



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estimación de la emisión histórica de gases de efecto invernadero por embalses hidroeléctricos en Colombia y su potencial impacto en el Factor de Emisión de la Generación Eléctrica

Frank Mayor Ruiz

Universidad Nacional de Colombia
Departamento de ingeniería química y ambiental
Bogotá D.C., Colombia

2016

Estimación de la emisión histórica de gases de efecto invernadero por embalses hidroeléctricos en Colombia y su potencial impacto en el Factor de Emisión de la Generación Eléctrica

Frank Mayor Ruiz

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Ambiental (perfil de profundización)

Director:
Ph.D. Rodrigo Jiménez Pizarro

Grupo de Investigación en Calidad del Aire –GICA-

Universidad Nacional de Colombia
Departamento de ingeniería química y ambiental
Bogotá D.C., Colombia

2016

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C, mayo de 2016

A mi madre y hermano, que siempre son una voz de aliento.

A Mary, Manuela y Samuel, gracias por su apoyo y paciencia constante.

AGRADECIMIENTOS

Especial y sentido agradecimiento al doctor Rodrigo Jiménez, director del proyecto, por su confianza y paciencia y sobre todo por haberme dado la oportunidad pese a que ello significara un riesgo, dada mi formación de base como ingeniero electricista con escasos conocimientos en el área de las ciencias y la investigación.

A los profesores y compañeros de curso por sus aportes, críticas y ayudas en los momentos que así lo demandaron.

Resumen

Globalmente, los sistemas de generación hidroeléctrica son considerados como energía limpia y renovable (y esto es cierto). Sin embargo, recientemente algunos estudios han sugerido la relevancia que presentan las emisiones procedentes de los embalses requeridos para este tipo de sistemas de generación. En el caso colombiano, la generación de energía eléctrica procede en un 70% de sistemas hidroeléctricos, los cuales son de cero emisiones y como consecuencia, las emisiones asociadas a la generación eléctrica solo contabilizan las procedentes de tecnologías que utilizan combustibles fósiles en sus procesos. En el presente documento, se presentan los resultados obtenidos de emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 y CH_4) de algunos embalses hidroeléctricos en Colombia que representarían un porcentaje adicional a lo que actualmente está considerando el país como emisiones del sistema de generación de energía eléctrica. De acuerdo con las estimaciones hechas, estas emisiones representarían un porcentaje adicional, a las provenientes de la generación termoeléctrica (aquella que utiliza combustibles fósiles), que oscila entre el 11 y 20%.

Para esto, fue utilizada la metodología propuesta por el IPCC 2006 y se propone un modelo matemático que permite hacer la estimación de emisiones asociadas al sector de la generación hidroeléctrica en Colombia y el impacto que estas emisiones adicionales generan sobre el Factor de Emisiones de la Generación Eléctrica –FEGE-.

Palabras clave: Emisiones de hidroeléctricas, emisiones de reservorios, CO_2 y CH_4 provenientes de embalses hidroeléctricos

Summary

Worldwide, hydroelectric generation systems are considered as a clean and renewable energy source (and this is true). However, some studies have recently suggested the relevance of greenhouse gas emissions from the reservoirs for this type of generation systems. In Colombia, the generation of electric energy comes in 70% of hydroelectric systems, which are zero emissions and as a consequence, greenhouse gas emissions associated with electricity generation only account for those coming from technologies that use fossil fuels in their processes.

The present dissertation presents the results obtained from greenhouse gas emissions (CO₂ and CH₄) from some hydroelectric dams in Colombia that would represent an additional percentage to what the country is currently considering as emissions from the electric power generation system. According to the estimates made, these emissions would represent an additional percentage, between 11% and 20%, of those coming from thermoelectric generation (which uses fossil fuels).

For this study, the methodology proposed by the IPCC 2006 was followed and a mathematical model is proposed, which allows an estimation of emissions associated to the hydroelectric generation sector in Colombia and the impact that these additional emissions generate on the Generation Emission Factor Electrical-FEGE-.

Keywords: Hydroelectric emissions, reservoir emissions, CO₂ and CH₄ from hydroelectric dams.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
1. ESTIMACIÓN DE LA EMISIÓN HISTÓRICA DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR EMBALSES HIDROELÉCTRICOS EN COLOMBIA Y SU POTENCIAL IMPACTO EN EL FACTOR DE EMISIÓN DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA	20
1.1 CONTEXTO Y MARCO TEÓRICO	20
1.1.1 Formación de gases de efecto invernadero en embalses hidroeléctricos ...	25
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	30
1.3 METODOLOGÍA.....	32
1.3.1 Pasos metodológicos, cálculos y resultados obtenidos.....	33
1.4 IMPLICACIONES ADICIONALES.....	50
1.5 CONCLUSIONES.....	53

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de participación en producción de energía eléctrica a nivel mundial – Año 2013	21
Tabla 2. Embalses hidroeléctricos colombianos sobre los cuales se estimaron las emisiones de GEI	34
Tabla 3. Emisiones totales de GEI (CO ₂ y CH ₄) provenientes de embalses hidroeléctricos en Colombia con datos del IPCC 2006	35
Tabla 4. Embalses hidroeléctricos tropicales utilizados para obtener mediana de Ef.....	36
Tabla 5 Emisiones de GEI provenientes de embalses hidroeléctricos tropicales	37

Tabla 6. Emisiones totales de GEI (CO ₂ y CH ₄) provenientes de embalses hidroeléctricos en Colombia con datos de la mediana de embalses tropicales	38
Tabla 7 Emisiones totales de GEI (CO ₂ y CH ₄) provenientes de embalses hidroeléctricos en Colombia utilizando el modelo matemático de los embalses tropicales.....	40
Tabla 8 Embalses cuyas emisiones se estimaron por cada año entre 2013 y 2015.....	41
Tabla 9. Emisiones de GEI (CO ₂ y CH ₄) provenientes de embalses hidroeléctricos en Colombia por cada método utilizado en su estimación.....	42
Tabla 10 Medianas interanuales del FEGE para el periodo junio de 2013 a diciembre de 2015	49
Tabla 11. Características y aportes de GEI de Ituango	51
Tabla 12. Características y aportes de GEI de Ituango	51
Tabla 13 Comparativo de emisiones y densidad de potencia.....	52
Tabla 14 Comparativo de emisiones de CO ₂ y CH ₄	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Histórico de emisiones y FEGE en Colombia, junio de 2013 a diciembre de 2015	17
Figura 2. Producción de energía eléctrica entre 1973 y 2013	21
Figura 3. Porcentaje de participación en producción de energía eléctrica a nivel mundial – Año 2013	22
Figura 4. Histórico de generación de energía eléctrica	23
Figura 5. Histórico porcentual de generación de energía eléctrica.....	24
Figura 6. Perfil vertical de temperatura en los embalses	27
Figura 7. Factores que permiten la formación de GEI y vías de emisión.....	30
Figura 8. Ln(FEGE) como función del Ln(DP) en los embalses hidroeléctricos tropicales	40

Figura 9. Emisiones anuales de CO ₂ y CH ₄ de los embalses hidroeléctricos colombianos utilizando datos del IPCC 2006.....	43
Figura 10. Porcentaje de emisiones anuales de CO ₂ y CH ₄ de los embalses hidroeléctricos colombianos utilizando datos del IPCC 2006	44
Figura 11. Emisiones anuales de CO ₂ y CH ₄ de los embalses hidroeléctricos colombianos utilizando datos de las medianas de embalses tropicales	45
Figura 12. Porcentaje de emisiones anuales de CO ₂ y CH ₄ de los embalses hidroeléctricos colombianos utilizando datos de las medianas de embalses tropicales	46
Figura 13. Comparativo de los aportes adicionales de emisiones provenientes de embalses hidroeléctricos en Colombia a los reportes de la UPME.....	47
Figura 14. Porcentajes adicionales de emisiones de GEI provenientes de los embalses hidroeléctricos en Colombia a los reportes de la UPME.....	48
Figura 15. Comparación de los FEGE obtenidos a partir de cada método utilizado en la estimación de emisiones.....	50

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un elemento fundamental en el desarrollo de los países. No obstante, en los últimos tiempos el consumo de energía eléctrica presenta una tendencia en reducirse sin perder efectividad o calidad en las actividades que demandan del recurso. Mientras el consumo per cápita tiende a decrecer, el número de consumidores y de actividades que necesitan de energía eléctrica ha venido aumentando, y como consecuencia, deben aumentar las fuentes de suministro de la misma (las tecnologías de generación).

La energía eléctrica se genera a través de diferentes tecnologías en donde los combustibles fósiles juegan un papel primordial. Sin embargo, la tendencia a nivel mundial es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero –GEI- provenientes de los procesos en los cuales se ven involucrados dichos combustibles (incluidos los de generación eléctrica). Por tal razón, la tendencia global es generar energía eléctrica a partir de tecnologías alternativas en las cuales se reduzca las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de sus diferentes procesos.

Una de las alternativas de mayor presencia en la generación de energía es la hidroeléctrica que se ha convertido en la principal¹ fuente de suministro de energía

¹ De acuerdo con el informe de la situación hidroeléctrica 2015 presentado por la International Hydropower Association –IHA- existen casos representativos de generación hidroeléctrica como por ejemplo Canadá donde la hidroelectricidad cuenta con una capacidad instalada cercana a los 79,6 GW (63% del total); en Suramérica cerca del 50% de la generación eléctrica se hace a partir de sistemas hidráulicos con Brasil a la cabeza y superado únicamente por China que cuenta con alrededor de 282 GW instalados. Colombia, en el cuadro suramericano se ubica en 2014 en el tercer lugar de capacidad hidroeléctrica instalada superado solo por Brasil y Venezuela. EL total de capacidad instalada en Suramérica en 2014 fue de 147880 MW de los cuales Brasil representa el

eléctrica, que no usa combustibles fósiles. Esta se trata de una tecnología que usa un recurso renovable como es el agua sin embargo, no se trata de una generación de cero emisiones de GEI ya que la construcción de las facilidades (principalmente la construcción de los embalses, Weisser, 2007) para el proceso de producción de energía tiene emisiones asociadas (considerando el ciclo de vida de los embalses requeridos: materiales de construcción, vehículos utilizados, etc.) y como se verá en el presente documento, la operación de los embalses asociados a dichas facilidades presenta emisiones² de gases de efecto invernadero que deben sumarse a los inventarios nacionales que cada país elabore (considerando que actualmente los esfuerzos a nivel mundial propenden la mitigación del cambio climático, lo que hace que se cuantifiquen las diferentes actividades humanas en términos de GEI (International Hydropower Association, 2015)).

En países de la comunidad europea así como de Asia y Norteamérica, la preocupación por su contribución a las emisiones globales se hace evidente dada su dependencia de los combustibles fósiles (un alto porcentaje de su energía eléctrica generada depende de combustibles fósiles). Por tal razón, sus políticas se encaminan hacia un compromiso en disminuir la emisión de gases de efecto invernadero. En el caso colombiano, se considera que el país es de emisiones modestas de gases de efecto invernadero (la energía eléctrica generada depende en un 70% de hidroeléctricas y cerca de un 30% dependen de combustibles fósiles que son las que aportan GEI al inventario nacional). No obstante,

60,4% y Colombia el 7,3%; no obstante en 2014 Colombia ocupó el segundo lugar en capacidad agregada con una adición de 820 MW.

² De acuerdo con Demarty, M., Bastien, J., 2011. GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emission measurements; existen factores autóctonos y externos al embalse y al área inundada que permiten la formación de GHG: materia orgánica existente en el área del embalse y que se descompone posterior a la inundación, materia orgánica que ingresa a través de los cuerpos de agua que aportan el recurso al embalse, materia orgánica que crece dentro del embalse y en sus zonas de abatimiento.

el país ha manifestado su compromiso de reducir en un 20% sus emisiones totales a 2030 (García Arbeláez, Barrera, Gómez & Suárez Castaño, 2015)³.

Colombia se proyecta como una potencia en la generación de energía eléctrica en Latinoamérica⁴, apostando por energías alternativas (convencionales y no convencionales) que garanticen el mínimo de emisiones. Una de esas grandes apuestas corresponde a la energía hidroeléctrica (con embalses) considerada como una de las principales fuentes de generación en el país⁵ y de energía limpia con un recurso renovable de gran disponibilidad: el agua.

A nivel global, este desarrollo y crecimiento de la industria hidroeléctrica se justifica en un aumento general de la demanda de energía y fundamentalmente en la confiabilidad y disponibilidad que presenta el recurso primario utilizado en esta industria (agua); esto se suma a la posibilidad de almacenamiento de energía en forma de embalses y sobre la

³ García Arbeláez, C., Barrera, X., Gómez, R., Suárez Castaño R., 2015. El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21, WWF-Colombia 31 pp.

⁴ De acuerdo con la Organización Latinoamericana de Energía –OLADE-, 2014, El camino a seguir para la ampliación de proyectos de energía renovable; a nivel de Suramérica, Colombia a 2012 ocupaba el cuarto lugar en capacidad hidroeléctrica instalada (9300 MW de un total de 14558 MW); el primer puesto es ocupado por Brasil (83230 MW de un total de 126772 MW). Adicionalmente, de acuerdo con Renewable Energy Policy Network for the 21st Century –REN21-, el reporte anual presentado en 2014 mostró un valor de capacidad hidroeléctrica instalada, a nivel mundial en 2014, de 1055 GW (que representan cerca del 16,6% del total de capacidad instalada incluyendo todas las tecnologías posibles); de esta capacidad, Brasil representaba el 8,5%. De acuerdo con la International Hydropower Association –IHA- en 2104 Colombia ocupó el tercer lugar en capacidad instalada en Suramérica.

⁵ La Unidad de Planeación Minero Energética –UPME- a diciembre de 2015 reportó una participación hidroeléctrica del 70% de la generación total del país.

cual se puede ejercer control dependiendo de las condiciones de demanda que se presenten.

En el caso colombiano, de acuerdo con los informes presentados por la Unidad de Planeación Minero Energética –UPME-, la generación de energía eléctrica en el país reporta emisiones asociadas de Gases de Efecto Invernadero –GEI- procedentes de la generación de energía eléctrica en la cual se utilizan combustibles fósiles. Sin embargo, no consideran las emisiones que puedan provenir de los embalses hidroeléctricos del país (como se dijo anteriormente, la generación hidroeléctrica representa el 70% de la matriz de generación eléctrica) los cuales pueden representar un aporte considerable al inventario nacional así como una injerencia sobre el Factor de Emisión de la Generación Eléctrica –FEGE- (también reportado por la UPME) para los sistemas de generación conectados al Sistema Interconectado Nacional –SIN-.

A diciembre de 2015⁶, Colombia contaba con una capacidad total instalada de 16.436 MW de los cuales el 70% (11.500 MW) procedían de fuente hidráulica. Como se dijo anteriormente, la UPME no reporta emisiones procedentes de este tipo de sistemas sin embargo las mismas y las reportadas desde junio de 2013 corresponden a aquellos sistemas donde se utilizan combustibles fósiles en sus procesos.

Entre junio de 2013 y diciembre de 2015 la UPME reportó⁷ un valor medio del Factor de Emisión de la Generación Eléctrica –FEGE- de 0,182 tCO₂/MWh (la metodología utilizada por la UPME para el cálculo del FEGE corresponde a la establecida en la Resolución

⁶ Se considera diciembre de 2015 dado que es la fecha del último reporte de generación de energía eléctrica y emisiones asociadas presentado por la UPME.

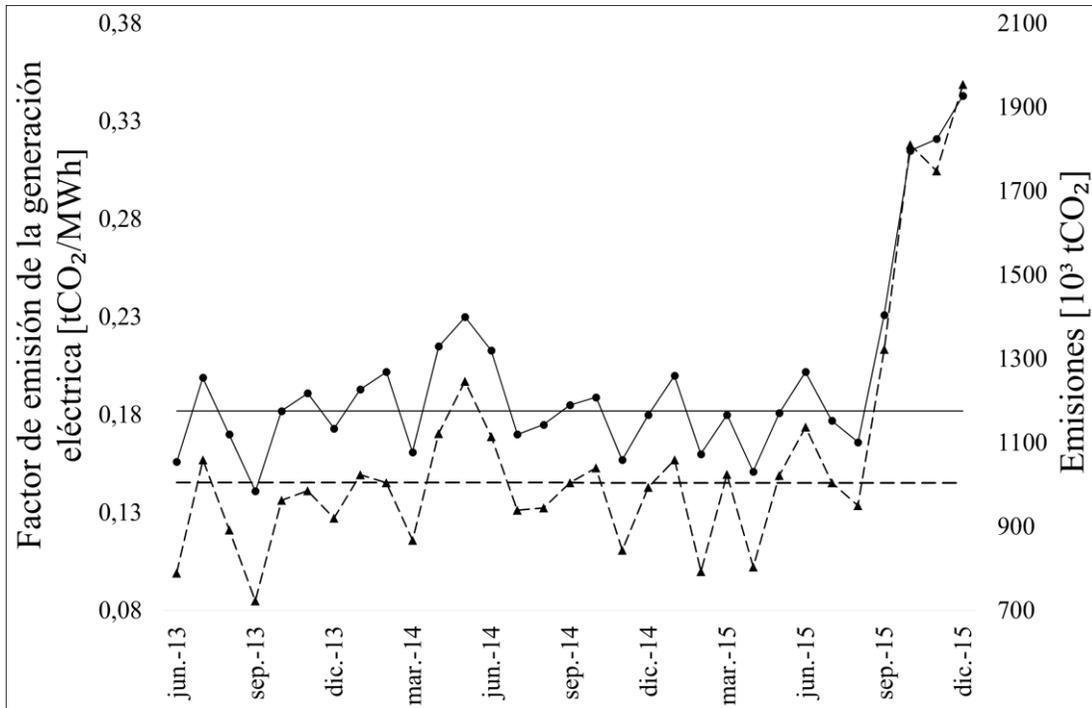
⁷ Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano. Unidad de Planeación Minero Energética –UPME-, análisis mes a mes entre junio de 2013 y diciembre de 2015.

91304 de 2015⁸). Las emisiones se reportan hasta diciembre de 2015 con una media de 1005×10^3 tCO₂ (ver Figura 1). Durante el segundo semestre de 2015, las emisiones alcanzan un aumento representativo, llegando hasta las 1955×10^3 tCO₂, debido al aumento en el aporte de los sistemas de generación termoeléctrica, situación dada por efectos del fenómeno El Niño que limitó la capacidad de almacenamiento y generación de las hidroeléctricas. En el cálculo de emisiones no contabilizaron las emisiones procedentes de las centrales de generación hidroeléctrica y al revisar la metodología empleada por la UPME para tal cálculo se observa que la misma descarta la generación hidroeléctrica (durante la operación) como una fuente de emisiones de GEI (para la construcción⁹, aunque la metodología lo nombra, no hacen el cálculo), (de acuerdo con Weisser, D., 2007, las emisiones de las hidroeléctricas se atribuyen principalmente a la construcción de los embalses).

⁸ *"Por la cual se adopta el factor marginal de emisión de gases de efecto invernadero del Sistema Interconectado Nacional para proyectos aplicables al Mecanismo de Desarrollo Limpio – MDL".*

⁹ La International Hydropower Association –IHA- cita como factor de emisión atribuible a la construcción de las hidroeléctricas un valor de 1 a 2 gCO₂eq/kWh.

Figura 1. Histórico de emisiones y FEGE en Colombia, junio de 2013 a diciembre de 2015
 Fuente: Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano, UPME -2103 a 2015



Emisión histórica de Gases de Efecto Invernadero –GEI- y del Factor de Emisión de la Generación Eléctrica –FEGE-. Corresponde al reporte presentado por la UPME para el periodo junio de 2103 a diciembre de 2015.

Meidana de emisiones de GEI = 1005×10^3 tCO₂

Mediana del FEGE = 0,182 tCO₂/MWh

(●) Factor de Emisión de la Generación Eléctrica - FEGE-, (—) Mediana del FEGE, (▲) Emisiones de Gases de Efecto Invernadero -GEI-, (---) Mediana de emisiones de GEI.

Al no considerar los embalses hidroeléctricos como una fuente de emisiones de GEI, se desconoce que “*todos los sistemas de energía emiten gases de efecto invernadero*” (Weisser., D., 2007; Hanne, R., Gagnon, L., Modahl, I., Hanssen, O., 2011) y que tales embalses producen CO₂ y CH₄ (Abril et al., 2005; Fearnside, P.M., 2015; de Lima, 2002; Delmas et al., 2005; Rosa,L.P, et al., 2004; Demarty & Bastien, 2011; entre otros) que son un aporte adicional a las emisiones calculadas para el SIN.

Otros factores que hacen importante contabilizar las emisiones procedentes de los embalses hidroeléctricos corresponden a la ubicación, en el caso colombiano, de los mismos en zonas tropicales. En estas zonas, los embalses se caracterizan por poseer altos contenido de materia orgánica, alta sedimentación y aguas de altas temperaturas con capas ausentes de oxígeno, que corresponden a una gran contribución en la formación de gases de efecto invernadero los cuales son liberados a la atmósfera (principalmente CO₂ y CH₄, este último con un potencial de calentamiento global de 21 veces el del CO₂ (IPCC, 2007)), (Demarty & Bastien, 2011). Además, de acuerdo con el Intergovernmental Panel on Climate Change –IPCC 2006, las emisiones de gases de efecto invernadero –GEI- provenientes de los embalses deben ser cuantificadas durante la totalidad del ciclo de vida del embalse, es decir, no exclusivamente durante la construcción de los mismos.

Por lo anterior, el presente estudio busca un primer acercamiento en el caso colombiano, en donde se incluyan las emisiones procedentes de los embalses hidroeléctricos estimando el aporte de los mismos al FEGE y la proyección futura de tal factor de emisión considerando los nuevos proyectos hidroeléctricos que para el país contempla la UPME.

Para estimar las emisiones procedentes de los embalses hidroeléctricos en Colombia, se hizo un primer cálculo de acuerdo con las directrices del IPCC 2006¹⁰ a partir de las cuales fue posible obtener emisiones de CO₂ y CH₄ por difusión (las que ocurren en la interfase agua aire en la superficie del embalse). Es importante enfatizar que el IPCC recomienda que para las emisiones de CH₄ se realice un muestreo para cada caso.

¹⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change –IPCC-. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero – Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra – Apéndice 2: Estimación de las emisiones de CO₂ provenientes de las tierras convertidas en tierras permanentemente inundadas. Apéndice 3: Estimación de las emisiones de CH₄ provenientes de tierras inundadas: Base para su futuro desarrollo metodológico.

La metodología del IPCC 2006 permite calcular las emisiones difusas de CO₂ y CH₄ a partir de medianas obtenidas para cada gas en diferentes climas (polar, templado, tropical) sin embargo, el IPCC 2006 no da cuentas para el cálculo de emisiones por ebullición (burbujas que emergen desde el fondo del embalse hacia la atmósfera, CH₄ principalmente).

Posteriormente, de datos de emisiones de CO₂ y de CH₄ registrados de embalses tropicales (Demarty & Bastien, 2011) se obtuvo una mediana de emisiones para cada gas. Con estos datos obtenidos se hizo un nuevo cálculo de las emisiones procedentes de los embalses hidroeléctricos en el país.

Finalmente, de los embalses hidroeléctricos tropicales se obtuvo un modelo matemático a partir del comportamiento del FEGE con respecto a la Densidad de Potencia. Una vez obtenido el modelo se parametrizaron datos de densidades de potencia de los embalses hidroeléctricos colombianos, se calculó el FEGE y se estimaron una vez más las emisiones. La estimaciones se compararon de acuerdo con los métodos implementados observando una similitud entre cada una de ellas.

1. ESTIMACIÓN DE LA EMISIÓN HISTÓRICA DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR EMBALSES HIDROELÉCTRICOS EN COLOMBIA Y SU POTENCIAL IMPACTO EN EL FACTOR DE EMISIÓN DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

1.1 CONTEXTO Y MARCO TEÓRICO

Desde 1973 y hasta 2013, la producción de energía eléctrica en el mundo ha crecido de manera vertiginosa presentando un incremento anual promedio del 3,4%¹¹ (ver Figura 2). En 2013, a nivel global la producción de energía eléctrica (23.391 TWh) era encabezada por tecnologías que demandan combustibles fósiles, seguidas de las plantas hidroeléctricas, nucleares, de biocombustibles y residuos urbanos, geotérmica, solar, eólica entre otras (ver Tabla 1 y Figura 3).

¹¹ International Energy Agency, 2015. Key electricity trends. Excerpt from: Electricity information.

Figura 2. Producción de energía eléctrica entre 1973 y 2013
 Fuente: International Energy Agency, 2015. Key electricity trends

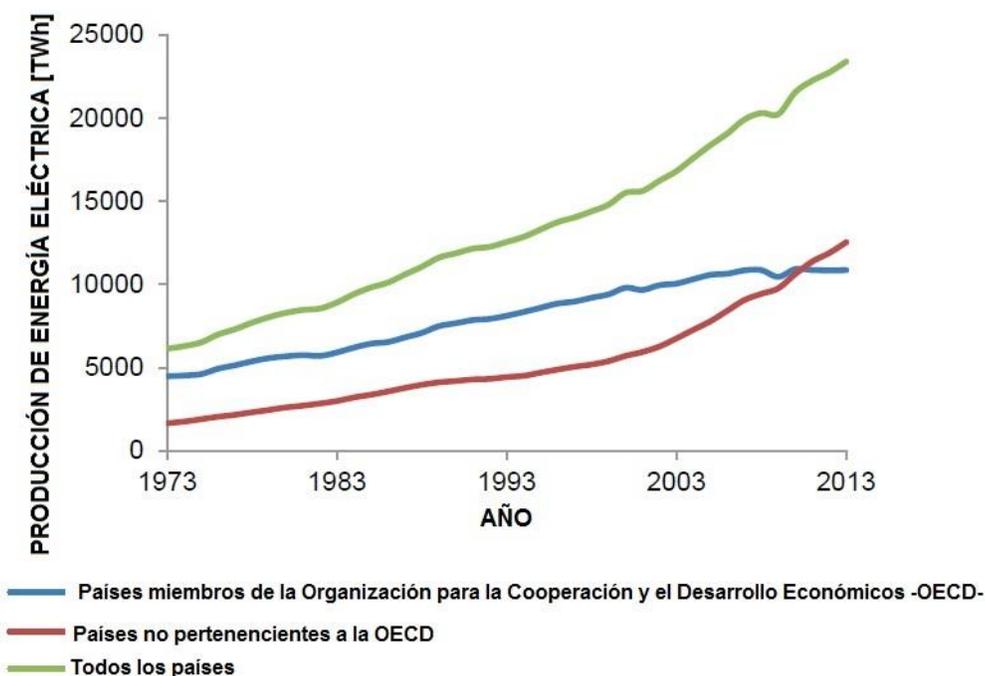


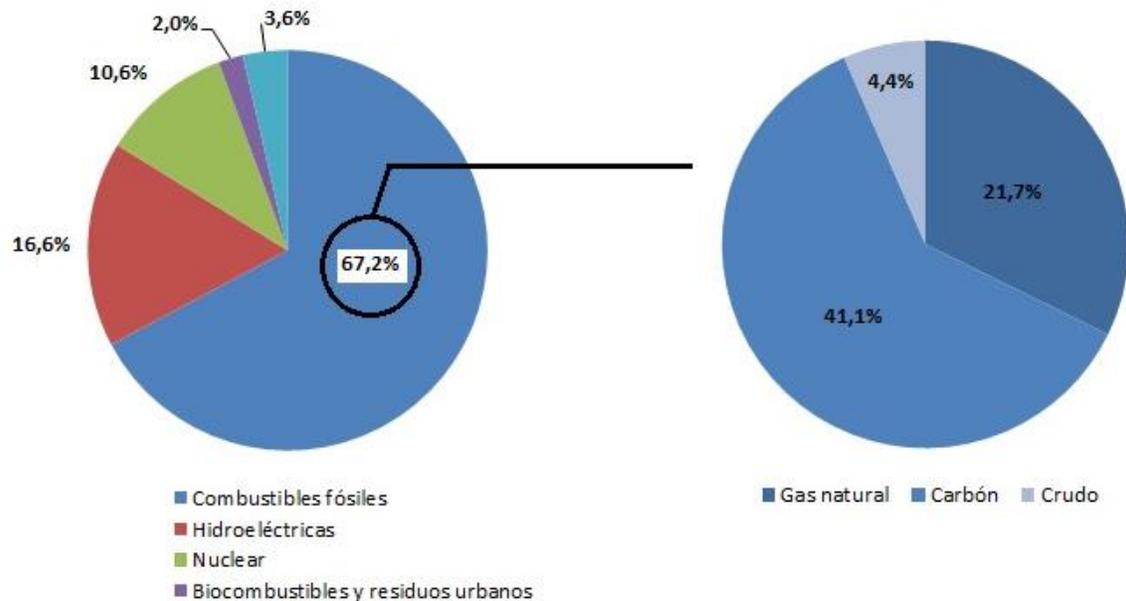
Tabla 1. Porcentaje de participación en producción de energía eléctrica a nivel mundial –
 Año 2013

Tipo de tecnología utilizada en la producción de energía eléctrica - año 2013	Porcentaje de participación en la producción mundial de energía eléctrica
Combustibles fósiles	67,2%
Hidroeléctricas	16,6%
Nuclear	10,6%
Biocombustibles y residuos urbanos	2,0%
Geotérmica, solar, eólica y otras	3,6%
TOTAL	100,0%

Fuente: International Energy Agency, 2015. Key electricity trends.

Figura 3. Porcentaje de participación en producción de energía eléctrica a nivel mundial –
Año 2013

Fuente: International Energy Agency, 2015. Key electricity trends



Como puede verse, a nivel mundial un alto porcentaje (67,2%) de la generación de energía eléctrica se lleva a cabo mediante el uso de combustibles fósiles utilizando tecnologías que permiten la transformación de la energía almacenada en dichos combustibles, a través de procesos de combustión, en electricidad. A estos procesos de combustión se asocian emisiones de gases de efecto invernadero –GEI- principalmente CO₂ y CH₄ que de acuerdo con la información presentada por el IPCC 2014¹², al año 2010 cerca del total de emisiones globales (49 GtCO_{2eq}) se atribuyen 14,4 GtCO_{2eq} a la “Producción eléctrica y térmica”.

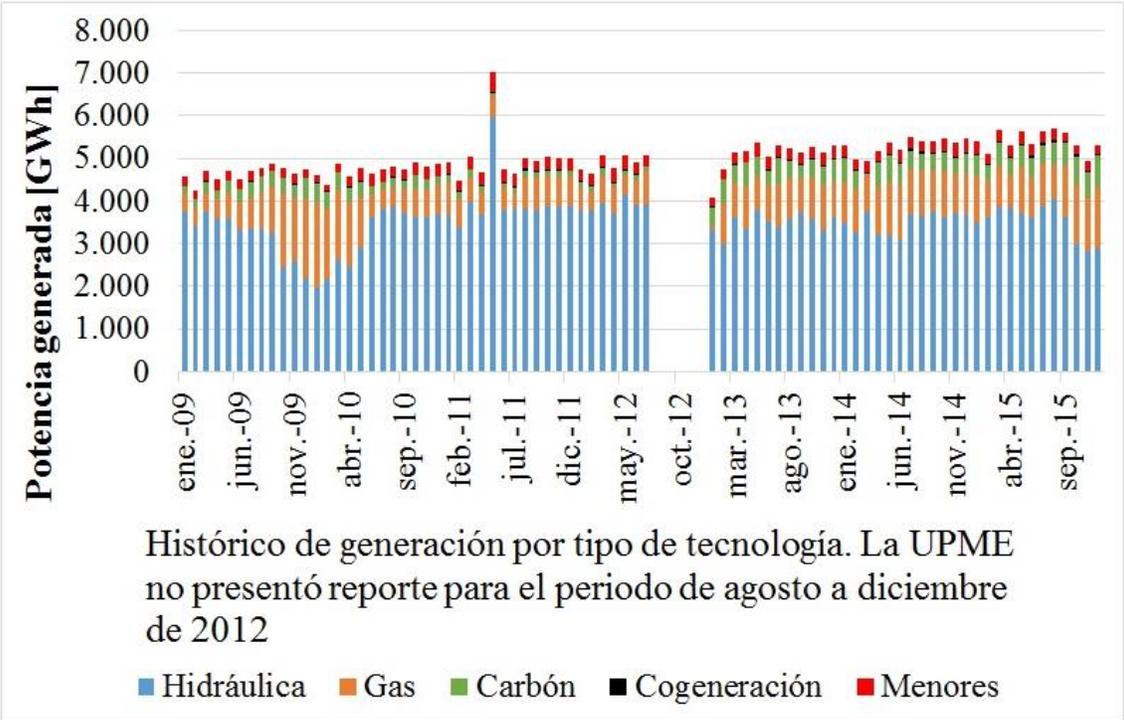
En Colombia, de acuerdo con los reportes presentados por la Unidad de Planeación Minero Energética –UPME-, la producción de energía eléctrica ha sido liderada por las

¹² IPCC – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambio Climático 2014; Mitigación del cambio climático: Resumen para responsables de políticas.

hidroeléctricas las cuales aportan cerca del 70% de la generación total del país (ver Figura 4 y Figura 5¹³).

Figura 4. Histórico de generación de energía eléctrica

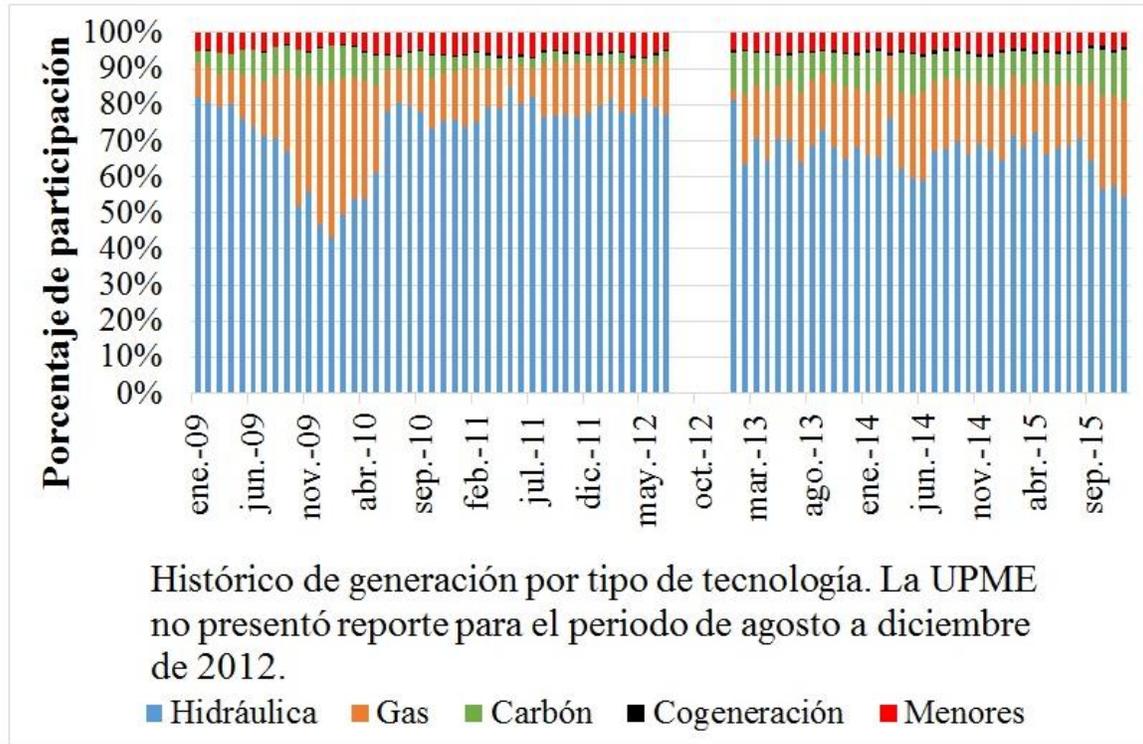
Fuente: Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano, UPME – enero de 2009 a diciembre de 2015



¹³ El periodo de agosto a diciembre de 2013 no cuenta con reporte disponible en los informes mensuales de la UPME.

Figura 5. Histórico porcentual de generación de energía eléctrica

Fuente: Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano, UPME – enero de 2009 a diciembre de 2015



Cabe resaltar, como se dijo anteriormente, que las emisiones relacionadas con la producción de energía eléctrica reportadas por la UPME son las provenientes de aquellos sistemas que implican combustión. Sin embargo, a la generación hidroeléctrica no se asocian emisiones. Los reportes de emisiones de la generación eléctrica en Colombia se tienen a partir de junio de 2013 y mientras que la participación en generación por parte de las tecnología de gas y de carbón oscila en el 30% las emisiones procedentes de estos sistemas representan casi la totalidad de las mismas (UPME, 2013 a 2105. Informe mensual de generación y del mercado eléctrico colombiano).

Actualmente, existe un esfuerzo global por descarbonizar el sistema eléctrico con la implementación de tecnologías que utilicen fuentes renovables. Una de esas tecnologías es la hidroeléctrica (como se vio anteriormente presenta un gran crecimiento a nivel

global) que entre sus ventajas cuenta con la posibilidad de soportar el desarrollo y mantenimiento de otro tipo de mecanismos de generación eléctrica; sin embargo, a medida que esta generación hidroeléctrica aumenta lo hace de manera simultánea la presión por mitigar el cambio climático y la necesidad de cuantificar toda actividad en términos de GEI (International Hydropower Association, 2015; Demarty & Bastien, 2011).

“Todo sistema de generación de energía emite Gases de Efecto Invernadero –GEI- contribuyendo así al cambio climático y evidenciando la necesidad de cuantificar las emisiones procedentes de los diferentes tipos de tecnologías utilizadas en el proceso de generación” (Weisser, 2007). En el caso de las hidroeléctricas, tales emisiones se asocian de manera general al proceso constructivo de las mismas (Weisser, 2007; Hanne, R., Gagnon, L., Modahl, I., Hanssen, O., 2011). Sin embargo, es importante anotar que los embalses hidroeléctricos son una fuente de producción y emisión de gases de efecto invernadero, principalmente de CO₂ y CH₄ (Abril et al., 2005; Fearnside, P.M., 2015; de Lima, 2002; Delmas et al., 2005; Rosa, L.P, et al., 2004; Demarty & Bastien, 2011; entre otros).

1.1.1 Formación de gases de efecto invernadero en embalses hidroeléctricos

“La construcción de embalses hidroeléctricos representa uno de los mayores impactos antropogénicos debidos a la inundación de grandes extensiones de tierra que generan cambios directos e indirectos en los flujos de GEI. En el proceso constructivo de los embalses una gran cantidad de materia orgánica, contenida en la vegetación y suelos, es inundada iniciando un proceso de descomposición que consecuentemente involucra la formación y liberación de CO₂ y CH₄, y como consecuencia un posible sumidero de carbono se convierte en una fuente de GEI. Esto último depende de la concentración de GEI tanto disueltos en la columna de agua como en la atmósfera a donde serían liberados en la atmósfera al igual que de la solubilidad de los gases en el agua¹⁴.

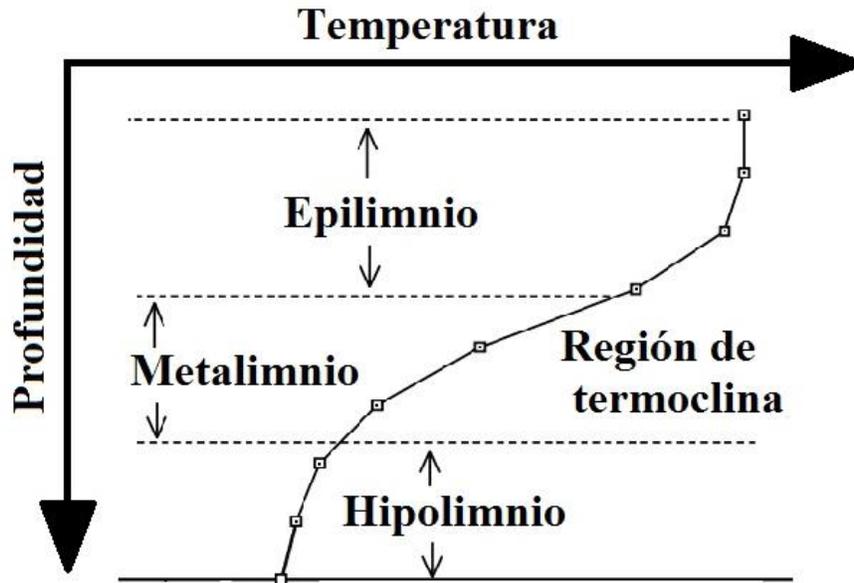
¹⁴ El CH₄ es aproximadamente 65 veces menos soluble que el CO₂ (Abril et al., 2005).

Cuando se construye el embalse, uno o varios cuerpos de agua se represan haciendo que un sistema superficial y turbulento (ríos) se convierta en uno profundo y estático (embalse). Esto hace que se presente una estratificación térmica del agua, en especial en latitudes tropicales, en donde se forman diferentes capas de agua dependiendo de su densidad y temperatura: epilimnio (superficial), metalimnio (intermedia) e hipolimnio (fondo). Como consecuencia de esta estratificación que involucra cambios extremos de temperatura entre las capas, no se presenta mezcla entre la capa superficial de agua y la de fondo (en ausencia de un factor externo como el viento o cambios de temperatura que obliguen a la mezcla generando un cambio en la estabilidad de la columna de agua) con efectos en la dinámica del oxígeno y de la formación y emisión de GEI en los embalses hidroeléctricos” (Mendonça et al., 2012).

1.1.1.1 Estratificación vertical de los embalses

Cuando se cuenta con aguas profundas y estáticas y los vientos y corrientes son insuficientes para producir una mezcla de la columna de agua (de arriba hacia abajo), se crea un gradiente de temperatura. La radiación térmica es absorbida básicamente en los primeros metros de profundidad del embalse en la capa superficial de agua denominada epilimnio; la capa de menor temperatura, mayor densidad y más profunda es el hipolimnio. Entre ambas capas se encuentra el metalimnio que es una capa de transición entre la superficie y el fondo del embalse. Adicionalmente, en los embalses se presenta una variación rápida de temperatura con respecto a un cambio mínimo de la profundidad, conocido como termoclina (en algunos casos el metalimnio y la termoclina coinciden en una misma región), (J. Glynn et al., 1999), (ver Figura 6).

Figura 6. Perfil vertical de temperatura en los embalses



Debido a la estratificación de los embalses, el consumo de oxígeno en el hipolimnio (en el proceso de mineralización de la materia orgánica) no se ve compensado a través de un intercambio (mezcla) con aguas oxigenadas provenientes de la capa superior (epilimnio). Esto hace que el hipolimnio llegue gradualmente a convertirse en una zona anóxica (Mendonça et al, 2012).

1.1.1.2 Producción de gases de efecto invernadero en embalses hidroeléctricos

En los embalses, inicialmente, se inundan los suelos y vegetación de una extensa área dando origen a la degradación de la materia orgánica allí contenida. El CO_2 se forma por la descomposición de dicha materia orgánica mientras que el CH_4 es formado por bacterias que descomponen la materia orgánica de aguas con bajo contenido de oxígeno (hipolimnio).

➤ Producción de dióxido de carbono -CO₂-

La producción de CO₂ se da como resultado de la descomposición del carbono orgánico a través de respiración aeróbica y el CO₂ que se produce es consumido a través de la fotosíntesis (plancton y plantas acuáticas presentes en la columna de agua). Las principales fuentes de carbono disponible para la formación de CO₂ son la vegetación inundada al momento de creación del embalse (también los suelos) al igual que la materia orgánica que ingresa a este por medio de los tributarios (cuerpos de agua que forman el reservorio), el plancton y las plantas acuáticas que crecen y mueren dentro del embalse (en el epilimnio) y la vegetación que crece en las zonas de abatimiento (terrenos que quedan expuestos cuando el nivel del embalse disminuye y posteriormente vuelve a quedar inundado), (International Rivers, 2008; Hernández, 2010).

Adicionalmente, a través de la fotooxidación, se presenta una descomposición de las moléculas orgánicas disueltas en la columna de agua, produciendo grandes cantidades de GEI (principalmente CO₂), (Soumis, Lucotte, Larose, Veillette & Canuel, 2007; Bastien, 2005).

➤ Producción de metano -CH₄-

El metano, un GEI 21 veces más potente que el CO₂ (IPCC, 2007; Steinhurst, Knight & Schultz, 2012), es producido por la bacteria metanogénica y luego es consumido por la bacteria metanotrófica (Mendonça et al, 2012). La formación de CH₄ se da principalmente en aguas con bajo contenido de oxígeno (hipolimnio) sin embargo, una porción de metano se oxida convirtiéndose en CO₂ cuando fluye hacia la superficie (esto sucede principalmente en embalses de gran profundidad), (Hernández, 2010).

En condiciones anóxicas como las del hipolimnio, la bacteria metanogénica metaboliza los compuestos orgánicos, el hidrógeno y el CO₂ en CH₄ con lo que se alcanzan altas concentraciones de CH₄ esta zona (Abril et al, 2005). Esto es importante teniendo en

cuenta que en el trópico (caso colombiano) no se presentan estaciones y por lo tanto no hay un cambio en la estratificación de los embalses manteniendo la condición anóxica del hipolimnio (Mendonça et al, 2012; Demarty & Bastien, 2011).

Al igual que en el caso del CO₂, existen factores externos al embalse que aportan material para la formación de metano en los embalses hidroeléctricos (Eugster, DelSontro & Sobek, 2011); tal es el caso del ingreso continuo de sedimentos a través de los cuerpos de agua tributarios que forman el embalse. La tasa de emisión de GEI depende de la cantidad y calidad de la materia orgánica que ingresa y del tiempo de residencia de la misma dentro del embalse (Demarty & Bastien, 2011; Mendonça et al, 2012).

1.1.1.3 Vías de emisión de gases de efecto invernadero en los embalses hidroeléctricos

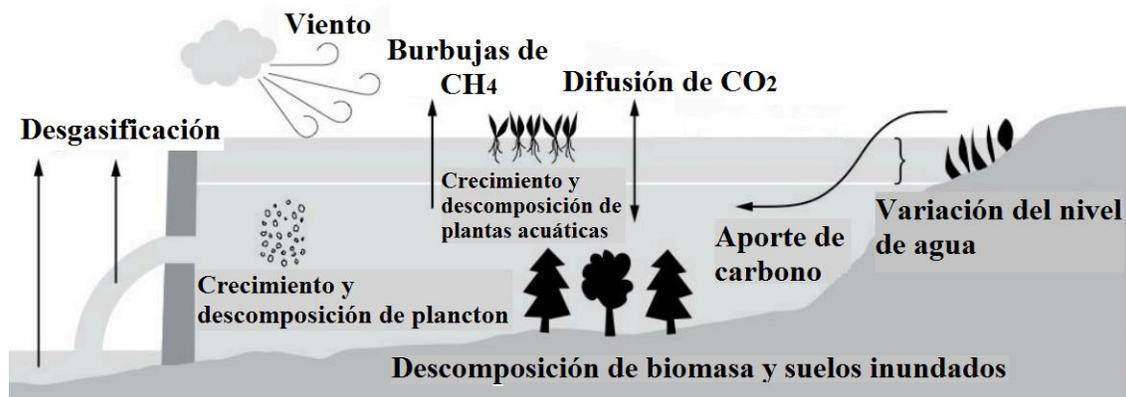
Existen tres vías principales para la emisión de GEI desde los embalses hidroeléctricos: difusoras, ebullición (burbujas) y desgasificación (Demarty & Bastien, 2011; Mendonça et al, 2012; IPCC, 2006):

- ✓ Emisiones difusoras: Ocurren en la interfase agua – aire debido a la difusión molecular. Son la principal vía de emisión de CO₂ (Demarty & Bastien, 2011).
- ✓ Emisiones por ebullición (burbujas): Como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica en el hipolimnio y de una baja solubilidad del metano en el agua, el CH₄ escapa desde el fondo del embalse hacia la superficie del mismo en forma de burbuja. Por tal razón, se considera una vía importante de emisión de metano en particular en zonas templadas y tropicales (IPCC, 2006).
- ✓ Emisiones de desgasificación: Se presentan como resultado de un cambio repentino de la presión hidrostática luego de que el agua del embalse fluye a través de las turbinas de la central de generación o de los desagües. Esto genera una turbulencia y una consecuente emisión difusora de GEI (Demarty & Bastien, 2011; IPCC, 2006) ya que cuando la columna de agua pierde presión su capacidad de retener gas disuelto es menor (Ley de Henry), (International Rivers, 2008).

Es importante resaltar que existen factores externos que afectan o inciden en la emisión de GEI desde los embalses hidroeléctricos. Tal es el caso del viento y la lluvia que afectan en particular la emisión difusora así como la convección (movimientos de aire y agua debidos a variaciones de temperatura), (Demarty & Bastien, 2011). También la presión hidrostática y la temperatura influyen la emisión por burbujas en los embalses (Mendonça et al, 2012; Demarty & Bastien, 2011).

En la Figura 7 se observan tanto los elementos que conllevan a la formación de GEI en los embalses hidroeléctricos como las vías de emisión de los mismos.

Figura 7. Factores que permiten la formación de GEI y vías de emisión
Fuente: International Rivers, 2008



1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como ya se dijo, todo sistema de generación de energía emite Gases de Efecto Invernadero –GEI- (Weisser, 2007). La generación de energía eléctrica presenta grandes aportes a las emisiones globales (cerca del 30% (IPCC, 2014)) como consecuencia de su dependencia de los combustibles fósiles (en 2013 el 67,2% de la generación eléctrica así lo era (International Energy Agency, 2015)).

El esfuerzo conjunto por descarbonizar los sistemas eléctricos se hace evidentemente necesario y posible de alcanzar mediante el uso de energías alternativas que utilicen fuentes renovables en lugar de aquellas que usan combustibles fósiles. Una de esas es la hidroeléctrica, que presenta grandes ventajas como lo son la disponibilidad del recurso primario requerido (agua), facilidad de almacenamiento de energía (embalses), confiable, limpia y asequible (International Hydropower Association, 2015).

Lo anterior es válido, sin embargo, como ya se vio, las hidroeléctricas representan una fuente de energía renovable pero no libre de emisiones (Mendonça et al, 2012) y dichas emisiones han sido globalmente ignoradas de manera sistemática (Fearnside, P.M., 2015).

En latitudes tropicales, es importante considerar el aporte de emisiones de los embalses hidroeléctricos dado que en estas latitudes las emisiones de GEI son mayores que en otras (boreales por ejemplo) y adicionalmente, en las regiones del trópico húmedo los embalses emiten mucho más metano que en otras zonas climáticas (Barros et al., 2011; Fearnside, P.M., 2015).

En el caso colombiano, la alta dependencia de los sistemas hidroeléctricos en la matriz de generación eléctrica del país (cerca del 70% de la generación eléctrica depende de los sistemas hidráulicos (UPME, 2009 a 2015)), su ubicación en el trópico y sus objetivos por reducir emisiones en un 20% (García Arbeláez et al., 2015) hacen necesario estimar las emisiones provenientes de toda actividad humana (de acuerdo con International Hydropower Association, 2015) y, en particular para el presente estudio, de los embalses hidroeléctricos en Colombia.

1.3 METODOLOGÍA

La energía hidroeléctrica, considerada como energía renovable, es una estrategia de mitigación frente al cambio climático. No obstante, existe la necesidad de comprender y predecir los GEI procedentes de sus embalses. Para evaluar tales emisiones, la UNESCO en conjunto con la International Hydropower Association –IHA- se encuentran elaborando una metodología que permita *evaluar el impacto neto de GEI de un embalse* (International Hydropower Association, 2015); sin embargo, todavía no se tiene dicha metodología.

En el caso colombiano, la UPME implementó una metodología para calcular las emisiones y el Factor de Emisión de la Generación Eléctrica (Ministerio de Minas y Energía, 2014). Dicha metodología considera únicamente los sistemas que utilizan combustibles fósiles en sus procesos.

La directriz del IPCC 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero presenta dos apéndices (apéndice 2 y apéndice 3 del volumen 4) relacionados con la estimación de emisiones de CO₂ y CH₄ de tierras convertidas en tierras permanentemente inundadas.

En el caso de CO₂ las pruebas sobre las que se soporta el IPCC, sugieren que las emisiones durante los primeros diez años posteriores a la inundación corresponden a la descomposición de la materia orgánica existente en el área al momento de la inundación. No obstante, es importante recordar que existen factores adicionales que permiten la formación de GEI en los embalse (sedimentos que ingresan al embalse, vegetación que crece dentro del embalse y en sus zonas de abatimiento).

En cuanto al CH₄, el IPCC enfatiza en su metodología que las emisiones de este gas en los embalses dependen de múltiples variables como son: la edad, profundidad, uso anterior de las tierras inundadas, clima, entre otras). Además, plantean que a diferencia del CO₂ las emisiones de CH₄ son sensibles de variación dependiendo de las condiciones espaciales y temporales del embalse.

Como se dijo anteriormente, las emisiones procedentes de los embalses hidroeléctricos se estiman por tres vías de emisión: difusoras, ebullición (burbujas) y desgasificación. Sin embargo, para el presente estudio solo serán estimadas las

emisiones difusoras y por ebullición dado que no se cuenta con información suficiente que permita estimar las emisiones por desgasificación de los embalses hidroeléctricos en Colombia.

1.3.1 Pasos metodológicos, cálculos y resultados obtenidos

Es importante aclarar que para el presente estudio no se desarrollaron mediciones y que el país no cuenta con una base de datos disponible de emisiones de GEI procedentes de los embalses hidroeléctricos. Por lo tanto, las estimaciones aquí presentadas corresponden a información secundaria disponible y ajustada para el caso colombiano.

1.3.1.1 Ecuaciones planteadas

Se plantearon las ecuaciones sugeridas por el IPCC 2006, para obtener las emisiones de CO₂ y CH₄ provenientes de embalses hidroeléctricos en Colombia:

$$\text{Emisiones difusoras de CO}_2 = ((P_f \times E_{f\text{difusoras}}(\text{CO}_2) \times (\text{FA} \times \text{fa} \times 10^{-6})) \quad (1)$$

P_f: Periodo libre de hielos (Colombia = 365 días/año)

FA: Área inundada por el embalse hidroeléctrico

fa: Fracción de área inundada en los últimos 10 años (Colombia: se supuso inundación al 100%)

E_{f_{difusoras}}(CO₂): 44,9 kgCO₂/ha*día (Mediana dada en los datos del IPCC 2006 para países tropicales muy húmedos)

$$\text{Emisiones difusoras de CH}_4 = ((P_f \times E_{f\text{difusoras}}(\text{CH}_4) \times (\text{FA} \times 10^{-6})) \quad (2)$$

P_f: Periodo libre de hielos (Colombia = 365 días/año)

FA: Área inundada por el embalse hidroeléctrico

E_{f_{difusoras}}(CH₄): 0,63 kgCH₄/ha*día (Mediana dada en los datos del IPCC 2006 para países tropicales muy húmedos)

Es importante aclarar que los datos del IPCC 2006 para las Ef|difusas (tanto de CO₂ como de CH₄) corresponden únicamente a las emisiones difusoras. Es decir, las emisiones estimadas de los embalses hidroeléctricos de Colombia utilizando los datos del IPCC 2006 representan únicamente las emisiones difusoras. No obstante, las ecuaciones (1) y (2) servirán para estimar las emisiones globales¹⁵ de los embalses hidroeléctricos colombianos cuando se disponga de datos diferentes a los suministrados por el IPCC 2006.

1.3.1.2 Embalses hidroeléctricos colombianos seleccionados

Aun cuando en Colombia existen muchos más embalses hidroeléctricos que los seleccionados, la muestra de los mismos obedece a la disponibilidad de información de estos la cual es requerida para cada uno de los pasos desarrollados en la metodología empleada en el presente documento (ver Tabla 2).

Tabla 2. Embalses hidroeléctricos colombianos sobre los cuales se estimaron las emisiones de GEI

Hidroeléctrica	Capacidad instalada [MW]	Generación media anual [GWh/año]	Área inundada [ha]	Densidad de Potencia [MW/km²]
Urrá	329	1421	7400	4,45
Porce II	405	1600	890	45,51
Miel I	396	1460	1213	32,65
Porce III	660	3416	461	143,17
Sogamoso	820	5056	6900	11,88
El Quimbo	400	2216	8250	4,85
Guatapé	560	1946	6240	8,97
Troneras	40	242	6400	0,63

¹⁵ Globales en este caso significa un total de emisiones que incluye las difusoras y las de ebullición.

Hidroeléctrica	Capacidad instalada [MW]	Generación media anual [GWh/año]	Área inundada [ha]	Densidad de Potencia [MW/km²]
Jaguas	170	770	1060	16,04
San Carlos	1240	5980	340	364,71
Chivor	1000	3.626	1300	76,92
Salvajina	285	1050	2031	14,03
Guavio	1840	5890	15000	12,27
Betania	500	1832	7000	7,14
Prado	44	225	4200	1,05
Calima	120	180	1.934	6,20

1.3.1.3 Emisiones de embalses hidroeléctricos en Colombia con datos del IPCC 2006

Se reemplazaron los valores de los parámetros de cada embalse colombiano en las ecuaciones (1) y (2). En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 3. Emisiones totales de GEI (CO₂ y CH₄) provenientes de embalses hidroeléctricos en Colombia con datos del IPCC 2006

Hidroeléctrica	Embalse	Emisiones estimadas anuales de CO₂ y CH₄ [tCO₂eq]	Emisiones estimadas mensuales [tCO₂]
Urrá	Urrá I	157.009	13.084
Porce II	Porce II	18.884	1.574
Miel I	Miel I	25.737	2.145
Porce III	Porce III	9.781	815
Sogamoso	Topocoro	146.400	12.200
El Quimbo	---	175.044	14.587
Guatapé	Peñol	132.397	11.033

Troneras	---	135.792	11.316
Jaguas	San Lorenzo	22.490	1.874
San Carlos	Punchina	7.214	601
Chivor	Esmeralda	27.583	2.299
Salvajina	Salvajina	43.093	3.591
Guavio	Guavio	318.262	26.522
Betania	Betania	148.522	12.377
Prado	Prado	89.113	7.426
Calima	Calima 1	41.035	3.420
TOTAL		1.498.355	124.863

1.3.1.4 Información de emisiones de embalses hidroeléctricos ubicados en latitudes tropicales

Aprovechando la condición de país tropical que posee Colombia y la información que sobre emisiones de GEI se encuentra consignada en otras investigaciones (Demarty & Bastien, 2011) se seleccionó un conjunto de embalses hidroeléctricos tropicales (ver Tabla 4) que contaran con información de sus emisiones de CO₂ y CH₄ (ver Tabla 5). A partir de dicha información se obtuvo la mediana de sus datos (Ef) y se reemplazó dicha mediana en las ecuaciones (1) y (2) con el objetivo de obtener una nueva estimación de emisiones de los embalses hidroeléctricos colombianos.

Tabla 4. Embalses hidroeléctricos tropicales utilizados para obtener mediana de Ef

Embalse hidroeléctrico tropical	Generación media anual [GWh/año]	Capacidad instalada [MW]	Área del embalse [km²]	Densidad de potencia [MW/km²]
Três Marias	2,128	396	1,155	0.34
Barra Bonita	141	141	334	0.42

Embalse hidroeléctrico tropical	Generación media anual [GWh/año]	Capacidad instalada [MW]	Área del embalse [km²]	Densidad de potencia [MW/km²]
Tucurui	18,571	8,370	2,875	2.91
Samuel	946	216	560	0.39
Balbina	1,095	250	2,360	0.11
Segredo	5,518	1,260	82	15.37
Xingó	19,277	3,000	60	50.00
Miranda	1,576	408	70	5.83
Petit Saut	560	116	310	0.37

Fuente: Demarty & Bastien, 2011. GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emissions measurements

Tabla 5 Emisiones de GEI provenientes de embalses hidroeléctricos tropicales

Hidroeléctrica	Emisiones anuales de CO₂ [tCO₂/año]	Emisiones anuales de CH₄ [tCH₄/año]	Emisiones anuales de CH₄ [tCO₂eq/año]	Área del embalse [km²]	Emisiones de CO₂ [kgCO₂/ha*día]	Emisiones de CH₄ [kgCH₄/ha*día]
Três Marias	424114	82662	1735911	1155	10,06	1,96
Barra Bonita	453880	2548	53505	334,31	37,20	0,21
Tucurui	7516551	114844	2411716	2875	92,25	1,09
Samuel	1519559	21290	447096	560	74,34	1,04
Balbina	No reporta	971659	20404843	2360	No reporta	11,28
Segredo	80663	259	5430	82	26,95	0,09
Xingó	134434	878	18433	60	61,39	0,40
Miranda	81046	3937	82672	70	31,72	1,54
Petit Saut	446600	2118	44482	310	39,47	0,19

Fuente: Demarty & Bastien, 2011. GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emissions measurements

Las medianas obtenidas para EfCO₂ y EfCH₄ fueron 38,33 kgCO₂/ha*día y 1,04 kgCH₄/ha*día, respectivamente. Con estos valores se hizo nuevamente el cálculo de emisiones de los embalse hidroeléctricos en Colombia (ver Tabla 6).

Tabla 6. Emisiones totales de GEI (CO₂ y CH₄) provenientes de embalses hidroeléctricos en Colombia con datos de la mediana de embalses tropicales

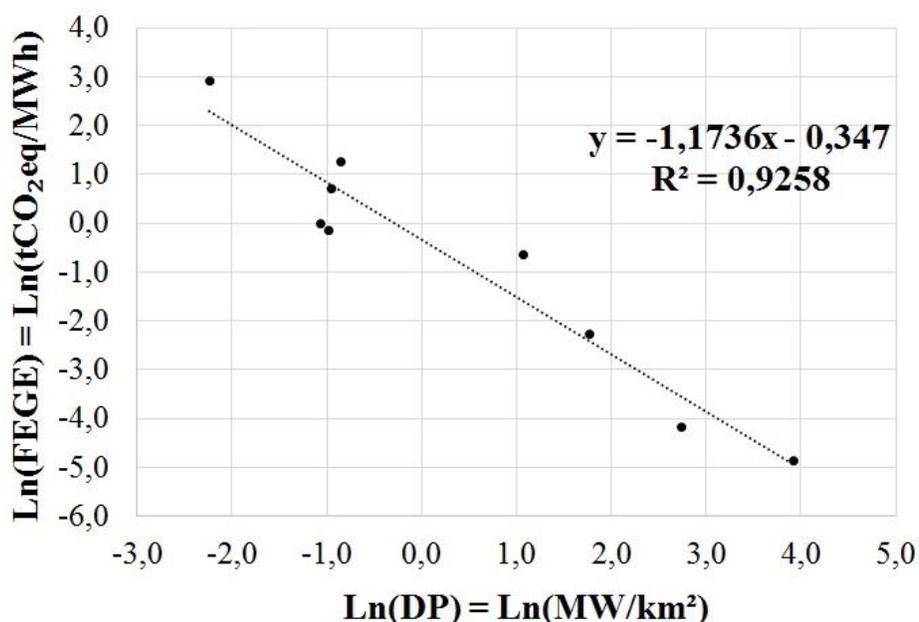
Hidroeléctrica	Embalse	Emisiones estimadas anuales [tCO₂eq]	Emisiones estimadas mensuales [tCO₂eq]
Urrá	Urrá I	162519	13543
Porce II	Porce II	19546	1629
Miel I	Miel I	26640	2220
Porce III	Porce III	10125	844
Sogamoso	Topocoro	151538	12628
El Quimbo	---	181187	15099
Guatapé	Peñol	137043	11420
Troneras	---	140557	11713
Jaguas	San Lorenzo	23280	1940
San Carlos	Punchina	7467	622
Chivor	Esmeralda	28551	2379
Salvajina	Salvajina	44605	3717
Guavio	Guavio	329431	27453
Betania	Betania	153734	12811
Prado	Prado	92241	7687
Calima	Calima 1	42475	3540
TOTAL		1550938	129245

1.3.1.5 Modelo matemático

Una tercera estimación de las emisiones de los embalses hidroeléctricos colombianos se obtuvo luego de analizar el comportamiento del Factor de Emisión de la Generación Eléctrica –FEGE- de los embalses tropicales (Tabla 4) con respecto a su Densidad de Potencia. Esto permitió obtener un modelo matemático no dinámico (ver Figura 8) que se utilizó para una nueva estimación de las emisiones de GEI (ver Tabla 7). Este modelo permite observar que a mayor valor de Densidad de Potencia menor es el Factor de Emisión; esto es de especial interés para el caso colombiano en donde se presentan embalses hidroeléctricos con densidades de potencia altas¹⁶. De manera indirecta esto conduce a que se propongan embalses de poca área (en cuanto al espejo de agua se refiere) y de gran profundidad, con lo cual el CH₄ que se produce en capa de fondo del reservorio termina siendo emitido como CO₂.

¹⁶ Según la International Hydropower Association, 2015, el CMNUCC plantea un FEGE cuyo valor es cero para aquellos proyectos cuya Densidad de Potencia es superior a 10 W/m². De acuerdo con el protocolo de Kyoto, un proyecto con una Densidad de Potencia menor a 5 MW/km² no se considera un proyecto libre de emisiones.

Figura 8. Ln(FEGE) como función del Ln(DP) en los embalses hidroeléctricos tropicales



Modelo matemático obtenido de registros existentes de FEGE y de Densidad de Potencia de embalses tropicales.

Tabla 7 Emisiones totales de GEI (CO₂ y CH₄) provenientes de embalses hidroeléctricos en Colombia utilizando el modelo matemático de los embalses tropicales

Hidroeléctric a	Densidad de Potencia (DP) [MW/km ²]	X'=Ln(DP)	Y'=Ln(FEGE)	FEGE [tCO ₂ /MW h]	Emisiones estimadas anuales [tCO ₂ eq]	Emisiones estimadas mensuale s [tCO ₂ eq]
Urrá	4,45	1,49	-2,10	0,123	174359	14530
Porce II	45,51	3,82	-4,83	0,008	12809	1067
Miel I	32,65	3,49	-4,44	0,012	17259	1438
Porce III	143,17	4,96	-6,17	0,002	7125	594
Sogamoso	11,88	2,48	-3,25	0,039	195672	16306
El Quimbo	4,85	1,58	-2,20	0,111	245608	20467
Guatapé	8,97	2,19	-2,92	0,054	104685	8724
Troneras	0,63	-0,47	0,20	1,227	296941	24745
Jaguas	16,04	2,77	-3,60	0,027	20962	1747
San Carlos	364,71	5,90	-7,27	0,001	4162	347

Hidroeléctric a	Densidad de Potencia (DP) [MW/km ²]	X'=Ln(DP)	Y'=Ln(FEGE)	FEGE [tCO ₂ /MW h]	Emisiones estimadas anuales [tCO ₂ eq]	Emisiones estimadas mensuale s [tCO ₂ eq]
	Chivor	76,92	4,34	-5,44	0,004	15677
Salvajina	14,03	2,64	-3,45	0,032	33436	2786
Guavio	12,27	2,51	-3,29	0,037	219627	18302
Betania	7,14	1,97	-2,65	0,070	128861	10738
Prado	1,05	0,05	-0,40	0,669	150582	12548
Calima	6,20	1,83	-2,49	0,083	14936	1245
TOTAL	---	---	---	---	1642699	136892

Como se dijo anteriormente, las emisiones reportadas por la UPME (de sistemas con combustibles fósiles) corresponden al periodo junio de 2013 – diciembre de 2015. Para comparar las emisiones adicionales al sistema de generación eléctrica en Colombia de acuerdo con la estimación de las emisiones provenientes de sus embalses hidroeléctricos, se tuvo en cuenta la entrada en operación de los embalses tal que en el mismo periodo de reporte de la UPME se contabilicen las de los embalses que en cada año se encontraban operando (ver Tabla 8).

Tabla 8 Embalses cuyas emisiones se estimaron por cada año entre 2013 y 2015

Año	Embalses
2013	Urrá, Porce II, Miel I, Porce III, Guatapé, Troneras, Jaguas, San Carlos, Chivor, Salvajina, Guavio, Betania, Prado, Calima
2014	Urrá, Porce II, Miel I, Porce III, Sogamoso, Guatapé, Troneras, Jaguas, San Carlos, Chivor, Salvajina, Guavio, Betania, Prado, Calima
2015	Urrá, Porce II, Miel I, Porce III, Sogamoso, El Quimbo, Guatapé, Troneras, Jaguas, San Carlos, Chivor, Salvajina, Guavio, Betania, Prado, Calima

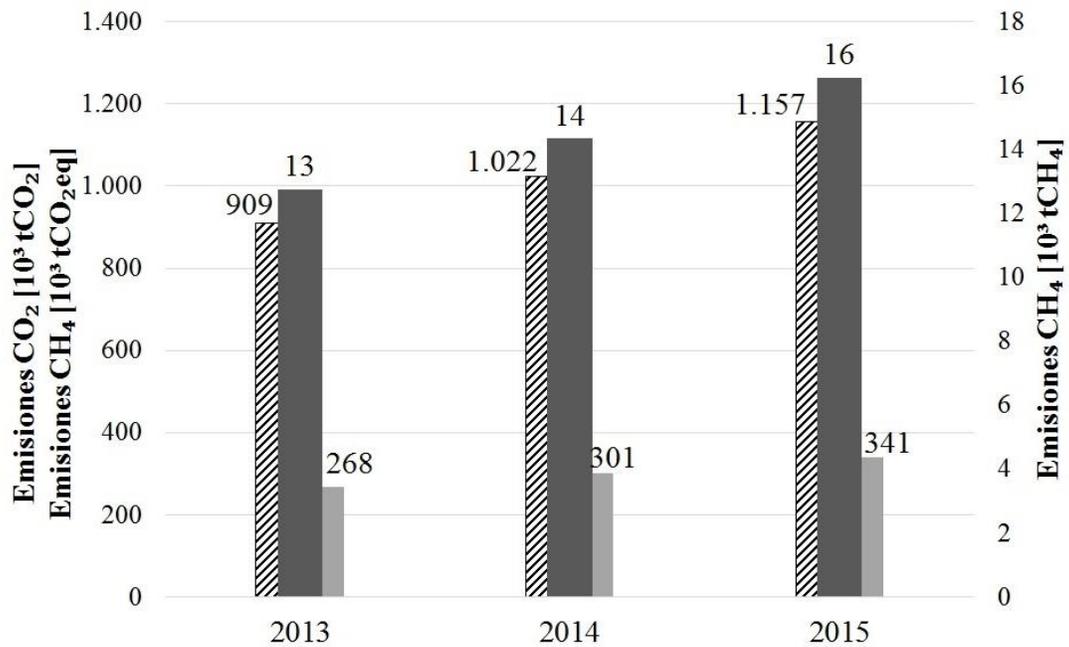
El resumen de las emisiones anuales por cada método utilizado para estimar las mismas, se presenta en la Tabla 9:

Tabla 9. Emisiones de GEI (CO₂ y CH₄) provenientes de embalses hidroeléctricos en Colombia por cada método utilizado en su estimación

Año	Modelo		IPCC 2006		Mediana de embalses tropicales	
	Emisiones adicionales por mes	Emisiones adicionales por mes	Emisiones adicionales por mes	Emisiones adicionales por mes	Emisiones adicionales por mes	Emisiones adicionales por mes
	[tCO ₂ /mes]	[10 ³ tCO ₂ /mes]	[tCO ₂ /mes]	[10 ³ tCO ₂ /mes]	[tCO ₂ /mes]	[10 ³ tCO ₂ /mes]
2013	100.118	100	98.076	98	101.518	102
2014	116.424	116	110.276	110	114.146	114
2015	136.892	137	124.863	125	129.245	129

Para los casos en los que se utilizaron los datos del IPCC 2006 se obtuvo que la participación de CO₂ es del 77% frente a la de CH₄ (como CO₂eq) del 23% (ver Figura 9 y Figura 10).

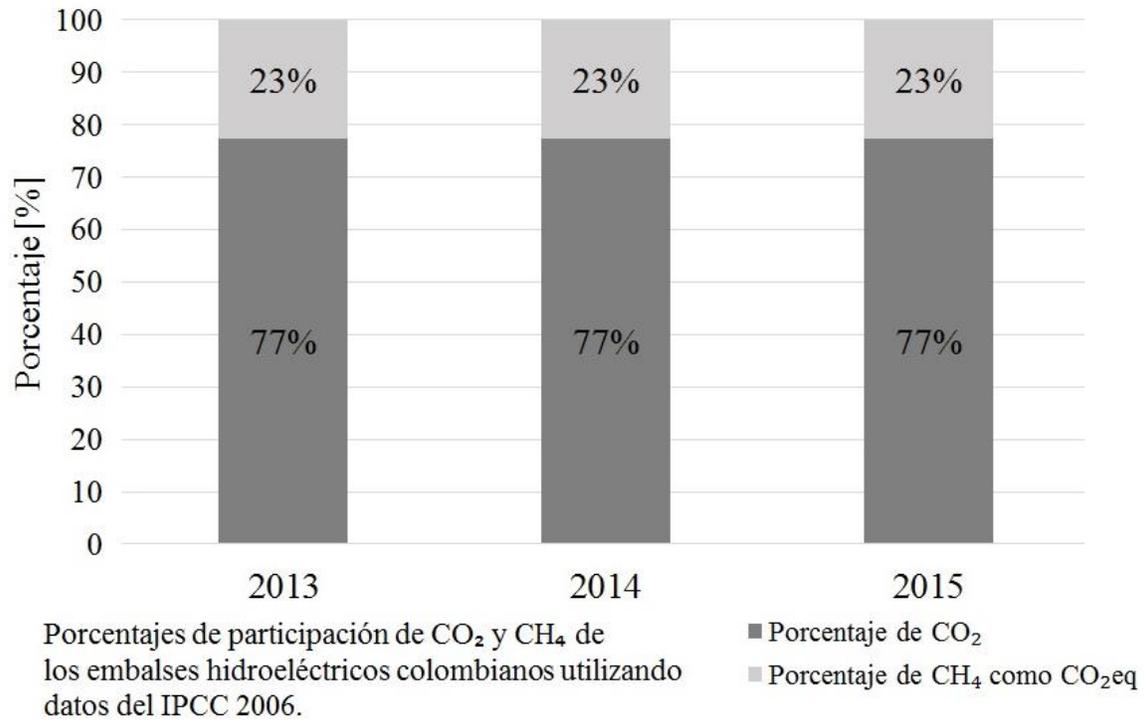
Figura 9. Emisiones anuales de CO₂ y CH₄ de los embalses hidroeléctricos colombianos utilizando datos del IPCC 2006



Emisiones anuales de GEI de acuerdo con los valores de emisiones difusoras de CO₂ y CH₄ registradas por el IPCC 2006.

- ▨ Emisiones estimadas anuales de CO₂ [10³tCO₂]
- Emisiones estimadas anuales de CH₄ [10³tCO₂eq]
- Emisiones estimadas anuales de CH₄ [10³tCH₄]

Figura 10. Porcentaje de emisiones anuales de CO₂ y CH₄ de los embalses hidroeléctricos colombianos utilizando datos del IPCC 2006



Cuando se utilizaron las medianas de los embalses hidroeléctricos tropicales los aportes del CO₂ fueron del 64% frente a un 36% de CH₄ (como CO₂eq), (ver Figura 11 y Figura 12).

Figura 11. Emisiones anuales de CO₂ y CH₄ de los embalses hidroeléctricos colombianos utilizando datos de las medianas de embalses tropicales

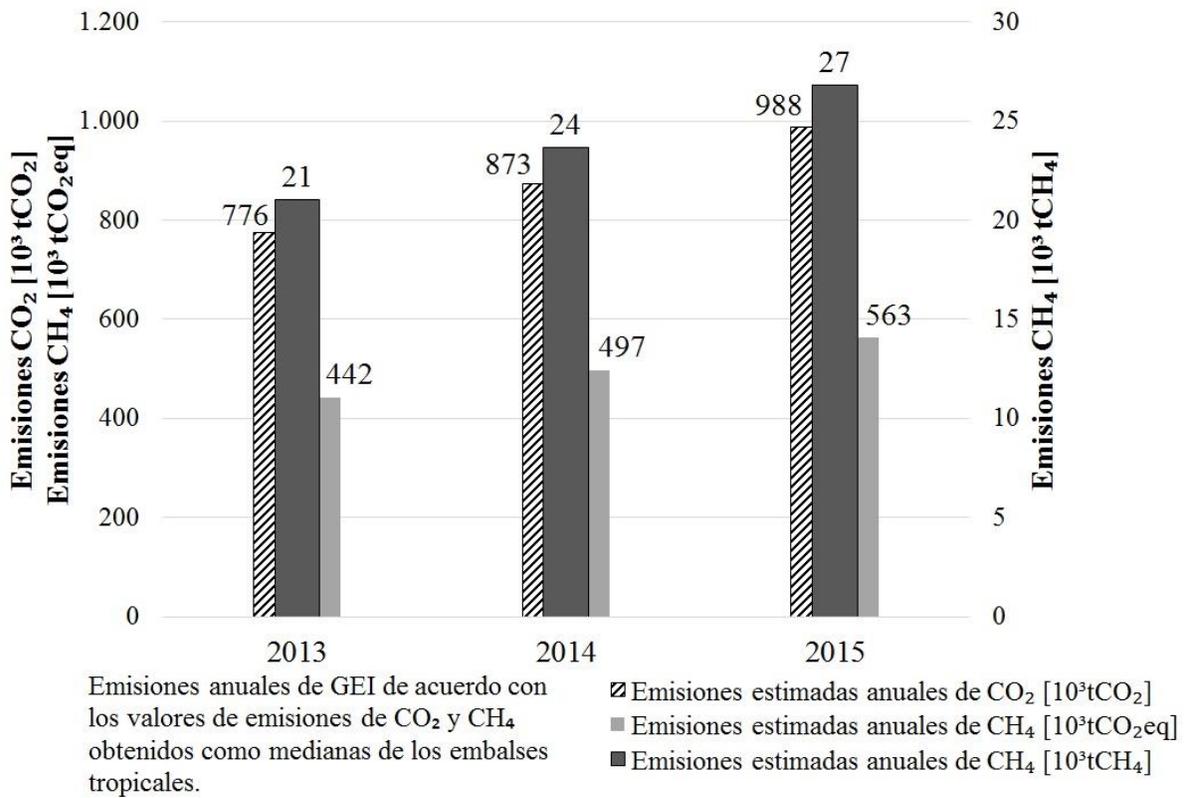
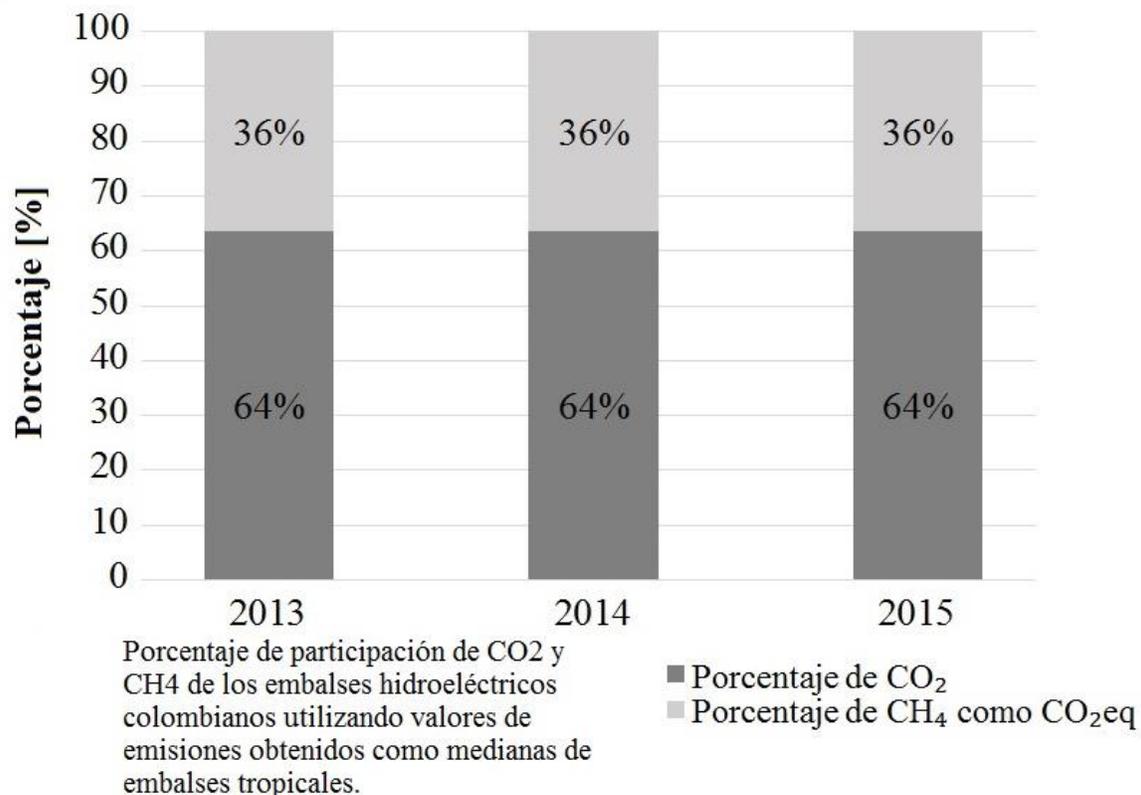


Figura 12. Porcentaje de emisiones anuales de CO₂ y CH₄ de los embalses hidroeléctricos colombianos utilizando datos de las medianas de embalses tropicales



Finalmente, los comparativos permiten evidenciar que de acuerdo con las estimaciones realizadas para los embalses hidroeléctricos en Colombia, los mismos presentan un aporte adicional a las emisiones reportadas por la UPME, que oscilan entre el 10% y el 19% (ver Figura 13 y Figura 14).

Figura 13. Comparativo de los aportes adicionales de emisiones provenientes de embalses hidroeléctricos en Colombia a los reportes de la UPME

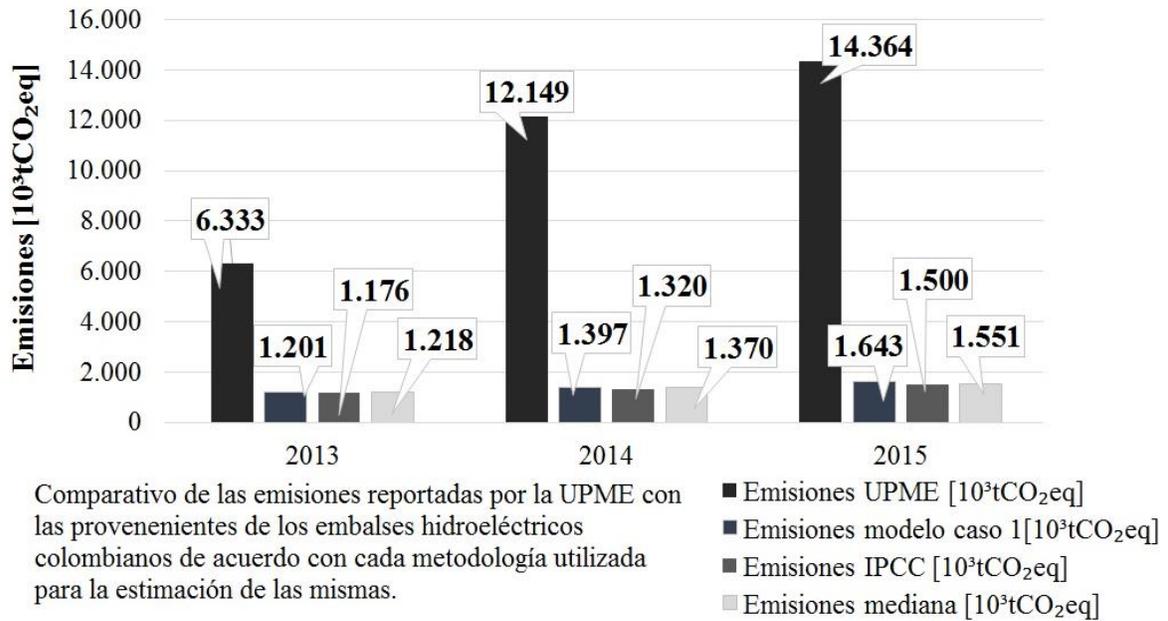
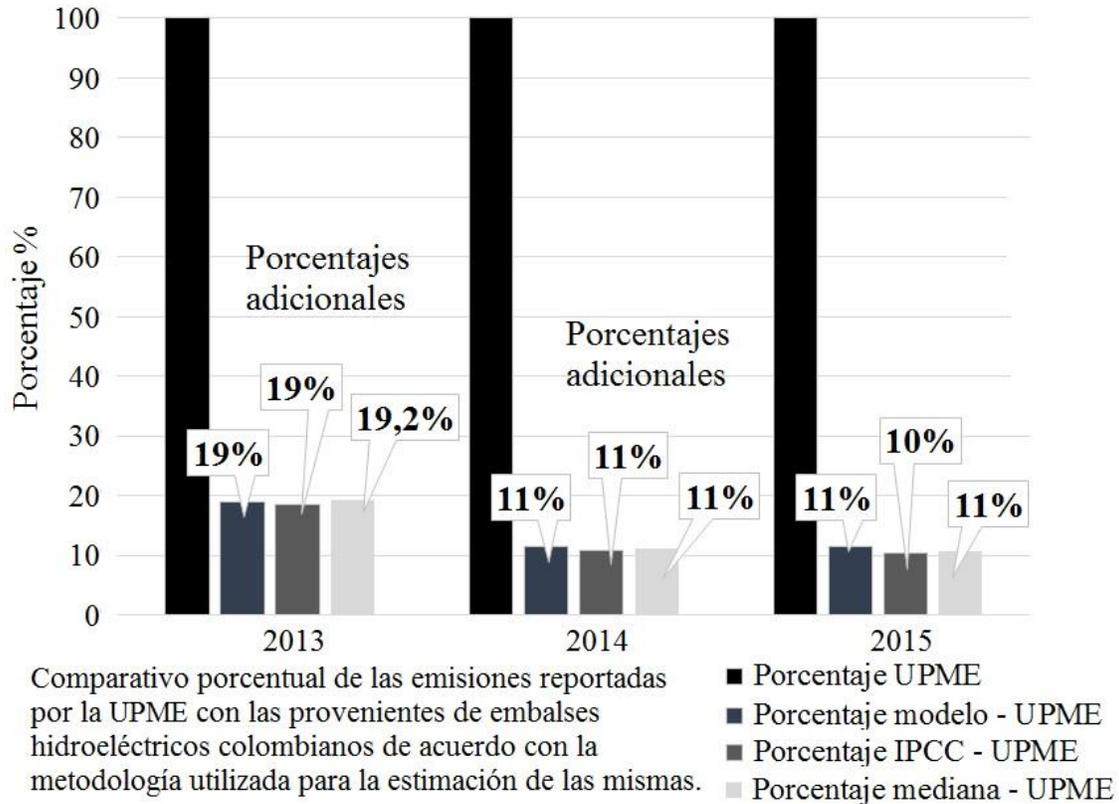


Figura 14. Porcentajes adicionales de emisiones de GEI provenientes de los embalses hidroeléctricos en Colombia a los reportes de la UPME



1.3.1.6 Análisis de incertidumbre del modelo matemático

Como parte de la validación de modelo matemático, se realizó un análisis de incertidumbre de dicho modelo. Es importante recordar que el mismo es un modelo estático y su incertidumbre se debe a los elementos estructurales.

El análisis desarrollado corresponde a la propagación del error así sobre las emisiones totales estimadas provenientes de los embalses hidroeléctricos analizados.

Se pudo concluir que sobre un estimado total de emisiones de 1642699 tCO₂, se presenta un coeficiente de variación del 11,12% (en el archivo magnético del presente documento se encuentra la hoja de cálculo utilizada).

1.3.1.7 Factor de Emisión de la Generación Eléctrica –FEGE-

El FEGE reportado por la UPME en el periodo junio de 2013 a diciembre de 2015, presenta un valor medio de 0,182 tCO₂/MWh. Este dato es obtenido partir de la división de las emisiones calculadas mes a mes, de los sistemas de generación que utilizan combustibles fósiles en su operación (principalmente gas, carbón y ACPM), entre la potencia generada por cada uno de estos sistemas.

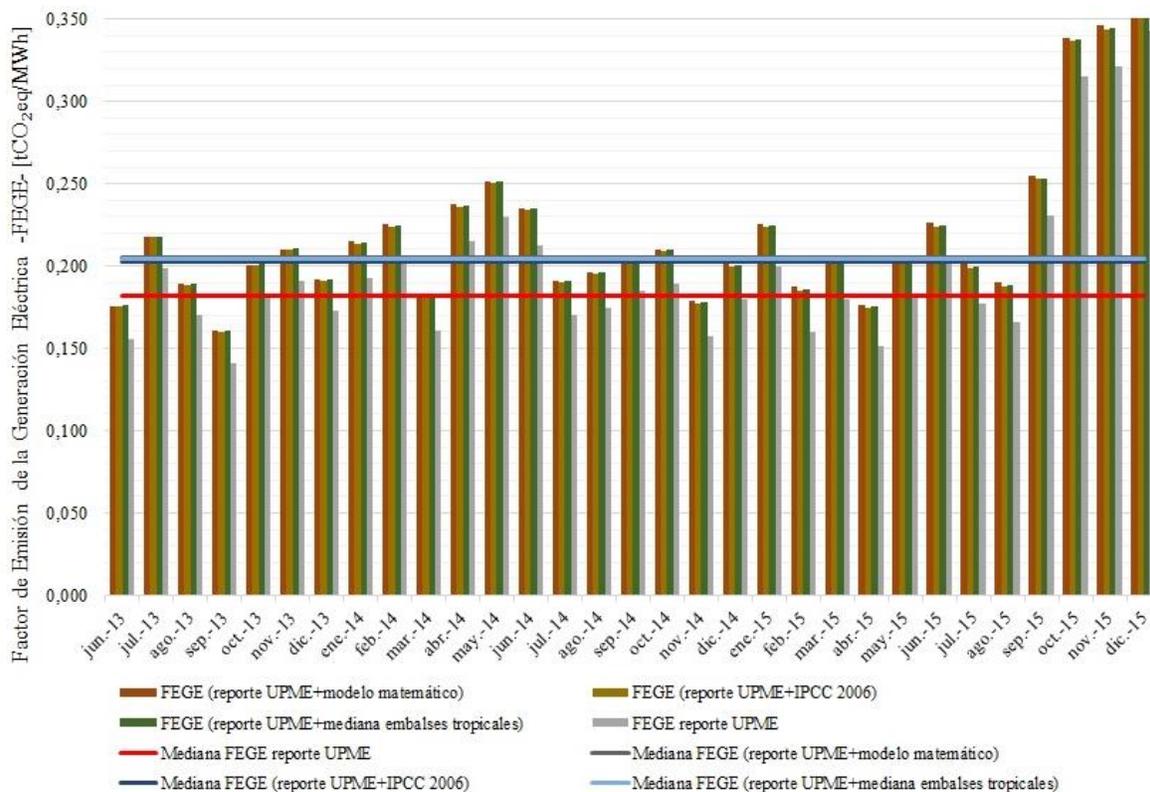
Para el presente estudio se realizó el cálculo del FEGE incluyendo las emisiones estimadas de los embalses hidroeléctricos (un FEGE por cada método utilizado para la estimación de emisiones). Se observa una disminución de dicho factor con respecto al reportado por la UPME (ver Tabla 10 y Figura 15).

Es importante aclarar que la potencia generada por las hidroeléctricas y que opera como divisora de las emisiones, se trata como a nomina considerando que el embalse emite aun cuando no entregue la totalidad de la potencia que está en capacidad de entregar.

Tabla 10 Medianas interanuales del FEGE para el periodo junio de 2013 a diciembre de 2015

F.E.G.E. (media interanual [tCO₂/MWh] – reporte UPME)	F.E.G.E. (media interanual [tCO₂/MWh] – reporte UPME+cálculo modelo matemático)	F.E.G.E. (media interanual [tCO₂/MWh] – reporte UPME+cálculo IPCC 2006)	F.E.G.E. (media interanual [tCO₂/MWh] – reporte UPME+cálculo mediana embalses tropicales)
0,182	0,205	0,203	0,204

Figura 15. Comparación de los FEGE obtenidos a partir de cada método utilizado en la estimación de emisiones



1.4 IMPLICACIONES ADICIONALES

Utilizando el modelo matemático, se evalúa el cambio que se presentaría tanto en el total de emisiones de GEI procedentes de la generación hidroeléctrica así como del FEGE, suponiendo que las condiciones de los embalses considerado en el año 2015 se mantienen en 2016 y que además en este último año ingresa a operar la hidroeléctrica de Ituango (ver Tabla 11).

Tabla 11. Características y aportes de GEI de Ituango

Hidroeléctrica	Capacidad instalada [MW]	Generación media anual [GWh/año]	Área inundada [ha]	Densidad de Potencia [MW/km²]	Emisiones anuales adicionales (aporte de Ituango) [tCO₂eq]	Emisiones anuales mensuales (aporte de Ituango) [tCO₂eq]
Ituango	2400	7030	3800	63,16	38307	3192

Con el aporte de Ituango, en el año 2016 se tendría lo siguiente (ver Tabla 12):

Tabla 12. Características y aportes de GEI de Ituango

AÑO	Emisiones adicionales (con aporte de Ituango) [tCO₂eq/mes]	Emisiones anuales mensuales (con aporte de Ituango) [10³tCO₂eq]	Mediana del Factor de Emisión –FEGE- incluidos los aportes de Ituango [10³tCO₂/MWh]
2016	140084	140	0,216

Como se observa, el aporte de Ituango en emisiones de GEI y su impacto en el FEGE es irrelevante. Sin embargo, es de interés analizar el comportamiento de esta hidroeléctrica dadas sus características e importancia futura en la generación de energía eléctrica en el país.

El modelo matemático permite observar que a mayor DP, menor FEGE. Es decir, que si se mantienen las potencias fijas (la instalada y la generada) una mayor DP se presenta cuando el área inundada se reduce, con lo cual las emisiones tienden a disminuir. Esto se aprecia en la Tabla 13.

Tabla 13 Comparativo de emisiones y densidad de potencia

Emisiones estimadas mensuales [tCO₂]		Densidad de Potencia (DP) [MW/km²]	
Troneras	24.745	364,71	San Carlos
El Quimbo	20.467	143,17	Porce III
Guavio	18.302	76,92	Chivor
Sogamoso	16.306	63,16	Ituango
Urrá	14.530	45,51	Porce II
Prado	12.548	32,65	Miel I
Betania	10.738	16,04	Jaguas
Guatapé	8.724	14,03	Salvajina
Ituango	3.192	12,27	Guavio
Salvajina	2.786	11,88	Sogamoso
Jaguas	1.747	8,97	Guatapé
Miel I	1.438	7,14	Betania
Chivor	1.306	6,20	Calima
Calima	1.245	4,85	El Quimbo
Porce II	1.067	4,45	Urrá
Porce III	594	1,05	Prado
San Carlos	347	0,63	Troneras

Comparando Ituango (que con 7030 GWh/año a 2019 y 14060 GWh/año a 2022 representa la mayor generación media anual) con El Quimbo (con 2216 GWh/año, bastante cercana a la mediana de generación) se observa que las emisiones de esta última son aproximadamente 6,5 veces las aportadas por Ituango. Como era de esperarse, con respecto a la densidad de potencia, Ituango supera en 13 veces la correspondiente a El Quimbo.

Una revisión simple de las características geométricas de estos dos embalses, permite ver que con respecto al área inundada El Quimbo (8400 ha) es 2,2 veces el área inundada de Ituango (3800 ha). Adicionalmente, al comparar las aturas promedio de las láminas de agua, se observa que dicha lámina para Ituango (71,5 m) es 3,25 veces la de

El Quimbo. Esto conduce a una coherencia entre las emisiones producidas en cada tipo de embalse en relación con su profundidad.

Cuando se describieron las condiciones o factores que permitían la producción y emisión de GEI en los embalses, se relacionó la formación de CH₄ en las capas de fondo de los reservorios. El CH₄ alcanza la superficie y se emite a la atmósfera con mayor facilidad en aquellos embalses poco profundos en donde este no alcanza su conversión a CO₂; es decir, la comparación entre embalses poco profundo con aquellos de mayor profundidad arroja que los primeros presentan una mayor emisión de CH₄.

Lo anterior se puede validar utilizando la metodología del IPCC 2006 y el factor obtenido como mediana de los embalses tropicales (ver Tabla 14).

Tabla 14 Comparativo de emisiones de CO₂ y CH₄

Hidroeléctrica	Emisiones estimadas con metodología IPCC 2006			Emisiones estimadas a partir de la mediana de embalses tropicales		
	CO ₂ /anual	CH ₄ /anual	CH ₄ [tCO ₂ eq]	CO ₂ /anual	CH ₄ /anual	CH ₄ [tCO ₂ eq]
El Quimbo	135205	1897	39839	115421	3132	65766
Ituango	62276	874	18350	53164	1442	30292

1.5 CONCLUSIONES

La importancia de esta investigación radica en poner de manifiesto la importancia de contabilizar las emisiones procedentes de los embalses hidroeléctricos en el país. Hasta el momento no se han llevado a cabo programas de medición de GEI provenientes de estos embalses lo que convierte al presente estudio en un primer acercamiento para estimar dichas emisiones.

De acuerdo con las justificaciones dadas y con los resultados de emisiones obtenidos, queda de manifiesto que si bien la energía hidroeléctrica constituye una forma de energía renovable, la misma no representa una fuente de cero emisiones (Mendonça et al., 2012). A esto se suma el compromiso adquirido por el país en los Acuerdos de París (COP21) en el sentido de reducir sus emisiones en un 20% (García Arbeláez, Barrera, Gómez &

Suárez Castaño, 2015) así como la necesidad de cuantificar toda actividad humana en términos de GEI (International Hydropower Association, 2015).

Esta primera estimación que se hace de los embalses hidroeléctricos en el país muestra que en el periodo analizado (junio de 2013 a diciembre de 2015) los aportes de GEI oscilan entre un 10 y 19% adicionales a los que reporta la UPME. La variación del porcentaje depende de varios factores como son el método utilizado para estimar las emisiones así como la participación de energía hidroeléctrica y de sistemas de combustión en la matriz de generación eléctrica del país. Mientras mayor sea la participación de tecnologías que utilizan combustibles fósiles, porcentualmente van a ser menores las emisiones de los embalses hidroeléctricos sin que esto signifique un reducción en tales emisiones.

En cuanto a los aportes porcentuales que se presentan de CO₂ y de CH₄, los mismos corresponden respectivamente a una relación del 77 – 23% o del 64 – 36% de acuerdo con el método utilizado (esta distinción no es posible hacerla a partir del modelo matemático obtenido ya que el mismo arroja un estimado de emisiones totales). Esto es de especial interés dado que en el caso del CO₂ las emisiones pueden variar desde un valor máximo que ocurre posterior a la inundación hasta alcanzar un punto estable en un periodo de 10 años (Delmas et al., 2005; Abril et al., 2005). Cuando de CH₄ se trata, las emisiones por ebullición pueden ser altas en embalses tropicales antiguos (Duchheim et al., 2000; Stallard & Keller, 2004) y esta condición se ajusta bastante bien al caso colombiano.

Con respecto al Factor de Emisión de la Generación Eléctrica se pudo observar que si bien las emisiones aumentan hasta en un 20% el FEGE se reduce como consecuencia de una proporcionalidad inversa de la generación hidroeléctrica que se incluye en el cálculo del factor¹⁷.

De otro lado, se observa la necesidad de plantear un programa de mediciones rigurosas de las emisiones provenientes de estos embalses en donde se cuantifiquen adecuadamente las emisiones de CO₂ y CH₄ incluyendo todas las posibles vías de

¹⁷ Recordar que el FEGE se calcula como la relación entre las emisiones y la generación eléctrica (Emisiones/Generación eléctrica) en donde esta última representa cerca del 70% de la totalidad del país.

emisión; en el presente estudio no se estimaron las emisiones por desgasificación que en algunos casos de embalses hidroeléctricos tropicales (Petit Saut, Balbina y Tucuruí) han llegado a representar el 60% del total de emisiones (Demarty & Bastien, 2011). Adicionalmente, estos programas de mediciones deberían poder establecerse tal que se midan tanto las emisiones antes de la inundación (en el caso de nuevos embalses) como aquellas emisiones en las diferentes vías planteadas (difusoras, ebullición y desgasificación). Esto básicamente implica un trabajo global en las cuencas que conforman los diferentes embalses.

Finalmente, se pone de manifiesto la necesidad de cambiar el paradigma existente en torno a la generación hidroeléctrica como generación de cero emisiones (UPME, 2013 a 2015) y formular un cambio en la matriz de generación en donde las energías alternativas no convencionales (solar y eólica principalmente) presenten un aporte robusto en la generación del país con sus evidentes incidencias sobre las emisiones del sistemas eléctrico colombiano.

REFERENCIAS

- Abril, G., Guérin, F., Richard, S., Delmas, R., Galy-Lacaux, C., Gosse, P., Tremblay, A., Varfalvy, L. dos Santos, M.A., & Matvienko, B. (2005). Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-years old tropical reservoir (Petit-Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles* 19, GB 4007. doi: 10.1029/2005GB002457
- Comisión para la Cooperación Ambiental –CCA-. (2011). Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en América del Norte. Montreal, Canadá. Disponible: ISBN: 978-2-89700-009-7 (electronic version).
- Comisión Mundial de Represas (2000). Represas y desarrollo: un nuevo marco para la toma de decisiones, Reporte final de la comisión mundial de represas. Estados Unidos: Earthscan Publications Ltd.
- de Lima, I.B.T. (2002). Emissão de metano em reservatórios hidroelétricos amazônicos através de leis de potência (Disertación Phd). Universidade São Paulo, São Paulo, Brasil, 108pp.
- Demarty, M. y Bastien, J. (2011). GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emissions measurements. *Energy Policy* 4197 - 4206. <http://www.elsevier.com/locate/enpol>. doi:10.1016/j.enpol.2011.04.033
- Delmas, R., Richard, S. Guérin, F., Abril, G., Galy-Lacaux, C., Delon, C., & Grégoire, A. (2005). Long term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) and potential impacts, In Trembay, A., Varfalvy, L., Roehm, C. Garneau, M., (Eds.), *Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes. Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*, Springer-Verlag, New York, NY, U.S.A., pp.293-312

- dos Santos, M.A., Rosa, L.P., Sikar, B., Sikar, E., & dos Santos E.O. (2006). Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. *Energy Policy* 34, 481-488. doi: 10.1016/j.enpol.2004.06.015
- Eugster, W., DelSontro, T., & Sobek, S. (2011). Eddy covariance flux measurements confirm extreme CH₄ emissions from a Swiss hydropower reservoir and resolve their short-term variability. *Biogeosciences*, 8, 2815 – 2831.
<http://www.biogeosciences.net/8/2815/2011>. doi: 10.5194/bg-8-2815-2011
- Factor de Emisión del S.I.N. Sistema Interconectado Nacional Colombia. (2013). *Unidad de Planeación Minero Energética*.
- Fearnside, P.M. (2015). Emissions from tropical hydropower and the IPCC. *Environmental Science & Policy* doi: 10.10166/j.envsci.2015.03.002(in press).
- Fearnside, P.M. (Sin fecha). Supplementary online material for: Emissions from tropical hydropower and the IPCC.
- Fearnside, P.M. (2004). Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Controversies provide a springboard for rethinking a supposedly “clean” energy source. *Climatic Change* 66(1-2): 1-8. Original publication available at <http://www.springerlink.com>
- Fearnside, P.M. (2001). Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí Dam) and the energy policy implications. *Water and soil pollution* 133 (1): 69-96. doi: 10.1023/A:1012971715668
- Galy-Lacaux, C., Delmas, R., Kouadio, G., Richard, S., & Gosse, Ph. (1999). Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest. *Global biogeochemical cycles*, vol. 13, 503-517.
- Galy-Lacaux, C., Delmas, R., & Jambert, C. (1997). Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 11, No.4, 471-483.

- García Arbeláez, C., Barrera, X., Gómez, R., Suárez Castaño R., 2015. El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21, WWF-Colombia 31 p.
- García, H., Corredor, A., Calderón, L., & Gómez, M. (2013). Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Coombia. *Centro de Investigación Económica y Social –FEDESARROLLO-*.
- Guérin, F., Abril, G., Richard, S., Burban, B., Reynouard, C., Seyler, P., & Delmas, R. (2006). Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers. *Geophysical research letters*, vol. 33, L21407. doi: 10.1029/2006GLL027929
- Glynn, J. & Heinke, G. (1999). Ingeniería ambiental. México: Prentice Hall.
- Hernández, M.E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbon y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*, vol. 28, número 2, 139 – 147.
<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57316058005>
- Hanne, R., Gagnon, L., Modahl, I., & Hanssen, O. (2011). Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydropower. *Renew Sustain Energy Rev. Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano. (2013 – 2015). Subdirección de energía eléctrica, Grupo de generación. Unidad de Planeación Minero Energética –UPME-.
- International Energy Agency. (2015). Key electricity trends. Excerpt from: electricity information. <http://www.iea.org>
- International Hydropower Association. (2015). Informe de la situación hidroeléctrica 2015. <http://www.hydropower.org>
- International Hydropower Association. (2013). Informe de la situación hidroeléctrica 2015. <http://www.hydropower.org>
- International Rivers. (2008). Represas sucias: Las represas y las emisiones de gases de efecto invernadero. <http://www.internationalrivers.org>

Inter-American Development Bank. (2012). Proyecto hidroeléctrico Reventazón: Estudios ambientales adicionales. Parte I: Emisiones de gases de efecto invernadero.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006. Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Apéndice 2: Estimación de las emisiones de CO₂ provenientes de las tierras convertidas en tierras permanentemente inundadas.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006. Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Apéndice 3: Emisiones de CH₄ provenientes de tierras inundadas: Base para su futuro desarrollo metodológico.

Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. (2004). República de Colombia, Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

Kemenes, A., Forsberg, B.R., & Melack, J.M. (2011). CO₂ emissions from a tropical hydroelectric reservoir. *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, G03004. doi: 10.1029/2010JG001465.

Kemenes, A., Forsberg, B.R., & Melack, J.M. (2007). Methane release below a tropical hydroelectric dam. *Geophysical Research Letters*, vol. 34, L12809. doi: 10.1029/2007GL029479.55.

Mendonça, R., Barros, N., Vidal, L.O., Pacheco, F., Kosten, S., & Roland, F. (2012). Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs: What knowledge do we have and what is lacking?, *Greenhouse Gases – Emissions, Measurement and Management*. <http://www.intechopen.com/books/greenhouse-gases-emission-measuremen-and-management/greenhouse-gas-emissions-from-hydroelectric-reservoirs-what-do-we-have-and-what-is-lacking>

Organización Latinoamericana de Energía –OLADE-. (2014). El camino a seguir para la ampliación de proyectos de energía renovables en ALyC.

- Organización Latinoamericana de Energía –OLADE-. (2012). Matriz energética en América Latina y el Caribe: Situación actual y perspectivas de las energías renovables.
- Palau, A., & Prieto, C. (2009). Hidroelectricidad, embalses y cambio climático. *Ingeniería del agua*, vol. 16, No.4, 311-323.
- Palacios, R.A. (2013). Inventario documentado de represas en Colombia (tesis de pregrado en ingeniería civil). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia.
- Paucar, M. (2014). Estudio de emisiones de metano producidas por embalses en centrales hidroeléctricas en Ecuador (tesis de grado de magister en ingeniería de la energía). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Parekh, P. (2011). Avances en el campo de las emisiones de embalses. *International Rivers*. <http://www.internationalrivers.org>
- Raadal, H.L., Gagnon, L., Saur Modahl, I., & Hanssen O.J. (2011). Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 3417-3422. <http://www.elsevier.com/locate/rser>. doi: 10.1016/j.rser.2011.05.001
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century –REN21-. (2015). *Global status report*. Reporte de la situación mundial de las energías renovables 2015.
- Resolución 91304 (2014). Por la cual se adopta el factor de emisión de gases de efecto invernadero del Sistema Interconectado Nacional para proyectos aplicables al Mecanismo de Desarrollo Limpio –MDL. *República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía*.
- Roldan, G., & Ramírez, J.J. (2008). Fundamentos de limnología neotropical. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia.
- Rosa, L.P., dos Santos, M.A., Matvienko, B., Sikar, E., & dos Santos, E.O. (2006b). Scientific errors in the Fearnside comments on greenhouse gas emissions (GHG)

- from hydroelectric dams and response to his political claiming. *Climatic Change* 75, 91-102. doi: 10.1007/s10584-005-9046-6
- Rosa, L.P., dos Santos, M.A., Matvienko, B., dos Santos, E.O., & Sikar, E. (2004). Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical regions. *Climatic Change* 66, 9-21. doi: 10.1023/B:CLIM.0000043158.52222.ee.
- Silva, Juan P., Ruiz, José L., Peña, Miguel R., Lubberding, H., & Gijzen, G. (2012). Influence of photoperiod on carbon dioxide and methane emissions from two pilot-scale stabilization ponds. *Water Science & Technology* 1930 - 1940. doi: 10.2166/wst.2012.396
- Soumis, N., Lucotte, M., Larose, C., Veillette, F., & Canuel, R. (2007). Photomineralization in a boreal hydroelectric reservoir: a comparison with natural aquatic ecosystems. *Biogeochemistry*, vol. 86, 123-135.
- Steinhurst, W., Knight, P., & Schultz, M. (2012). Hydropower greenhouse gas emissions. Synapse Energy Economics, Inc. <http://www.synapse-energy.com>
- ST.Louis, V., Kelly, C., Duchemin, E., M. Rudd, J., & Rosemberg, D. (2000). Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *Bioscience* vol. 50, No.9, 766 – 775. <http://bioscience.oxfordjournals.org>
- Tavares, I.B. (2005). Biogeochemical distinction of methane releases from two Amazon hydroreservoirs. *Chemosphere* 59, 1697-1702. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.12.011
- Unidad de Planeación Minero Energética –UPME-. (Sin fecha). Estudio de generación eléctrica bajo escenario de cambio climático. <http://www.upme.gov.co>
- Vachon, D., Prairie, Yves T., & Cole, Jonathan J. (2010). The relationship between near-surface turbulence and gas transfer velocity in freshwater systems and its implications for floating chamber measurements of gas exchange. *Limnol. Oceanogr.*, 1723-1732. doi: 10.4319/lo.2010.55.4.1723

Weisser, D. (2007). A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *ScienceDirect* 1543 - 1559. <http://www.sciencedirect.com>. doi:10.1016/j.energy.2007.01.008

Wooldrige, J.M. (2010). Introducción a la econometría. México D.F., México: Cengage Learning Editores S.A.

World Bank Report. (2010). Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs. http://www.hydropower.org/climate_initiatives.html