

# ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDOS POR LOS EMBALSES DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL PERÚ

## STUDY OF THE EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES PRODUCED BY THE PACKAGES OF THE HYDROELECTRIC POWER STATIONS OF PERU

Reynaldo Villanueva Ure<sup>1\*</sup>, Elmar Javier Franco Gonzales<sup>1</sup>,  
Gilberto Becerra Arévalo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica, Lima, Perú

Recibido (Received): 04 / 03 / 2020 Aceptado (Accepted): 11 / 08 / 2020

### RESUMEN

El proceso de generación hidroeléctrica se compone esencialmente de tres etapas que son la del embalse de agua, la de transformación de energía hidráulica a energía eléctrica y la de entrega de la energía eléctrica para su distribución. En la etapa del embalse se realizó la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero usando la metodología propuesta por la Organización de las Naciones Unidas, denominada Panel Intergubernamental para el Cambio Climático del 2006 en diez centrales hidroeléctricas peruanas. Se concluyó que, en la primera fase de la generación hidroeléctrica, que es la del embalse, la contaminación significativa total de dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, llegó a ser 83947 toneladas por año y se contrastó los resultados comparando con datos obtenidos de embalses similares de hidroeléctricas brasileñas.

*Palabras Clave:* Emisiones, Embalses, Hidroeléctricas, Perú, Brasil

### ABSTRACT

The hydroelectric generation process is essentially composed of three stages that are the water reservoir, the transformation of hydraulic energy to electrical energy and the delivery of electrical energy for distribution. In the reservoir stage, the quantification of greenhouse gas emissions was carried out using the methodology proposed by the United Nations Organization, called the 2006 Intergovernmental Panel for Climate Change in ten Peruvian hydroelectric plants. It was concluded that, in the first phase of hydroelectric generation, which is that of the reservoir, the total significant contamination of carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, reached 83947 tons per year and the results were compared by comparing data obtained from Brazilian hydroelectric reservoirs.

*Keywords:* Emissions, Reservoirs, Hydroelectric, Peruvian, Brazilian

### 1. INTRODUCCIÓN

En los embalses de las centrales de generación de energía eléctrica, se produce el contacto entre el agua embalsada y la tierra generando una mezcla de barro, lodo y restos orgánicos llamo “limo” el cual actúa como fertilizante natural para el crecimiento de las algas y fitoplancton los cuales realizan oxidación aeróbica, lo cual genera un cambio en la calidad del agua cambiando sus características químicas, físicas,

biológicas y radiológicas que constituye el origen de la contaminación atmosférica por emisión de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> principalmente. [1]

Del total de las centrales hidroeléctricas del Perú se seleccionó diez de las más significativas, a manera de muestra, teniendo en cuenta la mayor producción de energía eléctrica, las cuales representan el 17.74 % de producción de energía eléctrica en el país.

De cinco metodologías disponibles para calcular la cantidad de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> se seleccionó la proporcionada por la Organización de las Naciones Unidas denominada la Metodología del Panel Intergubernamental para el cambio Climático (IPCC-2006), dada la confiabilidad de su eficacia en la cuantificación de gases de efecto

\* Corresponding author.:

E-mail: rvillauevaure@yahoo.es

invernadero mostrada en centrales hidroeléctricas, así como de las mediciones y estimaciones existentes en todos sus años de uso. [2]

Se midió el área inundada en hectáreas, de cada una de las diez centrales hidroeléctricas seleccionadas y se recopiló información relacionada al período de hielo, de la fracción del área total del reservorio que se inundó en los últimos diez años, del período diario de las emisiones de monóxido de carbono y metano.

Con dicha información se pudo obtener los valores de las emisiones totales de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>) y de metano equivalente (CH<sub>4</sub>) correspondientes a cada una de las centrales de generación hidroeléctrica.

Los resultados obtenidos en los cálculos de las emisiones de dióxido de carbono y metano de las diez centrales hidroeléctricas peruanas que fueron seleccionadas se compararon con los valores de emisiones de diez centrales hidroeléctricas similares del Brasil y con el valor estándar de emisiones de CO<sub>2</sub> dadas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Con respecto a las centrales hidroeléctricas brasileñas, el porcentaje de las emisiones de dióxido de carbono de las centrales hidroeléctricas peruanas es del 5% y con respecto al estándar de la ONU, es del 6.6%, siendo 0.02 Ton CO<sub>2</sub>/KW la emisión de CO<sub>2</sub> en el Perú.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. GASES DE EFECTO INVERNADERO

El efecto invernadero es un fenómeno natural que se da en nuestro planeta debido a que al haber ciertos gases en la frontera entre la atmósfera y el espacio el flujo de calor reflejado por la tierra no pasa al espacio, quedándose en la atmósfera recalentándola. [3]

En condiciones normales, cuando la cantidad de gases de efecto invernadero no son excesivos la atmósfera terrestre constituye un ambiente propicio para la vida con temperatura alrededor de los 15° C y se dice que el efecto invernadero es positivo, pero cuando la cantidad de gases de efecto invernadero es excesiva la temperatura atmosférica aumenta significativamente y hace menos propicia la vida, conociéndose este estado como negativo o como de sobrecalentamiento global. Los gases de efecto invernadero (GEI), son aquellos que dejan pasar la radiación del sol, pero que absorben las radiaciones infrarrojas devueltas por la superficie terrestre y le impiden escapar hacia el espacio.

En la atmósfera existe una gran variedad de gases de efecto invernadero y los más perjudiciales son el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>). [4] Para fines de la investigación se enfatizó el estudio en el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y del metano (CH<sub>4</sub>).

### 2.2. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Una central hidroeléctrica es aquella que utiliza la energía potencial del agua almacenada para convertirla en energía eléctrica.

Principales componentes de las centrales hidroeléctricas:

- Turbina
- Generador
- Transformador de potencia
- Transformadores de medición de corriente
- Disyuntores
- Seccionadores
- Aisladores de paso
- Malla a tierra

### Clasificación de las centrales hidroeléctricas

- **Centrales de agua fluyente:** Turbinan el agua disponible en el momento. Tienen el inconveniente de que, en época de sequía, no generan energía.
- **Centrales con regulación propia (embalse):** Se embalsa un volumen considerable de agua mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales; el embalse permite regular la cantidad de agua que pasa por las turbinas con el fin de unificar las variaciones temporales de los caudales afluentes en el río.
- **Centrales a pie de presa:** En este caso se coge un tramo de río o lago a partir del cual se represa el agua y las turbinas son colocadas justo a la salida de la represa. [5]

### 2.3. EMBALSES DE LAS CENTRALES HIDROELECTRICAS

Un embalse se forma como resultado de la acumulación de agua en una represa. El volumen que almacena depende de la altura de la presa y de la forma geométrica, definida por la topografía de la zona inundada, a la que también se le denomina "vaso". [6]

### 2.4. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) EN EMBALSES DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

"Todos los sistemas de agua dulce, ya sean naturales o artificiales, emiten GEI debido a la descomposición de la materia orgánica que permanece sumergida. Los principales GEI emitidos son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>).

El dióxido de carbono se forma por la descomposición del carbono orgánico presente en el embalse.

El metano es formado por bacterias metanogénicas y luego es consumido por la bacteria metanotrófica que descomponen la materia orgánica de las aguas y los sedimentos presentes en el fondo del embalse siendo nulo o de bajo contenido de oxígeno.” [7]

Los GEI que se producen en Lima o en Londres, tienen consecuencias para todo el planeta. Es decir, el efecto es global más no local.

## 2.5. EMBALSES HIDROELÉCTRICOS PERUANOS SELECCIONADOS PARA LA INVESTIGACIÓN

En el Perú existen muchos embalses hidroeléctricos, pero se ha seleccionado a los embalses que corresponden a centrales hidroeléctricas en funcionamiento y que tienen mayor generación de energía eléctrica en la actualidad, las cuales se describen a continuación:

### 1. EMBALSE TABLACHACA (CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO Y RESTITUCIÓN)

Las centrales hidroeléctricas Santiago Antúnez de Mayolo y Restitución o comúnmente conocidas como el complejo hidroeléctrico del Mantaro, están ubicadas en la región de Huancavelica y han iniciado sus operaciones en 1973 y 1984 respectivamente. Ambas centrales se alimentan de la represa Tablachaca ubicada en la localidad de Quichuas, con capacidad de embalse de 8 millones de m<sup>3</sup>, en la que se almacena el agua proveniente del río Mantaro. Es la generadora hidroeléctrica más grande del país en la actualidad, contribuyendo con 1.008 MW.



Fig. 1. Embalse de Tablachaca [8]

### 2. EMBALSE CERRO DEL ÁGUILA (CENTRAL HIDROELÉCTRICA CERRO DEL ÁGUILA)

La central hidroeléctrica Cerro del águila, está ubicada en la provincia de Tayacaja, región de Huancavelica; inició sus operaciones el 2016 y aprovecha las aguas del río Mantaro. El embalse Cerro del águila tiene una capacidad de almacenamiento de 370

DOI: <https://doi.org/10.21754/tecnia>. 10.21754/tecnia.v2i2.86

millones de m<sup>3</sup> aproximadamente, es la segunda generadora hidroeléctrica más grande del país, contribuyendo con 513 MW de energía eléctrica.



Fig. 2. Embalse Cerro del águila[9]

### 3. EMBALSE CHAGLLA (CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHAGLLA)

La central hidroeléctrica Chaglla, está ubicada en la provincia de Huánuco y Pachitea, región de Huánuco; inició sus operaciones en el 2016 y aprovecha las aguas del río Huallaga. Cuenta con una potencia instalada de 513 MW, en el año 2017 tuvo una producción de 2095 GWh.

La represa (embalse Chaglla) tiene una capacidad de almacenamiento de 356 millones de m<sup>3</sup> por la que es la segunda más alta a nivel mundial.



Fig. 3. embalse Chaglla[10]

### 4. EMBALSE SHEQUE (CENTRAL HIDROELÉCTRICA HUINCO)

La central hidroeléctrica Huinco, está ubicada en el distrito de San Pedro de Casta, en la provincia de Huarochirí, departamento de Lima; inició sus operaciones en el año 1964; recibe aguas del río Santa Eulalia y de la cuenca Marcapomacocha, tiene una potencia instalada de 168.5 MW.



Fig. 4. Embalse Sheque.[11]

### 5. EMBALSE CAPILLUCAS (CENTRAL HIDROELÉCTRICA EL PLATANAL)

Genera una potencia de 220 MW y opera desde el año 2010 y se ubica en la cuenca del río Cañete, en el distrito de Zúñiga, en las provincias de Yauyos y Cañete. Capta las aguas de la laguna Paucarcocha a 4,200 msnm, en el distrito de Tanta, provincia de Yauyos, la cual ha sido embalsada mediante un muro de contención de 28 metros de alto para elevar su capacidad hasta los 70 millones de m<sup>3</sup>.

Recorre 100 kilómetros río abajo hasta la represa de regulación de Capillucas con capacidad de 1,8 millones de m<sup>3</sup>. En el año 2017 permitió generar 1183.7 GWh, la cual se condujo hasta la subestación de Chilca, en la costa de Cañete, mediante una línea de transmisión de 220 kilovoltios (KV), alimentando así al sistema interconectado nacional.



Fig. 6. Embalse Capillucas.[12]

### 6. EMBALSE CHECRAS (CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHEVES)

La central hidroeléctrica Cheves está ubicada en las provincias de Huaura y Oyón, departamento de Lima; inició sus operaciones en el 2015, utiliza parte de las aguas de los ríos Huaura y Checras. El embalse Checras tiene una capacidad de almacenamiento de 620 mil m<sup>3</sup>. La capacidad es de 168 MW y la energía anual generada en el 2017 fue de 851.5 GWh.



Fig. 5. Embalse Checras.[13]

### 7. EMBALSE AGUADA BLANCA (CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHARCANI V)

Inaugurada en 1989. Se encuentra en el distrito de Alto Selva Alegre, provincia y departamento de Arequipa. Construida cerca al volcán Misti. La central aprovecha las aguas del río chili, tomadas del embalse Aguada Blanca que tiene una capacidad de 43 millones de m<sup>3</sup>. Su casa de máquinas en caverna cuenta con tres turbinas Pelton, las cuales generan una potencia de 153 MW en total.



Fig. 7. Embalse Aguada Blanca.[14]

### 8. EMBALSE TULUMAYO (CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIMAY)

La central hidroeléctrica Chimay, está ubicada en el distrito de Monobamba, provincia de Jauja, departamento de Junín; inició sus operaciones en el 2000.

La central toma las aguas del río Tulumayo con un embalse del mismo nombre, que tiene una capacidad de 2,1 millones de m<sup>3</sup> y su potencia instalada es de 152 MW.



Fig. 8. Embalse Tulumayo.[15]

### 9. Embalse Yuracmayo (central hidroeléctrica Matucana)

La central hidroeléctrica Matucana también llamada Pablo Boner en alusión a su gestor, se encuentra ubicada en el distrito de San Jerónimo de Surco, provincia de Huarochirí, departamento de Lima, comenzó a funcionar en 1972.

Esta central utiliza las aguas del río Rímac y el embalse Yuracmayo que tiene una capacidad de 48 millones de m<sup>3</sup>, mediante una captación denominada toma Tamboraque y cuenta con dos grupos de generación con turbinas Pelton de eje horizontal, acoplados a generadores síncronos que generan una potencia instalada de 140 MW.



Fig. 9. embalse Yuracmayo.

### 10. Embalse Huallamayo (central hidroeléctrica Yuncán)

La central hidroeléctrica Yuncán inicio sus operaciones en 2005, se encuentra localizada en el departamento de Pasco, entre las cuencas de los ríos Paucartambo y Huachón a aproximadamente 2,500 msnm. Consta de tres turbinas pelton que generan en total 134 MW.

La central está conformada por la presa Uchuhuerta y la presa Huallamayo y esta última puede almacenar hasta 1.6 millones de m<sup>3</sup> de agua.



Fig. 10. embalse Huallamayo.[16]

### 11. Embalse Itaipú (central hidroeléctrica Itaipú binacional)

La central inició sus operaciones en 1984 y está ubicada en el río Paraná en la frontera entre Paraguay y Brasil, su embalse Itaipú tiene una capacidad de 29 billones de m<sup>3</sup> y un área inundada de 1350 Km<sup>2</sup>.

Cuenta con una potencia instalada de 14 000 MW obteniendo así actualmente el segundo lugar como la central más grande del mundo, pero ocupa el primer lugar como la generadora más grande de energía eléctrica limpia y renovable en el planeta.



Fig.11. embalse de Itaipú.[17]

### 3. METODO DEL IPCC -2006 PARA DETERMINAR LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> Y CH<sub>4</sub>

#### Fórmula para determinar las emisiones de CO<sub>2</sub>

Para determinar las emisiones difusoras de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en los reservorios se optó por utilizar el método del panel intergubernamental para el cambio climático propuesto por el IPCC -2006, apéndice 2, Nivel 2. [18]

El cual contempla la siguiente ecuación 1:

$$\text{Emisiones de CO}_2 \text{ LW inundación} = [(P_f * E_f (\text{CO}_2)_{\text{dif}}) + (P_i * E_i (\text{CO}_2)_{\text{dif}})] * (A_{\text{inundación, superficie}} * f_A * 10^{-6}) \quad (1)$$

Dónde:

**Emisiones de CO<sub>2</sub>LW<sub>inundación</sub>** = Total de las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de las tierras convertidas en tierras inundadas expresado en Gg de CO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>.

**P<sub>f</sub>** = Periodo libre de hielos expresado en días año<sup>-1</sup>

**P<sub>i</sub>** = Periodo cubierto de hielos, días año<sup>-1</sup> (los períodos cubiertos de hielos no son aplicables para nuestra región).

**E<sub>f</sub> (CO<sub>2</sub>)<sub>dif</sub>** = Promedio diario de las emisiones difusoras provenientes de la interfaz aire-agua durante el periodo libre de hielos expresado en kg de CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>.

**E<sub>i</sub> (CO<sub>2</sub>)<sub>dif</sub>** = Emisiones difusoras relacionadas con el periodo cubierto de hielos expresado en kg de CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>.

**A<sub>inundación, superficie total</sub>** = Área total de la superficie del reservorio, incluidas las tierras inundadas, los lagos y ríos expresado en ha.

**f<sub>A</sub>** = Fracción del área total del reservorio que se inundó en los últimos 10 años, adimensional.

TABLA I  
Emisiones medidas de CO<sub>2</sub> provenientes de tierras inundadas (IPCC, 2006). [18]

Clima	Emisiones difusoras (periodo libre de hielos)					Referencias
	E <sub>f</sub> (CO <sub>2</sub> ) <sub>dif</sub> (Kg. de CO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )					
	Mediana	Min	Máx	N <sub>m</sub>	N <sub>res</sub>	
<b>Polar / boreal muy húmedo</b>	11.8	0.8	34.5	1011	20	Bergström et al., 2004; Åberg et al., 2004; Huttunen et al., 2002
<b>Templado frío, húmedo</b>	15.2	4.5	86.3	633	20	Duchemin, 2000; Schellhase et al., 1994 ; Duchemin et al., 1999 ; Duchemin et al., 1995; Tremblay et al., 2005
<b>Templado cálido, húmedo</b>	8.1	-10.3	57.5	507	33	Duchemin, 2000; Duchemin, 2002a ; St-Louis et al., 2000; Smith y Lewis, 1992 ; Tremblay et al., 2005
<b>Templado cálido, seco</b>	5.2	-12.0	31.0	390	43	Soumis et al., 2004 ; Therrien et al., 2005
<b>Tropical, muy húmedo</b>	44.9	11.5	90.9	642	7	Keller y Stallard, 1994; Galy-Lacaux et al., 1997; Galy-Lacaux, 1996; Duchemin et al., 2000; Pinguelli Rosa et al., 2002; Tavares de lima et al., 2002; Tavares de lima, 2005
<b>Tropical, seco</b>	39.1	11.7	58.7	197	5	Pinguelli Rosa et al., 2002; Dos Santos, 2000

Nota. Los valores de la segunda columna representan las medianas de las emisiones de CO<sub>2</sub> declaradas en la bibliografía, las cuales corresponden en sí a las medias aritméticas de los flujos medidos sobre los reservorios individuales. Se usan las medianas pues las distribuciones de frecuencia de las mediciones de flujo subyacentes no son normales y sus medias aritméticas están ya sesgadas por los valores extremos. Los valores Mín y Máx. corresponden a los más bajos y los más altos de todas las mediciones individuales dentro de una región climática dada; se dan sólo como indicación de la variabilidad. N<sub>m</sub> = cantidad de mediciones; N<sub>res</sub> = cantidad de reservorios muestreados. Estas mediciones pueden incluir las emisiones no antropogénicas (p. ej., emisiones provenientes del carbono en la cuenca corriente arriba) y posibles cómputos dobles de emisiones antropogénicas (p. ej., aguas servidas de las zonas urbanas de la región del reservorio) y de este modo pueden sobreestimar las emisiones.

Para estimar el promedio diario de las emisiones difusoras de CO<sub>2</sub> se debe aplicar los valores establecidos en la tabla 1, en la que se visualizan las emisiones medidas para diversas zonas climáticas teniendo en cuenta las variaciones espaciales intra reservorios o regionales y variaciones temporales estacionales establecidas por las emisiones de los reservorios y los flujos en la interfaz agua.

#### Fórmula para determinar las emisiones de CH<sub>4</sub>

Para determinar las emisiones difusoras de Metano (CH<sub>4</sub>) en los reservorios se optará por utilizar el método del panel intergubernamental para el cambio climático propuesto por el IPCC -2006, apéndice 3, Nivel 1. El cual contempla la siguiente ecuación 2. [19]:

$$\text{Emisiones de CH}_4 \text{ WW inundación} = P * E(\text{CH}_4)_{\text{dif}} * A_{\text{inundación, superficie total}} * 10^{-6} \quad (2)$$

Dónde:

**Emisiones de CH<sub>4</sub> WW inundación** = Total de las emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de las tierras inundadas expresado en CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup>.

**P** = periodo libre de hielos, días año<sup>-1</sup> (por lo general, 365 para las estimaciones de inventario anuales, o menos en los países con periodo con cobertura de hielo).

**E (CH<sub>4</sub>)<sub>dif</sub>** = promedio diario de las emisiones difusoras, expresado en kg. De CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>.

**A inundación superficie total** = área total de la superficie inundada, incluidas las tierras inundadas, los lagos y ríos, expresado en ha.

Para estimar el promedio diario de las emisiones difusoras de CH<sub>4</sub> se debe aplicar los valores establecidos en la tabla 2, donde se visualizan las emisiones medidas para diversas zonas climáticas, integrando las variaciones espaciales intra reservorios o regionales y variaciones temporales estacionales establecidos por las emisiones de los reservorios, de igual forma los flujos en la interfaz agua aire.

En la tabla 3 se puede observar los valores calculados de las áreas inundadas y el clima seleccionado según las características del lugar de ubicación de cada central hidroeléctrica.

TABLA II  
Emisiones medidas de CH<sub>4</sub> proveniente de las tierras inundadas. [19]

Clima	Emisiones difusoras (periodo libre de hielos)					Referencias
	E <sub>i</sub> (CH <sub>4</sub> ) <sub>dif</sub> (Kg. de CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )					
	Mediana	Min.	Máx.	N <sub>m</sub>	N <sub>res</sub>	
<b>Polar / boreal muy húmedo</b>	0.086	0.011	0.3	253	13	Blais 2005; Tremblay et al, 2005; Therrien, 2004; Therrien, 2005; Huttunen et al., 2002; Lambert, 2002; Duchemin, 2000
<b>Templado frío, húmedo</b>	0.061	0.001	0.2	233	10	Tremblay et al., 2005; Therrien, 2004; Blais, 2005; Lambert, 2002; Duchemin et al., 1999
<b>Templado cálido, húmedo</b>	0.150	-0.05	1.1	416	16	Tremblay et al., 2005; Soumis et al., 2004; Duchemin, 2000; Smith y Lewis, 1992
<b>Templado cálido, seco</b>	0.044	0.032	0.09	135	5	Therrien et al., 2005; Therrien, 2004; Soumis et al., 2004
<b>Tropical, muy húmedo</b>	0.630	0.067	1.3	303	6	Tavares de lima, 2005; Abril et al., 2005; Therrien, 2004; Rosa et al., 2002; Tavares de lima et al., 2002; Duchemin et al., 2000; Galy-Lacaux et al., 1997; Galy-Lacaux, 1996; Keller y Stallard, 1994
<b>Tropical, seco</b>	0.295	0.070	1.1	230	5	Rosa et al., 2002; Dos Santos, 2000

Nota. Los valores de la segunda columna representan las medianas de las emisiones de CH<sub>4</sub> declaradas en la bibliografía, las cuales corresponden, en sí, a las medias aritméticas de los flujos medidos sobre los reservorios individuales. Se usan las medianas, pues la frecuencia de las distribuciones de las mediciones de flujo subyacentes no es normal y sus medias aritméticas están ya sesgadas por los valores extremos. Los valores Mín. y Máx. Corresponden a los más bajos y los más altos de todas las mediciones individuales dentro de una región climática dada; se dan sólo como una indicación de la variabilidad. N<sub>m</sub> = cantidad de mediciones; N<sub>res</sub> = cantidad de reservorios muestreados. Estas mediciones pueden incluir las emisiones no antropogénicas (p. ej., emisiones provenientes del carbono en la cuenca corriente arriba) y posibles cómputos dobles de emisiones antropogénicas (p. ej., aguas servidas de las zonas urbanas de la región del reservorio) y de este modo pueden sobreestimar las emisiones.

TABLA III  
Área inundada de las principales centrales hidroeléctricas del Perú

Hidroeléctrica	Departamento	Área inundada (ha)	Año puesta en servicio	Clima	Capacidad instalada (MW)	Fracción del área total del reservorio que se inundó en los últimos 10 años. fA
Complejo del Mantaro	Huancavelica	9642.86	1973	Templado frío, húmedo	1000	0.7
Cerro del águila	Huancavelica	4946.79	2016	Templado frío, húmedo	513	0.4
Chaglla	Huánuco	4397.14	2016	Templado, frío húmedo	456	0.4
Huínco	Lima	2491.71	1964	Templado, frío húmedo	258.4	0.5
El Platanal	Lima	2121.43	2010	Templado cálido, húmedo	220	0.7
Cheves	Lima	1621.93	2015	Templado cálido, húmedo	168.2	0.7
Charcani V	Arequipa	1475.36	1988	Templado cálido, húmedo	153	0.6
Chimay	Junín	1465.71	2000	Templado, frío húmedo	152	0.7
Matucana	Lima	1350.00	1972	Templado cálido, húmedo	140	0.7
Yuncan	Pasco	1292.14	2005	Templado, frío húmedo	134	0.4

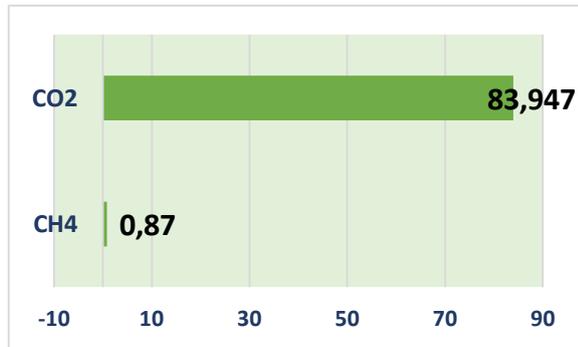
#### 4. CALCULO DE LAS EMISIONES DIFUSORAS DE CO<sub>2</sub> Y CH<sub>4</sub>

Se debe mencionar que los periodos cubiertos de hielo no son aplicables para nuestra región por lo tanto  $P_i$  y  $E_i$  (CO<sub>2</sub>) son iguales a 0 (cero). El valor de  $P_f$  es igual a 365 días, el resto de datos aplicados en las ecuaciones 1 y 2 se obtienen de las tablas 1, 2 y 3 según la característica de los embalses.

Por medio de los cálculos realizados en los embalses de las centrales hídricas peruanas se estimaron valores para las emisiones difusoras de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, obteniendo resultados de 83.947 Gg año<sup>-1</sup> ó 83947 Ton CO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup> para las emisiones difusoras de CO<sub>2</sub> y de 0.870 Gg año<sup>-1</sup> ó 870 Ton CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup> para las emisiones difusoras de CH<sub>4</sub>, tal como se representa en la figura 12.

TABLA IV  
Emisiones difusoras de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de los embalses de las principales centrales hidroeléctricas del Perú

Hidroeléctrica	Área inundada (ha)	Emisiones de CO <sub>2</sub> (Gg año <sup>-1</sup> )	Emisiones de CH <sub>4</sub> (Gg año <sup>-1</sup> )	Emisiones de CH <sub>4</sub> convertidas en CO <sub>2</sub> -Eq	Emisiones totales CO <sub>2</sub> -Eq
Tablachaca	9642.86	37.449	0.215	5.367	42.816
Cerro del águila	4946.79	10.978	0.11	2.754	13.731
Chaglla	4397.14	9.758	0.098	2.448	12.206
Sheque	2491.71	6.912	0.055	1.387	8.299
Capillucas	2121.43	4.39	0.116	2.904	7.294
Checras	1621.93	3.357	0.089	2.22	5.577
Aguada blanca	1475.36	2.617	0.081	2.019	4.637
Tulumayo	1465.71	5.692	0.033	0.816	6.508
Yuracmayo	1350	2.794	0.074	1.848	4.642
Huallamayo	1292.14	2.87	0.03	0.719	3.587
<b>TOTAL</b>	<b>30805.07</b>	<b>83.947</b>	<b>0.87</b>	<b>21.762</b>	<b>105.71</b>

Fig. 3: emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> (Gg año<sup>-1</sup>)

## 5. COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES ESTIMADAS DE CO<sub>2</sub> Y CH<sub>4</sub> CON LAS EMISIONES DE LAS CENTRALES DE BRASIL

Se realiza una comparación de las emisiones de los embalses peruanos analizados con embalses brasileños, se tomó para esta comparación las emisiones estimadas de los embalses de las siguientes centrales hidroeléctricas brasileñas: Tres Marías, Barra Bonita, Tucuruí, Samuel, Itaipú, Segredo, Xingó, Miranda, Sobradinho y Serra da mesa, cuya información se tomó de la publicación “GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH<sub>4</sub> emission measurements”,<sup>[20]</sup> como se puede apreciar en la tabla 5.

TABLA V  
Emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de los embalses de las principales centrales hidroeléctricas de Brasil

Embalses	Área inundada (ha)	Emisiones CO <sub>2</sub> (Gg año <sup>-1</sup> )	Emisiones CH <sub>4</sub> (Gg año <sup>-1</sup> )	Emisiones de CH <sub>4</sub> convertidas en CO <sub>2</sub> -Eq (Gg año <sup>-1</sup> )	Emisiones totales CO <sub>2</sub> -Eq (Gg año <sup>-1</sup> )
Tres marías	115500	424.114	74.508	1862.7	2286.814
Barra bonita	33431	453.88	2.379	59.475	513.355
Tucuruí	287500	7516.551	97.001	2425.025	9941.576
Samuel	56000	1519.559	21.224	530.6	2050.159
Itaipú	135000	48.34	5.88	147	195.34
Segredo	8200	80.663	0.263	6.575	87.238
Xingó	6000	134.434	0.878	21.95	156.384
Miranda	7000	81.046	2.847	71.175	152.221
Serra da mesa	178400	1293.529	16.637	415.925	1709.454
Sobradinho	4214	40.56	0.436	36.78	154.35
<b>TOTAL</b>	<b>831245</b>	<b>11592.676</b>	<b>222.053</b>	<b>5577.205</b>	<b>17246.891</b>

Se puede apreciar que Brasil tiene centrales hidroeléctricas mucho más grandes que el Perú.

En la tabla 6 presentaremos el factor de los embalses peruanos y en la tabla 7 los embalses brasileños.

Tabla VI  
Coeficiente Ton de CO<sub>2</sub>/KW en centrales peruanas

Embalse	Capacidad instalada (MW)	Emisiones de CO <sub>2</sub> (Gg año <sup>-1</sup> )	Emision CO <sub>2</sub> / Capacidad (ton/KW)
Tablachaca	1000	37.449	0.037449
Cerro del águila	513	10.978	0.02139961
Chaglla	456	9.758	0.02139912
Huinco	258.4	6.912	0.02674923
El Platanal	220	4.39	0.01995455
Cheves	168.2	3.357	0.01995838
Charcani V	153	2.617	0.01710458
Chimay	152	5.692	0.03744737
Matucana	140	2.794	0.01995714
Yuncan	134	2.87	0.02141791
<b>TOTAL</b>	<b>3194.6</b>	<b>86.817</b>	<b>0.027176172</b>

TABLA VII  
Coeficiente Ton de CO<sub>2</sub>/KW en centrales brasileñas

Embalse	Capacidad instalada (MW)	Emisiones de CO <sub>2</sub> (Gg año <sup>-1</sup> )	Emisión CO <sub>2</sub> / Capacidad (ton/KW)
Tres marías	396	424.114	1.070994949
Barra bonita	140	453.88	3.242
Tucuruí	8370	7516.551	0.898034767
Samuel	216	1519.559	7.03499537
Itaipú	14000	48.34	0.003452857
Segredo	1260	80.663	0.064018254
Xingó	3162	134.434	0.042515497
Miranda	390	81.046	0.207810256
Serra da mesa	855	1293.529	1.512899415
Sobradinho	1050	40.56	0.03862857
<b>TOTAL</b>	<b>29839</b>	<b>11592.676</b>	<b>0.38850752</b>

Se puede observar el caso del embalse Tablachaca – Perú que tiene similar área inundada que el embalse de Segredo – Brasil, pero este último tiene casi el doble de emisiones totales CO<sub>2-Eq</sub> que el embalse de Tablachaca.

Brasil tiene un clima tropical, lo cual no le ayuda en la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, por el contrario, el Perú es afortunado en tener un clima y temperaturas variables porque eso nos permite tener menor emisión de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en nuestros embalses

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> calculadas con la metodología del IPCC para el presente estudio, dan una idea general de la situación de los embalses analizados. Se pudo estimar que los embalses aportan una cantidad de 105.71 (Gg año<sup>-1</sup>) de emisiones totales CO<sub>2-Eq</sub> por lo que se reafirma que las Centrales Hidroeléctricas analizadas emiten GEI pero en escala reducida en comparación con las de Brasil y con el estándar de la ONU.
- Se recomienda la elaboración y ejecución de un programa que permita conocer el estado real de las emisiones de cualquier embalse, estableciendo medidas para reducir sus aportes de GEI.
- Las emisiones de gases de efecto invernadero en las centrales hidroeléctricas peruanas son relativamente bajas debido a que se encuentran en lugares donde el entorno es predominantemente seco y frío haciendo que la producción de limo y algas no generen CO<sub>2</sub> que es el mayor contaminante.

[1] D. Veran y I. Vazquez. (2017, Diciembre 12). Avanzando y midiendo consumo y producción sostenible para una economía bajo en carbono en economías de ingresos medios y nuevos países industrializados en Peru. [En línea]. Disponible en: [http://perulca.com/wp-content/uploads/2019/04/documento\\_b.pdf](http://perulca.com/wp-content/uploads/2019/04/documento_b.pdf)

[2] P. Parekh . (2011, Diciembre 2). Avances en el campo de las emisiones de embalses: Un Informe sobre la Investigación y las Directrices Recientes. [En línea]. Disponible en: [https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/final\\_reservoiremissionsbriefing2011\\_esp\\_o\\_o.pdf](https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/final_reservoiremissionsbriefing2011_esp_o_o.pdf)

[3] M. Orizaola. “Una visión Global del Efecto Invernadero”. Grado de maestro en educación primaria, Universidad de Cantabria, Cantabria, España, 2017. Disponible en: <https://archive.internationalrivers.org/inode/2628>

[4] W. Tep. (2016, Octubre 23). La Huella de Carbono y su Relación con el Efecto Invernadero. [En línea]. Disponible en: <https://kanankab.wordpress.com/2016/10/23/la-huella-de-carbono-y-su-relacion-con-el-efecto-invernadero/>

[5] J. Redondo. (2018, Enero 24). Centrales Hidroeléctricas – Qué Son, Tipos y Funcionamiento de las Centrales en España. [En línea]. Disponible en: <https://erenovable.com/centrales-hidroelectricas/>

[6] W. Sandoval. Presas y embalses. Sangolquí, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, 2018

[7] A. Palau. Análisis del ciclo de carbono en embalses y su posible efecto en el cambio climático: Aplicación al embalse de Susqueda (Río Ter, NE España). Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, 2010

[8] ELECTROPERU S.A. Memoria anual año 2017. Lima, Perú, marzo, 2018

[9] GrañayMontero. (2020, Enero 17). Presa y túnel para la central hidroeléctrica Cerro del Águila. [En línea]. Disponible en: <http://www.gym.com.pe/nuestros-proyectos/proyecto/proyecto-central-hidroelectrica-cerro-del-aguila>

[10] GESTION (2020, Enero 17). [En línea]. Disponible en: <https://gestion.pe/economia/empresas/central-hidroelectrica-chaglla-us-1-200-millones-inicio-llenado-embalse-agua-99918-noticia/>

[11] Enel. (2020, Enero 17). [En línea]. Disponible en: <https://www.enel.pe/es/quienes-somos/a201611-huincos.html>

[12] Celepsa. (2020, Enero 17). [En línea]. Disponible en: <http://www.celepsa.com/las-hidroelectricas/>

[13] Statkraft. (2020, Enero 18). [En línea]. Disponible en: <https://www.statkraft.com.pe/acerca-de-statkraft/statkraft-en-peru/central-hidroelectrica-cheves/>

[14] ODEBRECHT. (2020, Enero 18). [En línea]. Disponible en: <http://www.odebrecht.com.pe/negocios/infraestructura/obras-realizadas/energia/central-hidroelectrica-charcani-v>

[15] Endesa. (2020, Enero 20). [En línea]. Disponible en: <http://www.endesa.com/>

[16] EnerSur. Central Hidroeléctrica Yuncán. Huancavelica, Peru, 2015.

[17] ITAIPU BINACIONAL. (2017, Diciembre 29). La Itaipu: Eficiencia Que Redunda en Energía. [En línea]. Disponible en: <https://www.itaipu.gov.py/es/sala-de-prensa/noticia/la-itaipu-eficiencia-que-redunda-en-energia>

[18] IPCC. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios de gases de efecto invernadero. Volumen 4. Apéndice 2: emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de las tierras inundadas: Base para su futuro metodológico. Francia, 2006

[19] IPCC. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios de gases de efecto invernadero. Volumen 4. Apéndice 3: Emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de las tierras inundadas: Base para su futuro metodológico Francia, 2006

[20] M. Demarty y J. Bastien. GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH<sub>4</sub> emission measurements Energy Policy, Montreal, Canada, 2011



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo [revistas@uni.edu.pe](mailto:revistas@uni.edu.pe)

## REFERENCIAS