja, Colombia: UPTC, 2015.

[10] Ministerio de Minas y Energía. *Decreto 1886 de 2015. Reglamento de seguridad en labores subterráneas.* Tunja, Boyacá: UPTC.

[11] J. E. Mariño-Martínez and A. Mojica, "Relación entre la petrografía del carbón y el contenido de gases en la cuenca de Amagá (Antioquia, Colombia)," *Rev. Fac. ing., vol. 23*(37), pp. 33-40, Jul. 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.19053/01211129.2788.

[12] F. Querol, "Estudio para identificar las capacidades de la minería de carbón en el uso y aprovechamiento del gas metano asociado," Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, 2007.