

Artículo original

Emisiones de metano asociadas a la minería subterránea del carbón en el altiplano cundiboyacense (Colombia)

Methane emissions from underground coal mining in the Altiplano Cundiboyacense (Colombia)

✉ Jorge Eliecer Mariño-Martínez¹, ✉ Rubén Darío Chanci-Bedoya²,
✉ Ángela María Orjuela-García^{1,*}

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

² Unidad de Planeación Minero-Energética, Bogotá, D.C., Colombia

Resumen

A raíz del Acuerdo de París sobre el cambio climático, Colombia se comprometió a medir y reportar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), entre estas, las emisiones fugitivas de la minería del carbón. El país ha venido reportando las emisiones a partir de tablas internacionales (nivel 1 del Panel Intergubernamental del Cambio Climático - IPCC), pero en la presente propuesta se sugiere hacerlo a partir de los estudios de exploración de nivel 2 del metano de lecho de carbón (*coal bed methane*, CBM) utilizando equipos de desorción con *canisters*. En el altiplano cundiboyacense se revisaron los contenidos a partir de tablas internacionales y de estudios de CBM y se encontró que a partir del rango del carbón de nivel 1 (61,62 Gg de metano) las emisiones excedían los contenidos encontrados en mediciones directas de nivel 2 (16,47 Gg de metano) en más de 300 %. También se encontró que los niveles de emisiones equivalentes en toneladas de CO₂ eran de 1.540.500 y 411.750 toneladas, en Boyacá y Cundinamarca, respectivamente. Los resultados evidenciaron que dado que los contenidos de gas metano asociados al carbón en las cuencas colombianas no son tan altos como los de los principales países productores de carbón, las emisiones de la extracción de carbón en el país fueron menores que las calculadas con factores de emisión internacionales. Por lo tanto, mientras no se midan las emisiones directamente en la ventilación, se deben utilizar los estudios de exploración de CBM para reportar emisiones, ya que con base en las tablas internacionales podrían estarse reportando más emisiones de GEI asociadas a la minería del carbón de las que realmente se están generando.

Palabras claves: Emisiones fugitivas; Carbón; Metano; Cundinamarca, Boyacá, Colombia.

Abstract

As a result of the Paris Agreement on climate change, Colombia is committed to measuring and reporting emissions of greenhouse gases (GHG), among them, coal mining fugitive emissions. The country has been reporting emissions based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) level 1 international tables, but here we propose to do so based on the level 2 coal bed methane (CBM) exploration using canisters desorption systems. We reviewed the contents for the Altiplano Cundiboyacense based on the CBM international tables and studies and we found that level 1 coal emissions (61.62 Gg of methane) exceeded the contents found in the direct level 2 measurements (16.47 Gg of methane) by more than 300%. The equivalent emission levels in CO₂ tons were found to be 1,540,500 and 411,750 tons, respectively. Given that the methane gas contents associated with coal in Colombian basins are not so high compared to those of the main coal-producing countries, emissions from coal extraction in the country were lower than those calculated with the international emissions factors. Therefore, as long as the emissions are not measured directly in the ventilation, CBM exploration studies should be used for their report because their calculation based on international tables renders more GHG emissions associated with coal mining than those actually generated.

Keywords: Fugitive emissions; Coal; Methane; Cundinamarca, Boyacá, Colombia.

Citación: Mariño, J., Chanci, R. Orjuela, A. Emisiones de metano asociado a la minería subterránea del carbón en el altiplano cundiboyacense (Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(176):864-874, julio-septiembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1372>

Editor: Hernando Dueñas Jiménez

***Correspondencia:**

Ángela María Orjuela García;
angela.orjuela@uptc.edu.co

Recibido: 23 de febrero de 2020

Aceptado: 20 de mayo de 2021

Publicado en línea: 17 de agosto de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

El altiplano cundiboyacense comprende los departamentos de Boyacá y Cundinamarca; allí se produce el 60 % del carbón colombiano extraído por minería subterránea, con cerca de 4 millones de toneladas al año. El gas metano (CH_4), causante de frecuentes accidentes mineros, está asociado a la minería del carbón. Asimismo, se ha estudiado su contenido como fuente de gas natural (Mariño, *et al.*, 2015; Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2016). Como país firmante de la Convención Marco sobre el Cambio Climático - Acuerdo de París (21st Conference of the Parties-COP 21, 2015), Colombia se comprometió a medir y a reportar periódicamente sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que se ha venido haciendo en los últimos años a nivel sectorial, departamental y, en algunos casos, a nivel de divisiones industriales. Las emisiones fugitivas de gas metano, producto de la extracción minera de carbón, hacen parte de las emisiones de GEI y pertenecen al módulo de energía tal como lo contempla el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

Los cálculos de las emisiones fugitivas o pasivas de gas metano asociadas a la extracción de carbón y reportadas por Colombia con anterioridad al 2015, se hacían con base en las tablas internacionales (nivel 1 de complejidad) establecidas por el IPCC. Como el país ha adelantado considerables mediciones de gas asociado al carbón CBM, en el presente estudio se sugiere hacer el cálculo a partir de mediciones directas en proyectos de CBM y estimar las emisiones de gas metano con nivel de complejidad 2 según los lineamientos del IPCC (1996).

En el estudio se presenta el contraste entre la estimación de las emisiones fugitivas de gas metano aplicando los factores internacionales (mediciones indirectas) del nivel 1 y las mediciones directas del nivel 2 utilizando equipos de desorción con *canisters* de la producción de carbón del 2015 en el altiplano cundiboyacense. Con ello se buscaba demostrar la hipótesis de que dichas emisiones podrían ser menores de las que se han venido reportando en Colombia debido a que los carbones colombianos tienen un contenido de gas metano por debajo del promedio de los carbones con rango similar provenientes de las cuencas de los principales países productores. Claro que, independientemente de la forma de calcularlas, las emisiones de metano asociadas a la minería del carbón deben medirse, reportarse y, en lo posible, disminuirse (U.S. Environmental Protection Agency-EPA, 2006).

Una posible limitación del presente estudio es que el nivel 2 de mediciones que se propone requiere perforaciones y en cada departamento solo hay entre 4 y 6 pozos de CBM perforados cuyas mediciones sean confiables en los municipios de Socotá, Ráquira, Sámaca, Umbita, Chinavita, Cucunúba y Sutatausa (Figura 1) (UPME, 2016).

Emisiones fugitivas de gases de efecto invernadero (GEI)

El cambio climático se atribuye al incremento de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, con emisiones mayores a las que esta y los océanos pueden asimilar, lo que origina la acumulación excesiva de radiación infrarroja en la atmósfera. Los GEI actúan como una cortina que atrapa la radiación solar evitando que el calor acumulado salga del planeta y produciendo cambios en la temperatura de aguas oceánicas y continentales, así como en la atmósfera y el clima, con repercusiones negativas para la vida del planeta (Whitehead, *et al.* 2009).

Entre los gases de efecto invernadero, los de mayor impacto son el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), siendo este último el que más contribuye al efecto invernadero, ya que la mayor fuente industrial de metano es la industria petrolera y de gas. Las emisiones de GEI se dividen en dos grandes grupos, las emisiones causadas por quema y las emisiones fugitivas. El gas asociado a la minería del carbón hace parte de las emisiones fugitivas, que no se forman por quemas de combustibles sino por el escape de los gases atrapados de manera natural que se emiten a la atmósfera por la acción antrópica. Esto sucede con el gas metano asociado al carbón, el cual se emite a la atmósfera lentamente cuando el mineral es intervenido por el hombre mediante los procesos de exploración,

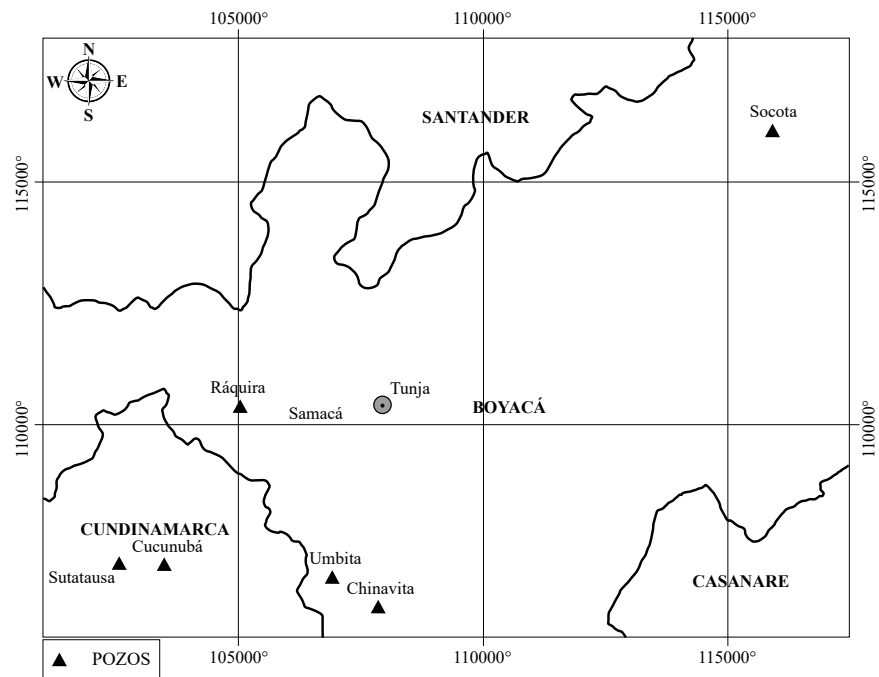


Figura 1. Localización de los municipios donde se perforaron los pozos CBM.

explotación, almacenamiento y transporte. Las emisiones fugitivas de gas asociadas a la extracción del carbón representan casi el 5 % de los GEI relacionados con la energía (Houghton, *et al.*, 1997).

En el marco del Acuerdo de París se estableció que cada país debería reportar las emisiones de gases de efecto invernadero según los parámetros establecidos por el IPCC. Se estableció, asimismo, que deberían emprenderse acciones para evitar el incremento de la temperatura del planeta en dos grados centígrados para el 2030 (COP 21, 2015). Al ser uno de los principales productores de carbón en el mundo, Colombia debe reportar los gases procedentes de la extracción de este mineral, más aun teniendo en cuenta que el gas metano contribuye en forma apreciable a los GEI.

El carbón se forma de la materia orgánica que se transforma durante millones de años mediante procesos complejos que, en su conjunto, se denominan “carbonización”. Los resultados de la carbonización son los cambios físicos y químicos exhibidos por el carbón, incluida la generación de gas metano, agua y dióxido de carbono. La cantidad de metano que se produce aumenta durante todo el proceso de carbonización, por lo que los carbones de mayores rangos, que son los que poseen un alto poder calórico, tienden a contener más metano que los de los rangos o grados menores cuyo poder calórico es menor (Mariño, *et al.*, 2015). El metano se libera cuando la presión dentro del manto de carbón se reduce como resultado del proceso de minado o por la erosión natural y migra de las zonas de alta concentración a las de baja concentración para después encontrar una ruta de escape, por ejemplo, fracturas en el macizo rocoso (emisiones fugitivas o pasivas).

Aspectos geológicos

Los carbones del altiplano se encuentran en la formación Guaduas, que hace parte de la cuenca de la cordillera Oriental (parte central de Colombia), la cual tiene una composición principalmente lodosa con algunas unidades arenosas y mantos de carbón. Los mantos de carbón de Guaduas son económicamente importantes debido a su alto rango y porque algunos de ellos son coquizables (Ingeominas, 2004). La formación presenta una reducción progresiva en su espesor hacia el norte (Boyacá) y el este. En el suroeste (Cundinamarca), su espesor puede llegar a 1.100 m (sinclinal de Checua-Lenguazaque),

hacia el norte, entre 250 y 500 m, y al este, de 80 m (Sarmiento, 1994; Cooper, *et al.*, 1995; Amaya, *et al.*, 2010; Duarte & Mariño, 2000). El grupo Guadalupe, la formación Chipaque y la formación Une infrayacen la formación Guaduas, y las areniscas de Socha y Cacho la suprayacen.

Durante el Cenomaniano y el Turoniano el nivel eustático del mar alcanzó su máximo y permitió la deposición de la formación Chipaque (Sarmiento-Rojas, *et al.*, 2006). Durante el Santoniano, el Campaniano Maastrichtiano y el Paleoceno, una regresión y progradación general condujeron a la acumulación de facies litorales y transicionales durante la deposición del grupo Guadalupe. Este evento fue seguido por facies costeras, aluviales y de pantanos durante la deposición de la formación Guaduas (Sarmiento, 1994; Mariño & Amaya, 2016). Por último, la secuencia entera fue cubierta por los depósitos fluviales arenosos de las areniscas de Socha y Cacho.

La formación Guaduas se depositó en el Cretáceo superior y el Terciario durante la regresión de los mares del Cretácico. Superpuestos a esta tendencia regresiva de gran escala aparecen varios ciclos transgresivos-regresivos más pequeños que permitieron la repetición de las diferentes litofacies asociadas y, por lo tanto, la formación de mantos comerciales de carbón. En Boyacá los mantos comerciales son cerca de siete y en Cundinamarca, cerca de 12.

Metodología para el cálculo de emisiones

Las emisiones se calcularon a partir de mediciones del gas desorbido en muestras de pozos exploratorios de CBM. Los contenidos de gas se graficaron contra la profundidad a fin de crear una línea de gradiente. En este estudio las mediciones de CBM corresponden a las de metano desorbidas por el carbón.

En Cundinamarca los pozos exploratorios de CBM se centraron en la zona minera de Checua-Lenguazaque, sobre el flanco occidental del sinclinal Checua-Lenguazaque en el bloque Tausa-Cucunubá. Los pozos son: Cucunubá 1, Cucunubá 2, Cucunubá 3 y Sutatausa 1. En Boyacá los pozos exploratorios están a lo largo del departamento y son el Ráquira 1, Samacá 1, Socotá 1, Socotá 2, Chinavita 1 y Úmbita 1 (Figura 1). Los cálculos de emisiones se hicieron a partir de los factores de emisión de nivel 1 y nivel 2 establecidos por el IPCC.

Nivel 1

Para estimar las emisiones de gas metano generado por la extracción del carbón, se utiliza la metodología del IPCC (1996) para el nivel 1, la cual involucra la producción de carbón y un factor de emisión resultante de las investigaciones realizadas en los países que han avanzado significativamente en el tema (Australia, Estados Unidos, Polonia, México y China) (UPME, 2016).

Los cálculos de emisiones de nivel 1 se hacen a partir de la tabla 1 basados en mediciones internacionales que asumen los contenidos dependiendo principalmente del rango del carbón y la profundidad, tal como lo sugiere el (IPCC, 1996, Houghton, 1997).

Tabla 1. Factores de emisión para minería subterránea y a cielo abierto (Houghton, *et al.*, 1997)

FACTOR de EMISIÓN por EXTRACCIÓN del CARBÓN NIVEL 1- IPCC					
Minería subterránea			Minería a cielo abierto		
Profundidad (m)	m^3/Ton	Pie^3/Ton	Espesor sobre carga (m)	m^3/Ton	Pie^3/Ton
0 a 200 (bajo)	10	353,15	0 a 25 (bajo)	0,3	10,593
200 a 400 (medio)	18	635,58	25 a 50 (medio)	1,2	42,372
mayor a 400 (alto)	25	882,75	mayor a 50 (alto)	2	70,62

En la minería del carbón las investigaciones iniciales de contenido de gas metano respondían a los problemas de seguridad minera debidos a las explosiones de gases, pero actualmente también se utilizan para calcular las emisiones fugitivas de los gases de efecto invernadero producto de la extracción. En la minería subterránea el factor de emisión depende de la profundidad de la explotación y en la minería a cielo abierto, del espesor de las capas suprayacentes al manto de carbón.

Al hacer los cálculos de nivel 1, se deben considerar características de las minas como la profundidad y la producción por cuenca (**Tabla 1**), y no de forma generalizada, como se hace actualmente en Colombia, donde se toma el valor de la producción subterránea a nivel nacional y se multiplica por el factor de emisión establecido por el IPCC, según el cual se asume que las minas subterráneas en Colombia están por debajo de los 400 metros de profundidad. Esta situación no corresponde a la realidad, porque en el país hay pocas minas que alcancen dicha profundidad. En la minería a cielo abierto se toma como factor de emisión 1,2 m³/ton (factor de emisión medio según el IPCC), ya que se considera que en la mayoría de las explotaciones a cielo abierto en el país la capa suprayacente a los mantos de carbón tiene un espesor entre los 25 y 50 metros.

En los cálculos que se presentan en los resultados para el Nivel 1, se tiene en cuenta: el método de explotación aplicado, la profundidad de las minas en cada cuenca y se utiliza la fórmula convencional, que determina emisiones (EG) a partir de la producción de carbón (PC). También se utiliza el factor de emisión (FE) y el factor de corrección ($FC = 0.67 * 10^{-6} \text{ Gg/m}^3$) para convertir metros cúbicos de gas a gigagramos (1 Gg- gigagramos= 1000 toneladas) así:

$$\text{Emisión de Gas Metano (EG)} = PC * FE * FC$$

Nivel 2

Debido al incremento en el consumo, especialmente de gas, y a la disminución de reservas, Colombia ha adelantado diferentes exploraciones de gas asociado al carbón. Los pozos de CBM en Colombia ya podrían sumar más de cien, y con esta información ya se tiene una mejor idea de los contenidos en diferentes regiones y de las variables más incidentes (**Mariño, et al., 2015**).

A continuación se explica el procedimiento de medición del gas en explotaciones de CBM: una vez que el corazón de la muestra de carbón se saca del pozo de exploración de CBM, se introduce inmediatamente en un contenedor hermético conocido como sistema de desorción *canister* siguiendo las indicaciones del método de la *United States Bureau of Mines* (USBM) (**Diamond, 1981**); el contenedor es transportado al laboratorio para mantener la muestra a la temperatura del yacimiento durante el tiempo que tome la medición del gas desorbido; los datos se toman cada 24 horas para obtener los valores periódicos de desorción que serán graficados. El proceso de medición incluye tres métodos diferentes teniendo en cuenta que el contenido total del gas asociado al carbón es la sumatoria de tres componentes: 1) el gas perdido, que corresponde al gas que ha escapado del carbón entre el momento en que el manto de carbón es penetrado por la broca y en que la muestra es introducida y sellada dentro del contenedor; 2) el gas desorbido, es decir, el adsorbido en la matriz del carbón, que se determina empleando los contenedores en los que se introducen y sellan las muestras de carbón, los cuales son posteriormente conectados a la bureta para calcular la desgasificación del carbón abriendo la válvula que permite la salida del gas medido por el desplazamiento del agua en una columna volumétrica a temperatura ambiente y presión atmosférica ambiental a nivel del mar, lo que, acumulado, se grafica contra el tiempo (**Figura 2**); 3) el gas residual, o sea, el que permanece absorbido en la matriz del carbón después de que se ha completado la prueba de desorción. Este se extrae pulverizando la muestra en un molino hermético y midiendo la cantidad de gas con el sistema de bureta utilizado en la determinación del gas desorbido (**Diamond & Levine, 1981**). El contenido acumulado en pic³/ton se grafica contra la raíz cuadrada del tiempo en horas (**Mojica & Mariño, 2013**) (**Figura 2**).

Como en cada cuenca carbonífera (departamento o zona) se han hecho varias perforaciones, se puede generar para cada cuenca una curva de profundidad *versus* el contenido de gas metano (que se equipara con el factor de emisión mostrado para los departamentos de Cundinamarca y Boyacá) (Tabla 2), a partir de las pruebas de desorción realizadas en los estudios de exploración del CBM (Figura 3). Una vez conocido el factor de emisión, las emisiones de metano (EG) se calculan mediante la fórmula sugerida por el IPCC (Houghton, *et al.*, 1997):

El factor de conversión se utiliza para llevar los volúmenes de metano a peso del equivalente de CO₂, ya que las emisiones a nivel global se cuantifican en gigagramos (Gg) (Tabla 3). Por último, las emisiones de metano se convierten a emisiones de equivalente de CO₂ multiplicando por 25, pues el potencial de calentamiento global (*global-warming potential*, GWP) del metano es 25 veces mayor con respecto al CO₂ (EPA, 2006; U.S. Geological Survey-USGS, 2004).

Hasta ahora los cálculos en Colombia se han hecho utilizando el nivel 1 de la metodología del IPCC (Houghton, *et al.*, 1997) en el que el factor de emisión en la minería subterránea depende de la profundidad de la explotación y en la minería a cielo abierto, del espesor de las capas suprayacentes al manto de carbón. Sin embargo, se cree que el país tiene suficiente información para hacer los cálculos a partir de las mediciones de CBM realizadas, lo que equivaldría al nivel 2 del IPCC.

Resultados

Cundinamarca

La zona carbonífera de Cundinamarca comprende todo el departamento, pero la mayor parte de la exploración de CBM se ha centrado en el flanco occidental del sinclinal de Checua-Lenguazaque. Allí la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y la Universidad EAFIT perforaron en el 2011 los pozos Cucunubá 1 y Cucunubá 2 (ANH-EAFIT, 2011). En el mismo año, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Universidad Pedagógica

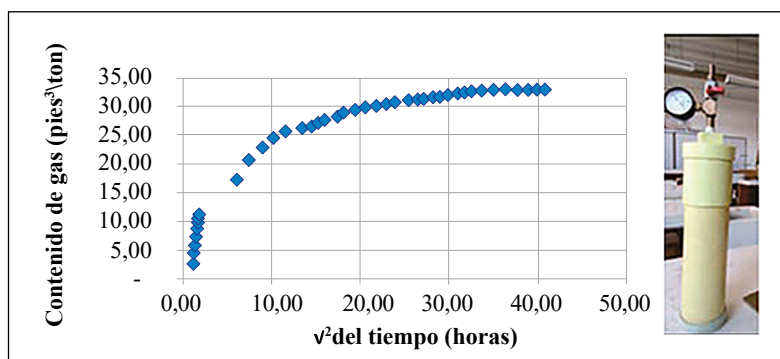


Figura 2. Curva de desorción de una muestra de pozo de CBM y cánister.

Tabla 2. Valores de emisiones de Metano a Nivel 1 considerando la profundidad de las minas en Cundinamarca y Boyacá.

Cuenca	Producción de carbon año 2015 (ton)	Factor de conversión (gg/m³)	Factor de emisión (m³/ton)	Emisión total (gg) ch ₄
Cundinamarca	2.253.133,51	0,00000067	25	37,74
Boyacá	1.979.913,33	0,00000067	18	23,88
Total	4.233.046,84			61,62
Total (Ton) CO₂ equivalente				1.540.500

y Tecnológica de Colombia (UPTC) adelantaron un proyecto de investigación y se perforaron los pozos Cucunubá 3 y Sutatausa 1 (Duarte & Parra, 2014; Rincón, *et al.*, 2014), que sirvieron de base para la curva de emisiones (Figura 3).

La figura 3 (superior) representa el promedio de contenido de gas a diferentes profundidades. A partir de estas se elaboró la línea de tendencia que muestra que aproximadamente entre los 0 y los 200 m de profundidad el contenido de gas está entre 25 y 90 pies³/ton, que equivalen de 0,7 a 2,54 m³/ton. Entre los 200 y los 400 m de profundidad el contenido de gas está entre 90 y 200 pies³/ton, que equivalen de 2,54 a 5,66 m³/ton. La mayoría de la producción de carbón en Cundinamarca proviene de minas de una profundidad cercana o mayor a los 400 metros, por lo que, según la figura 3, el valor a aplicar para la cuenca es de 200 pies³/ton, que equivalen a 5,66m³/ton (Tabla 3).

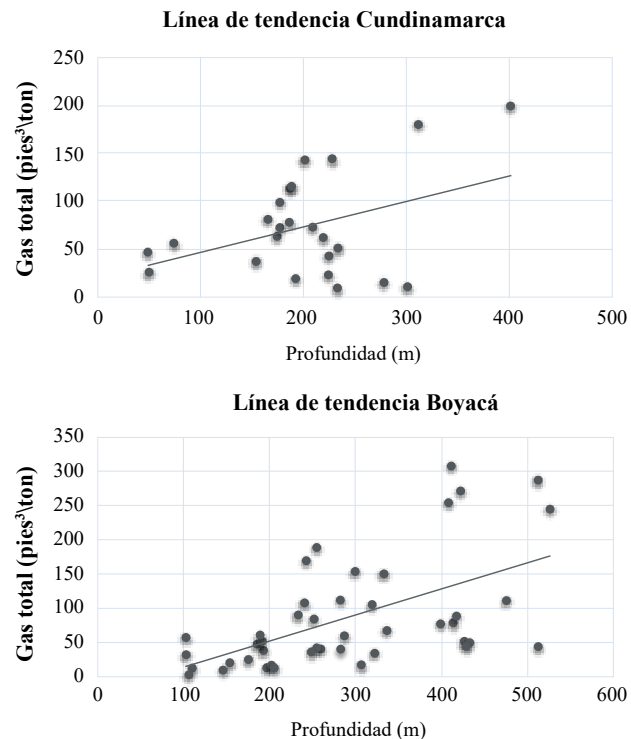


Figura 3. Línea de tendencia del incremento de contenido de gas con profundidad en Cundinamarca (superior) y Boyaca (inferior).

Tabla 3. Valores de emisiones de metano en el altiplano cundiboyacense con la metodología propuesta (Nivel 2).

1. Cuenca	2. Producción de carbon año 2015	3. Contenido promedio de gas medido (CG)		4. Factor de emisión propuesto para los estratos circundantes	5. Gas residual (gas que se emite posterior a la extracción)	6. Total gas emitido en la explotación de carbón	7. Factor de conversión (IPCC 2006)	8. Emisión total nivel 2
		Contenido de gas *0.6		30% del gas medido				
	Ton	pie3/Ton	m3/Ton	m3/Ton	m3/Ton	m3/Ton	Gg/106 m3	Gg
Cundinamarca	2.253.133,5	200	5,66	3,39	1,70	7,35	0,00000067	11,09
Boyacá	1.979.913,3	110	3,12	1,87	0,93	4,06	0,00000067	5,38
Total	4.233.046,8							16,47
Total (Ton) CO₂ equivalente								411.750

Boyacá

La zona carbonífera de Boyacá comprende todo el departamento, pero la exploración de CBM se ha desarrollado desde Raquirá a Socotá y desde Sogamoso hasta Chinavita. En el departamento se adelantaron proyectos de investigación conjunta entre el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y se perforaron los pozos Ráquira 1, Samacá 1, Socotá 1, Socotá 2, Chinavita 1 y Úmbita 1 (**Duarte & Parra, 2014; Rincón, et al., 2014**), los cuales sirvieron de base para la curva de emisiones presentada en la **figura 3** (inferior).

A partir de esta misma figura se determinó que entre los 0 y los 200 m de profundidad el contenido de gas estaría entre los 10 y los 50 pies³/ton, que equivalen a 0,28 y 1,41 m³/ton, respectivamente. Entre los 200 y los 400 m de profundidad el contenido de gas estuvo entre 50 y 130 pies³/ton, es decir, 1,41 y 3,68 m³/ton.

Como la mayoría de la minería en Boyacá está por debajo de los 200 metros, se tomó el valor que correspondió a la mayor profundidad, 350 m, y así el valor a aplicar para la cuenca fue de 110 pies³/ton, que equivalen a 3,12 m³/ton (**Figura 3-inferior; Tabla 3**).

A continuación se presentan los resultados de los cálculos de emisiones para el nivel 1 y para el nivel 2.

Cálculo de emisiones a nivel 1

El cálculo se hizo para el 2015 con base en el carbón producido en ese año por la zona carbonífera. El factor de emisión para minería subterránea fue de 10, 18 y 25 m³/ton dependiendo de las profundidades de las minas (**Tabla 1**). Las minas de mayor producción en Cundinamarca alcanzan profundidades cercanas a los 400 metros, por esta razón se les asignó un factor de emisión de 25 m³/ton, en tanto que en las minas de Boyacá la profundidad alcanza entre los 200 y los 400 metros, por lo que se les asignó un factor de emisión de 18 m³/ton. El total de las emisiones de nivel 1 del altiplano para el 2015 sumó 61,62 Gg de metano, que equivalen a 1.540.500 toneladas del equivalente de CO₂ (**Tabla 2**), es decir, cerca del 40 % del total de emisiones nacionales de metano a nivel 1.

Cálculo de emisiones a nivel 2

Para estimar el factor de emisión por cuenca a nivel 2, se partió de las perforaciones corazonadas realizadas en Cundinamarca y Boyacá en proyectos de exploración de CBM (**ANH-EAFIT, 2011; Duarte & Parra, 2014; Rincón, et al., 2014**), de donde se obtuvieron muestras de diferentes mantos atravesados por las perforaciones a medida que se profundizaba (**UPME, 2016**). A las muestras se les midió la cantidad de gas que contenían utilizando equipos de desorción con *canisters* y siguiendo las metodologías de la USBM (**Diamond & Levine, 1981**). Con estos datos de profundidad y contenido de gas metano, se hizo un diagrama para encontrar la línea promedio en cada una de las cuencas que permitiera observar la dispersión de la cantidad de gas metano alrededor de la línea de tendencia (**Figura 3**).

Con los contenidos de gas metano determinados en las exploraciones de CBM en las zonas carboníferas de Cundinamarca y Boyacá, se establecieron los volúmenes de emisiones de nivel 2, las cuales se presentan en la **tabla 3**.

A continuación, se explica en detalle la **tabla 3** con los resultados finales de emisiones en Colombia en el 2015: la producción de carbón en Cundinamarca y Boyacá se presenta en la columna 2. El factor de emisiones se calculó a partir del promedio de gas medido a la profundidad promedio de la minería (columna 3). A lo anterior se le agregaron las emisiones que producirían los estratos circundantes del macizo rocoso producto de la perturbación y la subsidencia causadas por la minería. Esas emisiones se calcularon en 60 % del contenido promedio de gas porque el IPCC ha reconocido que la afectación de la minería sobre el macizo alcanza en promedio 50 m por debajo de la explotación en las rocas infrayacentes y 150 m por encima de la explotación en las rocas suprayacentes (columna 4). A las emisiones también se les restó un 30 % correspondiente al gas residual emitido del macizo después de la extracción del carbón (columna 5). Las tres emisiones mencionadas

constituyen el total de lo emitido en la explotación del carbón por cada zona carbonífera (columna 6). Como hasta aquí el cálculo se hizo en volumen, debe ser llevado a peso, que es la forma como se representan las emisiones a nivel mundial. Por lo tanto, el volumen total emitido (en m³/ton) se multiplica por un factor de conversión (0,00000067 Gg/10⁶m³) (columna 7), para así obtener las emisiones en gigagramos (columna 8.) Un gigagramo equivale a 10⁹ gramos o 1.000 toneladas y es la unidad estándar a nivel internacional para hacer comparaciones en peso de emisiones de gases de efecto invernadero c

A nivel 2 el total de emisiones de metano en Boyacá y Cundinamarca sería de 16.47 Gg de metano. Dado que el metano contamina 25 veces más que el CO₂ (EPA, 2006), las emisiones de metano se multiplican por 25, por lo que las emisiones de CH₄ a nivel 2 correspondieron a 411.750 toneladas de equivalente de CO₂ (Tabla 3), es decir, cerca del 27 % de las emisiones calculadas a nivel 1. El valor del potencial del calentamiento global (GWP) del metano no siempre se considera como 25 veces el equivalente del CO₂ (UPME, 2016; USGS, 2004).

Discusión

Los resultados muestran que, debido a la desorción parcial de los carbones, los volúmenes (m³/ton) de contenido de gas de los carbones del altiplano cundiboyacense con base en estudios de CBM no son tan altos como en los principales países productores de carbón. Por lo tanto, los cálculos de emisiones no se deben hacer a partir de tablas internacionales, sino a partir de las mediciones directas sobre perforaciones corazonadas utilizando equipos de desorción con *canisters*. Los valores de contenido de gas obtenidos en este estudio son cercanos a los obtenidos en otros en los que también se notó que en los mantos de carbón del altiplano cundiboyacense el contenido de gas es menor al reportado por las tablas y que está directamente relacionado con la profundidad (Mariño, *et al.*, 2015).

Al contar con la información del contenido de gas metano en las diferentes cuencas del país, se puede pasar del nivel 1 al nivel 2 planteado por la metodología del IPCC, ya que los cálculos de nivel 1 utilizando las tablas internacionales del IPCC (1996) estarían sobredimensionando las emisiones y, por ende, implicando al país en emisiones de gases de efecto invernadero (metano) por encima de las propias del contexto colombiano. Por ello se recomienda hacer estas mediciones de nuevo tomando los datos en la ventilación para una posterior comparación con los valores internacionales estándar.

En la tabla 3 se observa que el valor total calculado a partir de estudios de CBM para el nivel 2 de las emisiones en el altiplano (16,47 Gg) es menor (solo el 27 %) que el valor calculado a partir de las tablas internacionales para nivel 1 (61,62 Gg) (Tabla 2). Esto se explica parcialmente por la exhumación de los carbones relacionados con la orogenia andina, pues al erosionarse las rocas suprayacentes, la presión confinante se redujo y parte del gas se escapó.

Los resultados evidencian que dado que los contenidos de gas metano asociado al carbón en las cuencas colombianas no son tan altos como los de los países productores donde se han realizado la mayoría de los estudios técnicos y las investigaciones, las emisiones de la extracción de carbón en Colombia resultan menores a las calculadas con factores de emisión internacionales (IPCC, 1996; UPME, 2016).

Como las emisiones de gases en las minas son dinámicas y se incrementan a medida que las labores mineras se profundizan, los índices de emisiones se deben ir actualizando con la información de nuevas perforaciones. También se debe investigar más sobre los contenidos de gas en las rocas circundantes para tener valores de mediciones directas y así eliminar el supuesto sobre dicho contenido en estratos circundantes.

Según el IPCC, la manera más exacta de calcular las emisiones en minería es midiendo los caudales y contenidos de metano en la ventilación de las minas (nivel 3) (IPCC, 1996), pero esta información no está siendo verificada ni solicitada por la entidad rectora del tema (Agencia Nacional de Minería-ANM).

Conclusiones

Primero, los cálculos de emisiones en la minería del altiplano basados en las tablas internacionales de contenido de gas a partir del rango del carbón (nivel 1: 61,62 Gg), exceden en más de 300 % los contenidos encontrados en mediciones directas (nivel 2: 16,47 Gg).

Segundo, las emisiones a nivel 1 en Cundinamarca y Boyacá convertidas al equivalente de CO₂ fueron de 1.540.300 toneladas.

Tercero, las emisiones a nivel 2 en Cundinamarca y Boyacá convertidas al equivalente de CO₂ fueron de 277.250 y 134.500 toneladas, respectivamente.

Cuarto, las emisiones fugitivas de la minería subterránea de Cundinamarca y Boyacá representaron casi el 30 % del total de las emisiones de Colombia asociadas a la minería del carbón.

Quinto, los valores relativamente bajos de contenido de gas en los carbones del altiplano se explican a partir de la exhumación de la cordillera Oriental por causa de la orogenia andina.

Sexto, al calcular las emisiones a partir de las tablas internacionales, se podría estar comprometiendo al país con emisiones de gases de efecto invernadero que excederían los factores reales de emisión, por lo que se recomiendan nuevos estudios con el método de toma de datos en ventilación.

Séptimo, la mejor manera de medir las emisiones es calcular los caudales y contenidos de metano en la ventilación de las minas (nivel 3 del IPCC), pero estos registros no existen porque no están siendo solicitados por la autoridad minera.

Agradecimientos

Esta investigación hace parte de los estudios adelantados por el Laboratorio de Hidrocarburos no Convencionales, Carbón, Gas Asociado al Carbón y Shales Carbonosos de la UPTC (Contrato RC N° CT 669/2009), financiado por Colciencias y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). También se tuvieron en cuenta los avances del “Estudio que defina estrategias para el aprovechamiento del gas metano asociado a los mantos de carbón en explotaciones bajo tierra”, contratado por la UPME con el consorcio EG – Carbón – Metano (2016).

Contribución de los autores

JEMM: redacción, recopilación de información y cálculo de los valores de gas asociado al carbón reportadas en el artículo; RDCB: recopilación de información y cálculo de los valores de gas asociado al carbón reportadas en el artículo y AMOG: redacción, edición y correcciones solicitadas por la revista para su publicación.

Conflicto de intereses

No existe conflicto de intereses con ninguna otra institución o persona sobre la investigación presentada.

Referencias

- Amaya, E., Mariño, J., Jaramillo, C. (2010). Litofacies y ambientes de acumulación de la formación guaduas en la parte central de la cordillera oriental – implicaciones paleo geográficas. *Boletín de Geología*. **32**: 1. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegeologia/article/view/1006/3704>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH – Universidad EAFIT. (2011). Valoración del potencial exploratorio CBM en la cuenca carbonífera de Amagá y Boyacá-Cundinamarca (Formación Guaduas). Convenio 014 de 2010. Bogotá.
- Cooper, M., Addison, F., Álvarez, R., Coral, M., Graham, H., Hayward, B., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *A.A.P.G Bulletin*. **81**: 1421-1443. https://www.researchgate.net/publication/249896522_Basin_Development_and_Tectonic_History_of_the_Llanos_Basin_Eastern_Cordillera_and_Middle_Magdalena_Valley_Colombia_Discussion

- COP 21-Acuerdo de París.** (2015). Fecha de consulta: 27 de abril de 2021. Recuperado de: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109s.pdf>
- Diamond, W. P. & Levine, J. R.** (1981). Direct Method Determination of the gas content of coal: Procedures and results. RI 8515. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines. Fecha de consulta: 27 de abril de 2021. Recuperado de: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/ri8515.pdf>
- Duarte, C. I. & Parra, F. A.** (2014) Exploración gas metano asociado al carbón. Área Tasco-Socotá. SGC-UPTC-sede Sogamoso. Fecha de consulta: 28 de abril de 2021. Recuperado de: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B9/22004002524678/Documento/pdf/2105246781101000.pdf>
- Duarte, C. & Mariño, J.** (2000). Utilización de las areniscas guías en la búsqueda y exploración de mantos de carbón. Caso Formación Guaduas – Sogamoso (Boyacá). Memorias V Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología del Carbón. Valledupar, Cesar. Fecha de consulta: 28 de abril de 2021. Recuperado de: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/download/3733/4160?inline=1>
- Houghton, J. T., Meiro Filho, L. G., Callander, B. A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K.** (1997). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, París: Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, IPCC/UNEP/OECD/IEA. Fecha de consulta: 28 de abril de 2021. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/mtdocs/pdfiles/tdbusum.pdf>
- INGEOMINAS.** (2004). El carbón colombiano, recursos, reservas y calidad. Publicaciones geológicas especiales. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía. Fecha de consulta: 28 de abril de 2021. Recuperado de <https://repositoriobi.minminas.gov.co/handle/123456789/2043>
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC** (1996) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual; Section 1.5 “Fugitive Emissions from Coal Mining and Handling”. Fecha de consulta: 28 de abril de 2021. Recuperado de: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/pdfiles/spnch1-2.pdf>
- Mariño J., Castro A., Angel A., Mojica L., Granados D., Acuña C.** (2015) “Desarrollo del CBM en Colombia,” en Gas asociado al carbón (CBM o GMAC). Geología, contenidos, reservas, minería y posibilidades en Colombia, p 125-128, Tunja, Colombia: Editorial UPTC.
- Mariño, J. & Amaya, E.** (2016). Lithofacies cyclicity determination in the Guaduas formation (Colombia) using Markov chains. *Earth Sciences Research Journal.* **20** (3): 3. <http://www.scielo.org.co/pdf/esrj/v20n3/1794-6190-esrj-20-03-000B1.pdf>
- Mojica L. & Mariño J.** (2013). Estado de la exploración y posibilidades de gas asociado al Carbón (GAC) en Boyacá (Colombia). *Boletín de Geología.* **35** (2): 1-41. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/3733/4122>
- Rincón, M. A., Duarte, C. I., Parra, F. A., Barbosa, S. R.** (2014) Exploración Gas Metano Asociado Al Carbón. Área Úmbita-Rondón. SGC-UPTC Sogamoso. <http://recordcenter.sgc.gov.co/B9/22004002524732/Documento/Pdf/2105247321101000.pdf>
- Sarmiento, G.** (1994). Estratigrafía y medios de depósito de la formación Guaduas. *Boletín Geológico.* **32** (1): 1-3. <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/Seriadas/Documents/BoletinGeolVol32No1-3.pdf>
- Sarmiento-Rojas, L., Van Wess, J., Cloetingh, S.** (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera. *South American Earth Sciences.* **21**: 383- 411. https://www.researchgate.net/publication/248481485_Mesozoic_transtensional_basin_history_of_the_Eastern_Cordillera_Colombian_Andes_Inferences_from_tectonic_models
- Unidad de Planeación Minero Energética-UPME - Consorcio EG Metano.** (2016). Estrategias para el aprovechamiento del gas metano asociado a los mantos de carbón en explotaciones bajo tierra. Fecha de consulta: 28 de abril de 2021. Recuperado de: http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Estrategias_para_el_aprovechamiento_del_Gas_Metano.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency - EPA.** (2006). Identifying Opportunities for Methane Recovery at U.S. Coal Mines: Profiles of Selected Gassy Underground coal mines 2002-2006. Fecha de consulta: 28 de abril de 2021. Recuperado de: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/profiles_2008_final.pdf
- U.S. Geological Survey-USGS.** (2004). Total petroleum system and assessment of coalbed gas in the Powder River Basin Province, Wyoming and Montana. (USGS, ed). USGS DDS-69-C. Fecha de consulta: 28 de abril de 2021. Recuperado de: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ds69C>
- Whitehead, P. G., R. L. Wilby, R. W. Battarbee, M. Kernan, A. J. Wade.** (2009). A Review of the Potential Impacts of Climate Change on Surface Water Quality. *Hydrological Sciences Journal.* **54** (1): 101-23. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.54.1.101?n>