



REVISTA DE LA ACADEMIA  
COLOMBIANA DE CIENCIAS  
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

[www.raccefyn.co](http://www.raccefyn.co)

## **Información suplementaria**

### **El cierre minero como aporte al reto de seguridad energética colombiana**

Mine closure as an opportunity to solve the Colombian energy problem

Camilo Montes, Lianette Rada, Angela Cadena

Correspondencia: Camilo Montes, [montes.camilo@gmail.com](mailto:montes.camilo@gmail.com)

### **Tabla de contenido**

Cálculos de intensidad de carbono para el gas natural licuado importado y para el carbón colombiano

Parte A. GNL (gas natural licuado) importado

- Unidad funcional
- Constantes y factores de conversión
- Parámetros de entrada por escenario
- Desarrollo de los cálculos

Parte B. Carbón térmico colombiano

- Unidad funcional
- Parámetros y factores de emisión
- Desarrollo de los cálculos

## Cálculos de intensidad de Carbono para el gas natural licuado importado y para el carbón colombiano

Este anexo presenta las ecuaciones y resultados utilizados para estimar la intensidad de carbono del ciclo de vida del gas natural licuado (GNL) importado (Parte A) y para el carbón térmico colombiano (Parte B).

### **Parte A. GNL (gas natural licuado) importado.**

Para el GNL, el cálculo se desarrolló en tres escenarios: bajo, medio y alto, abarcando las etapas de producción y procesamiento: upstream, midstream y downstream.

Los resultados se presentan para dos horizontes de caracterización del metano: 100 años ( $GWP_{100} = 28$ ) y 20 años ( $GWP_{20} = 85$ ).

#### **1. Unidad funcional**

La unidad funcional base es 1kg de GNL. A partir de esta, las emisiones se convierten posteriormente a unidades energéticas mediante el poder calorífico (PCI), y para generación eléctrica, mediante una eficiencia de la planta termoeléctrica del 55%.

$$(1) \text{ PCI} = 48 \text{ MJ/kg GNL}$$

$$(2) \eta_e = 0,55$$

Eficiencia eléctrica para convertir la intensidad por unidad de energía térmica en intensidad por kWh eléctrico.

#### **2. Constantes y factores de conversión**

| Parámetro                      | Valor              | Aplicación                             |
|--------------------------------|--------------------|----------------------------------------|
| Masa de referencia             | 1 kg de GNL        | Base de normalización                  |
| PCI del GNL                    | 48 MJ/ kg          | Conversión a intensidad energética     |
| Contenido energético de 1 MMcf | 1.094.000 MJ/ MMcf | Usado para covertir el factor upstream |

|                                                            |                                                  |                                        |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Masa equivalente por MMcf                                  | 22.791,66 kg de GNL/<br>MMcf                     | = 1.094.000/ 48                        |
| GWP del <b>CH<sub>4</sub></b> a 100 años                   | 28 kg CO <sub>2e</sub> / kg CH <sub>4</sub>      | Caracterización climática              |
| GWP del <b>CH<sub>4</sub></b> a 20 años                    | 85 kg CO <sub>2e</sub> / kg CH <sub>4</sub>      | Caracterización climática              |
| Oxidación de <b>CH<sub>4</sub></b> a <b>CO<sub>2</sub></b> | 2,75 Kg CO <sub>2e</sub> / kg<br>CH <sub>4</sub> | Relación de masas moleculares<br>44/16 |
| Eficiencia eléctrica                                       | 55%                                              | Conversión a gCO <sub>2e</sub> / kWh   |
| Factor <b>CO<sub>2</sub></b> de combustión                 | 94,6 kg CO <sub>2</sub> / GJ                     | Uso final                              |
| Factor <b>CH<sub>4</sub></b> de combustión                 | 0,001 kg CH <sub>4</sub> / GJ                    | Uso final                              |

### 3. Parámetros de entrada por escenario.

Los parámetros cuya unidad no se presenta se indica como variables adimensionales, ya que representan fracciones, coeficientes y factores obtenidos del cociente entre magnitudes iguales. Por lo que no poseen unidades físicas y se emplean como factores dentro de los cálculos de la intensidad de carbono del ciclo de vida del gas natural.

| Variable                                                               | Bajo        | Medio      | Alto       |
|------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|------------|
| Fuga <b>CH<sub>4</sub></b> upstream                                    | 0,004       | 0,06       | 0,1        |
| Factor <b>CO<sub>2</sub></b> upstream (t <b>CO<sub>2</sub></b> / MMcf) | 4,2         | 5,51       | 8,09       |
| Fuga fugitiva en licuefacción                                          | 0,0001      | 0,0004     | 0,0007     |
| Gas enviado a antorcha en licuefacción                                 | 0,00008     | 0,00409    | 0,008      |
| Pérdida en antorcha                                                    | 0,02        | 0,05       | 0,1        |
| Combustible consumido en licuefacción                                  | 0,053       | 0,1        | 0,2        |
| Pérdida del motor                                                      | 0,0002      | 0,0002     | 0,0002     |
| Días de viaje                                                          | 38          | 38         | 38         |
| Masa de carga (kg)                                                     | 117.000.000 | 96.750.000 | 78.750.000 |
| Consumo de GNL del buque (kg/ día)                                     | 130.000     | 130.000    | 130.000    |

|                                          |         |         |         |
|------------------------------------------|---------|---------|---------|
| Consumo de fuel oil (kg/ día)            | 167.000 | 167.000 | 167.000 |
| Tasa boil-off (kg/ kg* día)              | 0,001   | 0,00125 | 0,0179  |
| Fracción venteada del boil-off           | 0,02    | 0,1     | 0,2     |
| Pérdida en buques                        | 0,001   | 0,017   | 0,0313  |
| Fracción relicuefactada                  | 0       | 0       | 0       |
| Fuga en regasificación                   | 0,0001  | 0,0004  | 0,0007  |
| Combustible consumido en regasificación  | 0,011   | 0,0165  | 0,022   |
| Gas enviado a antorcha en regasificación | 0,00008 | 0,00409 | 0,008   |
| Pérdida de motor en regasificación       | 0,0002  | 0,0002  | 0,0002  |
| Pérdida de antorcha en regasificación    | 0,02    | 0,05    | 0,1     |

#### 4. Desarrollo de los cálculos

##### a. Producción y procesamiento upstream

Las emisiones upstream se separan en metano fugitivo y dióxido de carbono directo.

Para una unidad funcional de 1kg de GNL:

$$(3) CH_4_{up} = m_{GNL} \times f_{fuga,up}$$

Con  $m_{GNL} = 1\text{kg}$ , el resultado numérico coincide con la fracción de fuga upstream.

$$(4) CO_{2_{up}} = (FE_{CO_2, up} \times 1.000) / (1.094.000 / PCI)$$

##### b. Emisiones en el proceso de licuefacción – Midstream.

El metano emitido en la licuefacción incluye emisiones fugitivas, pérdidas durante la quema en antorcha y pérdidas asociadas al consumo de combustible en motores o equipos de combustión.

$$(5) CH_4_{lic} = f_{fug} + (f_{flare} \times slip_{flare}) + (f_{comb} \times slip_{engine})$$

$$(6) CO_2_{lic} = [(f_{comb} \times (1 - slip_{engine})) + (f_{flare} \times (1 - slip_{flare}))] \times 2,75$$

c. Emisiones en el transporte marítimo – Midstream.

El transporte se calcula para un trayecto de 38 días. El consumo específico de GNL del buque se asigna a la masa transportada y el boil-off se estima como una fracción diaria de la carga. Se considera la fracción relicuefactada igual a cero en los tres escenarios.

$$(7) LNG_{ship} = (días \times consumo_{GNL,día}) / masa_{carga}$$

$$(8) Boil_{off} = días \times tasa_{boil-off}$$

$$(9) Venteo_{boil-off} = Boil-off \times fracción_{venteo}$$

$$(10) CH_4_{trans} = (LNG_{ship} \times slip_{buque}) + Venteo_{boil-off}$$

$$(11) CO_2_{trans} = [LNG_{ship} \times (1 - slip_{buque})] \times 2,75$$

d. Emisiones en la regasificación – Downstream

$$(12) CH_4_{regas} = f_{fug,regas} + (f_{quema,regas} \times slip_{quema}) + (f_{comb,regas} \times slip_{engine,regas})$$

$$(13) CO_2_{regas} = [(f_{quema,regas} \times (1 - slip_{quema})) + (f_{comb,regas} \times (1 - slip_{engine,regas}))] \times 2,75$$

e. Emisiones en el proceso de combustión para generación eléctrica – Downstream.

$$(14) CH_4_{elec} = FE_{CH_4} \times PCI_{GNL} = 0,001 \text{ kg / GJ} \times 0,048 \text{ GJ / kg}$$

$$(15) CO_2_{elec} = FE_{CO_2} \times PCI_{GNL} = 94,6 \text{ kg / GJ} \times 0,048 \text{ GJ / kg}$$

Por tanto, para cada escenario:  $CH_4_{elec} = 0,000048 \text{ kgCH}_4/\text{kg GNL}$  y  $CO_2_{elec} = 4,5408 \text{ kgCO}_2/\text{kg GNL}$ .

4.6 Agregación por etapa y conversión a  $CO_2$  equivalente.

Las emisiones de metano y dióxido de carbono se agrupan en tres bloques de resultados: upstream, midstream y downstream.

$$(16)E_{100} = \text{CO}_2 + (\text{CH}_4 \times 28)$$

$$(17)E_{20} = \text{CO}_2 + (\text{CH}_4 \times 85)$$

$$(18)\text{IC\_MJ} = (E / \text{PCI}) \times 1.000$$

Resultado en gCO<sub>2e</sub>/MJ, con E en kg CO<sub>2e</sub>/kg GNL y PCI en MJ/kg

$$(19)\text{IC\_kWh} = (\text{IC\_MJ} / \eta_e) \times 3,6$$

Resultado en gCO<sub>2e</sub>/kWh eléctrico.

### **Parte B. Carbón térmico colombiano.**

Este anexo reproduce los datos y fórmulas usados para los resultados de la intensidad de carbono del carbón en unidades comparables de kg CO<sub>2e</sub> / kg de carbón, g CO<sub>2e</sub> / MJ y g CO<sub>2e</sub> / kWh eléctrico.

Los resultados se presentan para dos horizontes de caracterización del metano: 100 años (GWP<sub>100</sub> = 28) y 20 años (GWP<sub>20</sub> = 85). Para el proceso de combustión se consideran tres escenarios, dependiendo de las centrales termoeléctricas: subcríticas, supercríticas y ultrasupercríticas.

#### **1. Unidad funcional**

La unidad funcional empleada es 1kg de carbón procesado, equivalente a 0,001 toneladas. El poder calorífico inferior utilizado es 30,5 GJ/ t, equivalente a 30,5 MJ/ kg.

$$(1) m_{\text{carbón}} = 0,001 \text{ t} = 1\text{kg}$$

$$(2) \text{PCI} = 30,5 \text{ GJ/ t} = 30,5 \text{ MJ/ kg}$$

#### **2. Parámetros y factores de emisión**

| Parámetro                               | Valor | Unidad/ aplicación     |
|-----------------------------------------|-------|------------------------|
| Carbón procesado                        | 0,001 | T (equivale a 1kg)     |
| PCI                                     | 30,5  | GJ/t                   |
| FE <b>CO</b> <sub>2</sub> de combustión | 94,6  | kg CO <sub>2</sub> /GJ |

|                                              |        |                                         |
|----------------------------------------------|--------|-----------------------------------------|
| Electricidad en beneficio                    | 5      | kWh/t                                   |
| FE electricidad de red                       | 0,18   | kg CO <sub>2</sub> /kWh                 |
| Diésel auxiliar en planta                    | 0,2    | L/t                                     |
| FE del diésel                                | 2,68   | kg CO <sub>2</sub> /L                   |
| FE transporte ferroviario                    | 0,062  | kg CO <sub>2</sub> /(t*km)              |
| Distancia de transporte                      | 80     | km                                      |
| <b>CH</b> <sub>4</sub> residual en beneficio | 0,005  | kg CH <sub>4</sub> /t                   |
| FE <b>CH</b> <sub>4</sub> de combustión      | 1      | Kg CH <sub>4</sub> /TJ                  |
| Consumo vacío CAT 789C                       | 4,2    | L/km                                    |
| Consumo cargado CAT 789C                     | 6,81   | L/km                                    |
| Capacidad de acarreo                         | 181    | t                                       |
| Relación estéril/ carbón                     | 1:7    | $m^3$ de estéril por t de carbón        |
| Densidad del estéril                         | 2,4    | $t/m^3$                                 |
| Consumo por viaje al botadero                | 55,09  | L/viaje                                 |
| Consumo por viaje al silo                    | 132,24 | L/viaje                                 |
| Factor de explosivos                         | 0,17   | kg CO <sub>2</sub> /kg de explosivo     |
| GWP del <b>CH</b> <sub>4</sub> a 20 años     | 85     | kg CO <sub>2e</sub> /kg CH <sub>4</sub> |
| GWP del <b>CH</b> <sub>4</sub> a 100 años    | 28     | kg CO <sub>2e</sub> /kg CH <sub>4</sub> |

### 3. Desarrollo de los cálculos

#### 3.1. Emisiones en el proceso de extracción – Upstream.

La etapa de extracción reúne las emisiones de diésel asociadas al movimiento de estéril y carbón, el uso de explosivos y las emisiones de metano de la mina. Además de las emisiones fugitivas de metano. Esta última se estimó a partir de una tasa específica de emisión de metano por tonelada de carbón producida.

$$(1) CH_4, up = Te \times R$$

Aquí Te es el promedio de las tasas de emisión medidas en las plumas observadas por Carbon Mapper (kg CH<sub>4</sub>/h y R es la tasa de producción horaria de la mina (t/h).

$$(2) R = Panual / Hop$$

Donde Panual es la producción anual de carbón de la mina (t/año) y Hop son las horas efectivas de operación por año (h/año).

$$(3) M_{estéril} = V_{estéril} \times p_{estéril}$$

$$(4) N_{viajes} = M_{estéril} / capacidad_{camión}$$

$$(5) E_{diésel} = [(N_{viajes} \times consumo_{viaje, botadero}) \times FE_{diésel}] + E_{diésel, silo}$$

$$(6) E_{explosivos} = M_{explosivos} \times 0,17$$

### 3.2. Emisiones en el procesamiento y beneficio del carbón - Upstream

$$(7) E_{electricidad} = m_{carbón} \times consumo_{eléctrico} \times FE_{red}$$

$$(8) E_{diésel, planta} = m_{carbón} \times consumo_{diésel} \times FE_{diésel}$$

$$(9) CH_4_{beneficio} = m_{carbón} \times FE_{CH_4, residual}$$

### 3.3. Emisiones en el transporte terrestre – Midstream

Se calcula mediante un factor ferroviario de 0,062 kgCO<sub>2</sub>/(t\*km), una masa de 0,001t y una distancia de 80km.

$$(10)E_{\text{transporte}} = m_{\text{carbón}} \times \text{distancia} \times \text{FE-tren}$$

$$(11)E_{\text{transporte}} = 0,001 \times 80 \times 0,062 = 0,004960 \text{ kg CO}_2/\text{kg carbón}$$

#### 3.4. Emisión en el proceso de combustión – Downstream

$$(12)\text{Energía} = m_{\text{carbón}} \times \text{PCI} = 0,001 \text{ t} \times 30,5 \text{ GJ/t} = 0,0305 \text{ GJ}$$

$$(13)\text{CO}_2_{\text{comb}} = \text{Energía} \times \text{FE}_{\text{CO}_2} = 0,0305 \times 94,6 = 2,8853 \text{ kg CO}_2$$

$$(14)\text{CH}_4_{\text{comb}} = (0,0305/1.000) \text{ TJ} \times 1 \text{ kg CH}_4/\text{TJ} = 0,0000305 \text{ kg CH}_4$$

#### 3.5. Conversión a CO<sub>2</sub> equivalente y unidades energéticas

$$(15)E_{20} = \text{CO}_2 + (\text{CH}_4 \times 85)$$

$$(16)E_{100} = \text{CO}_2 + (\text{CH}_4 \times 28)$$

$$(17)\text{IC}_{\text{MJ}} = (E / \text{PCI}) \times 1.000$$

$$(18)\text{IC}_{\text{kWh}} = (\text{IC}_{\text{MJ}} / \eta_e) \times 3,6$$

Las eficiencias eléctricas utilizadas son 0,35 para planta subcrítica, 0,45 para supercrítica y 0,50 para ultrasupercrítica.