

UN MODELO TERMODINÁMICO SENCILLO PARA EL CÁLCULO DEL BALANCE DE ENERGÍA DE LOS GASES DE INVERNADERO Y SU EFECTO EN LA TEMPERATURA DE LA ATMÓSFERA DE LA TIERRA: APLICACIÓN DE LOS PRINCIPIOS DE LA ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO A LAS MOLÉCULAS DE CO₂ Y H₂O

A SIMPLE THERMODYNAMIC MODEL FOR CALCULATION OF THE ENERGY BALANCE OF GREENHOUSE GASES AND ITS EFFECT ON THE TEMPERATURE OF THE EARTH'S ATMOSPHERE: APPLICATION OF THE PRINCIPLES OF INFRARED SPECTROSCOPY TO CO₂ AND H₂O MOLECULES

Ivan Machin-Morera^{1*}, Lorena Pérez-Orta¹, Susana Martínez¹

(1) Eon Minerals, Salta, Los Juncaros 195, Barrio Tres Cerritos, Salta Capital, Provincia de Salta - Argentina
(*e-mail: machin_ivan@outlook.com.com).

Recibido: 18/10/2022 - Evaluado: 20/11/2022 - Aceptado: 26/12/2022

RESUMEN

Existe actualmente una gran mediatización de diversos temas que tienen interés para la humanidad, entre esos temas está el problema del calentamiento global de la Tierra. En este estudio se ha desarrollado una teoría relativamente sencilla basada en principios fundamentales de la Termodinámica, que nos permiten demostrar que el CO₂ es un gas con el potencial de calentar la atmósfera de la Tierra. Este modelo sencillo permite visualizar de manera pedagógica, las ideas sobre la teoría del calentamiento global para las generaciones de estudiantes con conocimientos básicos de Termodinámica, y, por otro lado, estos estudios demuestran a nuestros estudiantes, el valor de la Termodinámica como una herramienta clave para su futuro desarrollo profesional (en ciencias e ingeniería. También en este estudio se determinó que el efecto de invernadero del vapor del agua es muy superior al CO₂ (al menos en un factor de 4). Esto significa que un aumento del CO₂ traería como consecuencia, un aumento indirecto del vapor de agua en la atmósfera potenciando aún más el efecto invernadero de la Tierra.

ABSTRACT

There is currently a great media coverage of various topics that are of interest to humanity, among these topics is the problem of global warming of the Earth. In this study, a relatively simple theory has been developed based on fundamental principles of Thermodynamics, which allows us to demonstrate that CO₂ is a gas with the potential to heat the Earth's atmosphere. This simple model allows us to visualize in a pedagogical way the ideas about the theory of global warming for generations of students with basic knowledge of Thermodynamics, and, on the other hand, these studies demonstrate to our students the value of Thermodynamics as a key tool. for their future professional development (in science and engineering. Also, in this study it was determined that the greenhouse effect of water vapor is much greater than CO₂ (at least by a factor of 4). This means that an increase in CO₂ would bring about Consequently, an indirect increase in water vapor in the atmosphere further enhancing the Earth's greenhouse effect.

palabras claves: CO₂, Cambio Climático, Modelo Climático, Termodinámica
keywords: CO₂, Climate Change, Climate Model, Thermodynamics

INTRODUCCION

Se ha estimado que sin los gases de invernadero la Tierra estaría a 33 grados centígrados más fría o a -18 grados centígrados en promedio (Nelson, 2011; Thomas & Stamnes, 1999). El agua en estado de vapor es el más importante de los gases de invernadero, y contribuye con un 90 a 95% del efecto de invernadero, o equivalentemente, el agua contribuye en 30 a 31 de los 33 grados por efecto de invernadero. El dióxido de carbono (CO₂), está presente en concentraciones mucho más bajas que el agua y absorbe radiación infrarroja. El CO₂ contribuye cerca del 4.2-8.4% del efecto total del gas de invernadero (Michaels & Balling, 2000).

El U.S. Department of Energy ha demostrado que los niveles de CO₂ en la atmósfera en la época antes de la revolución industrial (pre-industrial) fue de 288000 ppb (0.0288%). Este nivel de 288000 ppb es la línea de referencia para los estudios relacionados con los efectos ambientales del CO₂. El nivel total de CO₂ actual es de 368400 ppb o 0.0368% (para el año 2000). El aire tiene 78,08% de nitrógeno (N₂), un 20,94% de oxígeno (O₂), un 0,035% de dióxido de carbono (CO₂) y un 0,93% de gases inertes como el argón y el neón (Nelson, 2011).

La mayor parte de la energía que llega a nuestro planeta procede del Sol. Viene en forma de radiación electromagnética. El flujo de energía solar que llega al exterior de la atmósfera es una cantidad fija, llamada constante solar. Su valor es de alrededor de **1,4·10³ W/m²** (1354 Vatios por metro cuadrado según unos autores, 1370 W·m⁻² según otros). El albedo de la Tierra, es decir su brillo, su capacidad de reflejar la energía, es alrededor de 0.3. Esto significa que alrededor de **980 W·m⁻²** (un 70% del valor de la constante solar media) llega a la superficie de la Tierra. Por lo tanto, algo más de 100 W·m⁻² son devueltos al espacio por la reflexión de la Tierra. Se calcula que alrededor de la mitad de este albedo es causado por las nubes, aunque este valor es, lógicamente, muy variable, dependiendo del lugar y de otros factores. El tipo de radiación que emite un cuerpo depende de la temperatura a la que se encuentre (según la ley de Planck de la radiación de cuerpo negro). Apoyándose en este hecho físico, las observaciones desde satélites de la radiación infrarroja emitida por el planeta indican que la temperatura de la Tierra debería ser de unos -18°C (255K) (Nelson, 2011; Thomas & Stamnes, 1999). A esta temperatura se emiten unos 240 W·m⁻². La realidad es que la temperatura media de la superficie de la Tierra es de 15°C (288K), a la que corresponde una emisión de 390 W·m⁻². Los **150 W·m⁻²** de diferencia entre los 390 W·m⁻² y los 240 W·m⁻² son absorbidos por los gases de invernadero y las nubes (Nelson, 2011), y son los responsables de la diferencia de temperaturas -18°C (255K) versus 15°C (288K), es decir, 33K. Por lo tanto, este diferencial de 33K, se debe a la presencia de gases de invernadero en la atmósfera (Nelson, 2011; Thomas & Stamnes, 1999).

Es importante mencionar que el incremento del CO₂ entre 1900 y el 2000 fue de 0.0295% a 0.0365% (porcentajes volumen/volumen), ($\Delta\%CO_2=0.007\%$) (https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores18/conjuntob/indicador/archivos/pdf/01_atmosfera/cambio/indicadores/1.2-4.pdf), el cual ha causado, a su vez, un incremento de 0.70°C en la temperatura de la atmósfera (<https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/temperatura-global>). Por otro lado, los valores de la temperatura global de la Tierra para 1900 fue igual a 14.4°C y la temperatura para 2000 fue de 15.1°C (<https://www.quora.com/What-was-the-average-global-temperature-in-1900>). Estos datos serán usados para confrontar los resultados del modelo termodinámico que estamos planteando en este estudio.

Se han desarrollado teorías y modelos muy elaborados para explicar el calentamiento global (<https://meteosim.com/modelos-globales-regionales-cambio-climatico/>), también se han desarrollado modelos relativamente menos complejos (Shimazak & Helmle, 1979), sin embargo, en ambos tipos de modelos se requiere resolver complejas ecuaciones, y, desde el punto de vista pedagógico, estos modelos no son los adecuados para enseñar y demostrar el funcionamiento del calentamiento global, especialmente, a nivel del público no especializado en el área.

El objetivo del presente estudio es desarrollar una metodología sencilla para demostrar, a nivel académico, el efecto de invernadero del gas CO₂, y, la demostración que el vapor de agua (H₂O(g)) juega un papel muy

importante en el efecto de invernadero de la Tierra. Se trata de mostrar, el valor de los métodos de la Termodinámica mediante su aplicación en la explicación de uno de los fenómenos más importantes para el futuro de la humanidad: El calentamiento global.

FUNDAMENTOS

El propósito de este estudio es hacer evidente el efecto del CO₂ en el calentamiento global, mediante la propuesta de un modelo sencillo que usa los fundamentos básicos de la Termodinámica, para que las ideas sobre el efecto del CO₂ sean accesibles a la mayor cantidad de estudiantes y profesionales con conocimientos básicos de Termodinámica. La idea central de la propuesta de este trabajo se basa en la determinación de la cantidad de energía por mol absorbida en el conjunto de bandas ubicadas en el espectro de infrarrojo (IR) asociadas al calentamiento global para los gases H₂O y CO₂ (ver sección *Absorción de la radiación del IR del CO₂ y H₂O*). Por lo tanto, si se tiene la cantidad total de energía IR por mol de H₂O y CO₂, y, al tener la cantidad de moles de CO₂ y H₂O presentes en la atmósfera, entonces, se puede calcular la cantidad de energía absorbida por estos gases de efecto invernadero (GEI) (denominamos esta energía total como Q), y, esta energía es transferida al resto de la atmósfera por medio de procesos de colisiones entre sus moléculas. La primera ley de la Termodinámica (la cual es un principio de conservación de la energía) permite calcular el cambio de temperatura de la atmósfera mediante la aplicación de la siguiente relación fundamental (ver sección *Las ecuaciones de balance de energía para el fenómeno del calentamiento global*): $Q=n \cdot C_p \cdot \Delta T$, donde n es la cantidad de moles de aire (N₂+O₂), el C_p es la capacidad calórica del aire y el ΔT es el cambio de temperatura buscado. Por lo tanto, por simple despeje se obtiene el ΔT buscado (ver sección *Cálculo de la variación de la temperatura global de la Tierra entre 1900 y 2000 sin efecto del vapor de agua de la atmósfera*).

Absorción de la radiación del IR del CO₂ y H₂O

En la Figura 1 se tiene el espectro de absorbancia del CO₂ y del H₂O en la zona responsable de los procesos del calentamiento global de la Tierra (Peng-Sheng *et al.*, 2018; Patadia *et al.*, 2018). En este estudio se propone la siguiente ecuación para estimar la energía absorbida por la especie molecular "e" ($\Delta E(e)$ en unidades de Joules/mol) mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta E(e) = 10^6 \left(\frac{\mu m}{m} \right) \cdot N_0 \left(\frac{\text{moleculas}}{\text{Mol}} \right) \cdot \sum_i^{N_{be}} \left[\left(\frac{\%A_{ie}}{100} \right) \cdot \left(\frac{hc}{\lambda_{ie}} \right) \right] \quad (1)$$

Esta ecuación se basa en la teoría de Planck (factor hc/λ_{ie}) y corregida por la absorbancia ($\%A_{ie}$). Donde el subíndice "i" está asociada con las bandas presentes en el IR de la especie molecular "e", λ_{ie} es la longitud de onda de la banda "i" ubicada en el IR de la especie "e" en unidades de μm , N_{be} es el número total de bandas asociadas a la especie "e" en el IR, h es la constante Planck ($h=6.6256 \times 10^{-34}$ J·seg), c es la velocidad de la luz ($c=3 \times 10^8$ m/seg), N_0 es el número de Avogadro ($N_0=6.023 \times 10^{23}$). El análisis de la Figura 1 para las moléculas CO₂ y H₂O, permite generar las Tablas 1 y 2. En la Tabla 1 se tabulan la posición de las bandas de IR del H₂O (ver columna 3 de la Tabla 1, parámetro λ_i), y el valor de la energía asociada a cada banda de IR del H₂O (ver columna 5 de la Tabla 1, parámetro ΔE_i , es calculada mediante la ecuación siguiente:

$$\Delta E_i = 10^6 \left(\frac{\mu m}{m} \right) \cdot N_0 \left(\frac{\text{moleculas}}{\text{Mol}} \right) \cdot \left[\left(\frac{\%A_{ie}}{100} \right) \cdot \left(\frac{hc}{\lambda_{ie}} \right) \right] \quad (2)$$

La suma de los valores de la Columna 5 de la Tabla 1 genera el parámetro $\Delta E(\text{H}_2\text{O})$ (señalado en color amarillo y calculado mediante la ecuación 1) que representa la energía absorbida por el H₂O en la zona IR responsable del efecto invernadero. Este valor es un aporte del presente estudio, y es la clave para estimar numéricamente, el incremento de la temperatura global por efecto invernadero. Similarmente, la Tabla 2 permite obtener el valor de

la energía absorbida por el CO₂ $\Delta E(\text{CO}_2)$ (señalado en color amarillo y calculado con la ecuación 1) en la zona IR responsable del efecto invernadero.

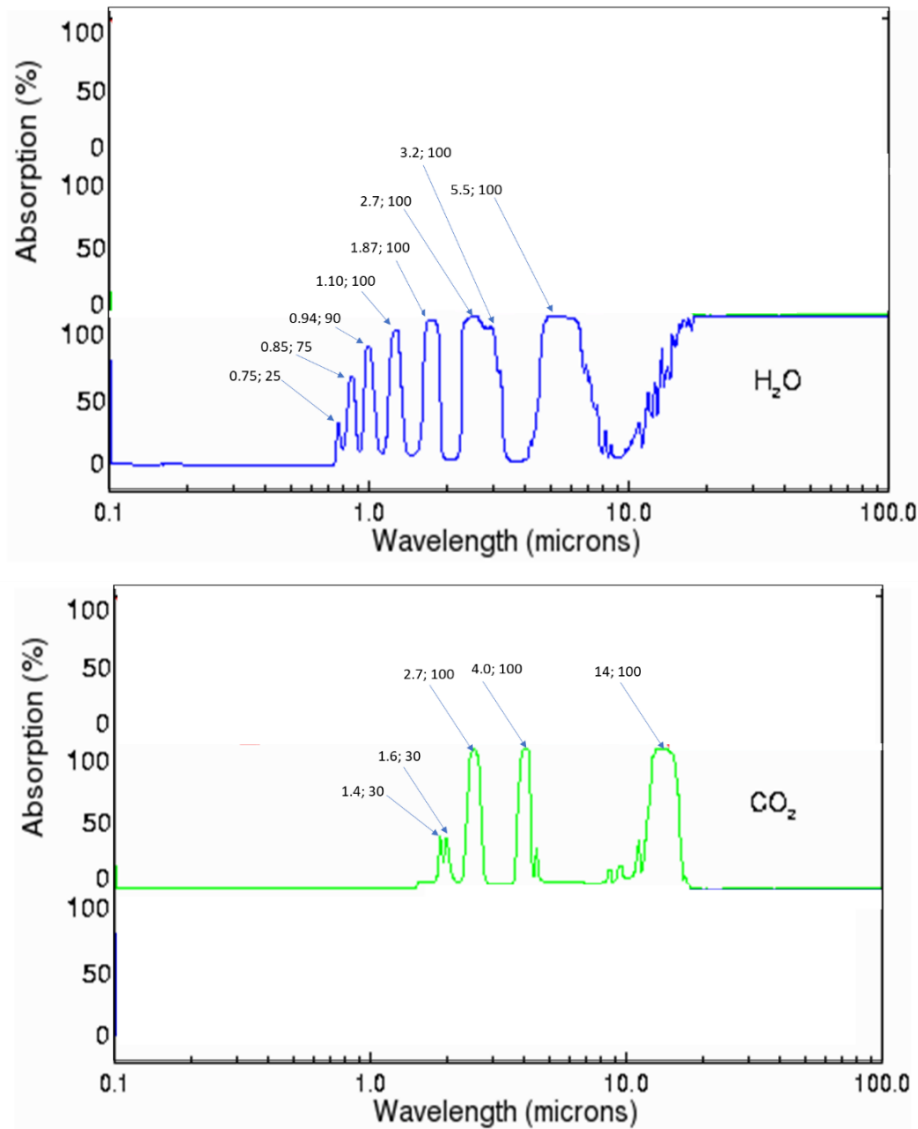


Fig. 1: Espectro de absorbancia en la zona del infrarrojo (IR) del CO₂ y H₂O responsable del calentamiento global (Peng-Sheng *et al.*, 2018; Patadia *et al.*, 2018). Cada banda viene acompañada con información asociada con la posición de cada banda (longitud de onda en micrones μm) y su absorbancia (en %). Por ejemplo, la primera banda de IR del H₂O que tiene asociado el par: (0.75; 25), está ubicada a 0.75 μm y tiene una absorbancia del 25%. Por ejemplo, para las dos primeras bandas de IR del CO₂ que tienen asociadas los pares: (1.4; 30) y (1.6; 30), están ubicadas a 1.4 y 1.6 μm , y tienen una absorbancia de 30% cada una.

Por lo tanto, los parámetros $\Delta E(\text{H}_2\text{O})$ y $\Delta E(\text{CO}_2)$ representan la cantidad de energía por mol que absorben las moléculas de H₂O y CO₂ en el rango de IR responsable del efecto de invernadero y cuyos valores son los siguientes (ver Tablas 1 y 2):

$$\Delta E(H_2O) = 5.4927 \times 10^5 \text{ J/mol} \quad (3)$$

$$\Delta E(CO_2) = 1.3092 \times 10^5 \text{ J/mol}$$

Es interesante observar que el agua tiene 5 veces más capacidad de almacenar energía IR que el CO₂, esto significa que el efecto de invernadero del vapor de agua supera a la capacidad de invernadero del CO₂.

Tabla 1: Tabulación de las bandas de IR para el H₂O gaseoso (ver Fig.1)

Banda	Molécula	λ (μm)	%Absorbancia	ΔE_i
1	H ₂ O	0.75	25	3.9906E+04
2	H ₂ O	0.85	75	1.0563E+05
3	H ₂ O	0.94	100	1.2736E+05
4	H ₂ O	1.1	100	1.0883E+05
5	H ₂ O	1.87	100	6.4020E+04
6	H ₂ O	2.7	100	4.4340E+04
7	H ₂ O	3.2	100	3.7412E+04
8	H ₂ O	5.5	100	2.1767E+04
$\Delta E(H_2O) =$				5.4927E+05 J/mol

Tabla 2: Tabulación de las bandas de IR para el CO₂ (ver Fig.1)

Banda	Molécula	λ (μm)	%Absorbancia	ΔE_i
1	CO ₂	1.4	30	2.5654E+04
2	CO ₂	1.6	30	2.2447E+04
3	CO ₂	2.7	100	4.4340E+04
4	CO ₂	4	100	2.9929E+04
5	CO ₂	14	100	8.5513E+03
$\Delta E(CO_2) =$				1.3092E+05 J/mol

Las ecuaciones de balance de energía para el fenómeno del calentamiento global

La idea central en este estudio para una propuesta de un modelo termodinámico para el calentamiento global, se puede resumir como sigue. Si se tiene la cantidad de moles de H₂O y CO₂ (n_{H_2O} y n_{CO_2}) presentes en la atmósfera, y se pudiera tener la energía infrarroja por mol que absorben estos gases, que la hemos definido previamente como: $\Delta E(H_2O)$ y $\Delta E(CO_2)$, se podría calcular, directamente, el calor absorbido por estos gases asociado a un dado año "a":

$$Q_a = n_a \cdot C_p \cdot (T_a - 255) = n_{H_2O}(a) \cdot \Delta E(H_2O) + n_{CO_2}(a) \cdot \Delta E(CO_2) \quad (4)$$

Donde Q_a es la cantidad de energía absorbida en la atmósfera, C_p es la capacidad calórica de la atmósfera (la cual se asume constante por simplicidad, y cuyo valor es igual a 29 J/K-mol), T_a es la temperatura promedio global de la atmósfera de la Tierra para el año "a" en unidades de Kelvin. Como ya se mencionó anteriormente, la constante 255 es la temperatura de la Tierra (en Kelvin) sin el efecto de los gases de invernadero (Nelson 2011) El parámetro n_a es la cantidad de moles gaseosos totales de O₂, N₂, CO₂ y H₂O presentes en el año "a":

$$n_a = n_{O_2} + n_{N_2} + n_{H_2O}(a) + n_{CO_2}(a) \quad (5)$$

Donde $n_{H_2O}(a)$ y $n_{CO_2}(a)$ son los moles gaseosos de H₂O y CO₂ presentes durante el año "a". La ecuación 4 es una ecuación del balance de energía de la atmósfera de la Tierra que toma en cuenta el efecto de invernadero de

los gases CO₂ y H₂O, es consecuencia de la primera ley de la Termodinámica, y es el planteamiento central de la propuesta de un modelo termodinámico sencillo para el calentamiento global. Nótese que los parámetros nO₂ y nN₂ se asumen constantes e independientes del tiempo por simplicidad. Esta suposición es especialmente cierta para espacios de tiempos cortos respecto a los tiempos geológicos. Por otro lado, se asume:

$$nO_2 + nN_2 \gg nH_2O(a) + nCO_2(a) \quad (6)$$

Por lo tanto, la ecuación 5 se reduce a:

$$na \cong nO_2 + nN_2 = n \quad (7)$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación (4), se obtiene:

$$Qa = n \cdot Cp \cdot (Ta - 255) = nH_2O(a) \cdot \Delta E(H_2O) + nCO_2(a) \cdot \Delta E(CO_2) \quad (8)$$

Nótese que el parámetro "n" es independiente del tiempo.

Cálculo de la variación de la temperatura global de la Tierra entre 1900 y 2000 sin efecto del vapor de agua de la atmósfera

Se comienza por aplicar la ecuación (8) para los años 1900 y 2000:

$$Q_{1900} = n \cdot Cp \cdot (T_{1900} - 255) = nH_2O(1900) \cdot \Delta E(H_2O) + nCO_2(1900) \cdot \Delta E(CO_2) \quad (9)$$

$$Q_{2000} = n \cdot Cp \cdot (T_{2000} - 255) = nH_2O(2000) \cdot \Delta E(H_2O) + nCO_2(2000) \cdot \Delta E(CO_2) \quad (10)$$

Donde T₁₉₀₀ y T₂₀₀₀, son respectivamente la temperatura global de la atmósfera de la Tierra para los años 1900 y 2000. Donde nH₂O (1900) y nH₂O (2000) son el número de moles de H₂O gaseosos presentes en la atmósfera de la tierra para los años 1900 y 2000. Donde nCO₂(1900) y nCO₂(2000) son el número de moles de CO₂ presentes en la atmósfera de la tierra para los años 1900 y 2000.

En esta sección sólo no se va a considerar el efecto del CO₂, por lo tanto, las ecuaciones (9) y (10), se reducen a:

$$Q_{1900} = n \cdot Cp \cdot (T_{1900} - 255) = nCO_2(1900) \cdot \Delta E(CO_2) \quad (11)$$

$$Q_{2000} = n \cdot Cp \cdot (T_{2000} - 255) = nCO_2(2000) \cdot \Delta E(CO_2) \quad (12)$$

Se define la siguiente relación:

$$\% \Delta CO_2 = \% CO_2(2000) - \% CO_2(1900) = 0.007 \quad (13)$$

Esta relación fue planteada previamente en este estudio. Donde %CO₂ (2000) y %CO₂ (1900) son los porcentajes de CO₂ presentes en la atmósfera de los años 2000 y 1900 respectivamente. Las siguientes relaciones son válidas:

$$nCO_2(2000) = \left(\frac{\%CO_2(2000)}{100} \right) \cdot n$$

$$nCO_2(1900) = \left(\frac{\%CO_2(1900)}{100} \right) \cdot n \quad (14)$$

Es conveniente mencionar que el porcentaje volumen a volumen y el porcentaje molar son directamente proporcionales (debido a que el volumen es proporcional a los moles). Realizando un arreglo conveniente de las ecuaciones (14), se obtiene:

$$n_{CO2(2000)} - n_{CO2(1900)} = \left(\frac{\% \Delta CO2}{100}\right) \cdot n \quad (15)$$

Restando la ecuación (12) menos la ecuación (11), y usando la ecuación (15), se obtiene:

$$n \cdot C_p \cdot \Delta T = \left[\left(\frac{\% \Delta CO2}{100}\right) \cdot n\right] \cdot \Delta E(CO2) \quad (16)$$

Donde $\Delta T = (T_{2000} - T_{1900})$ (que es el parámetro buscado, ya que representa la diferencia de temperaturas entre los años 2000 y 1900, que debería ser igual al valor experimental de 0.7°C). Despejando ΔT , se obtiene en este estudio, la siguiente relación fundamental:

$$\Delta T = \frac{\left[\left(\frac{\% \Delta CO2}{100}\right)\right] \cdot \Delta E(CO2)}{C_p} \quad (17)$$

Cálculo de la variación de la temperatura global de la Tierra entre 1900 y 2000 con efecto del vapor de agua de la atmosfera

Un razonamiento similar al usado en la sección anterior para el efecto de la presencia del vapor de agua en la atmosfera, permite llegar a la siguiente relación fundamental de este estudio:

$$\Delta T = \frac{\left[\left(\frac{\% \Delta H2O}{100}\right)\right] \cdot \Delta E(H2O) + \left[\left(\frac{\% \Delta CO2}{100}\right)\right] \cdot \Delta E(CO2)}{C_p} \quad (18)$$

Donde $\% \Delta H2O$ se define como:

$$\% \Delta H2O = \% H2O(2000) - \% H2O(1900) \quad (19)$$

Donde $\% H2O(2000)$ y $\% H2O(1900)$ son los porcentajes (volumen/volumen) del H_2O gaseoso entre los años 2000 y 1900.

RESULTADOS Y DISCUSION

Sustituyendo los valores de los parámetros en la ecuación (17), se obtiene:

$$\Delta T = \frac{\left[\left(\frac{0.007}{100}\right)\right] \cdot 1.3092 \times 10^5 (J/mol)}{29 (J/K \cdot mol)} = 0.3K \equiv 0.3^\circ C \quad (20)$$

Es importante mencionar que esta diferencia de 0.3K equivale también a 0.3°C (ya que el valor de las diferencias entre dos temperaturas es la misma para ambas escalas de temperatura). El valor del C_p usado en este estudio corresponde al aire (mezcla principalmente de $N_2 + O_2$) a la temperatura de 15°C (temperatura promedio global) y a 100 Kpa (kilopascales). El valor del C_p del aire cambia poco con las variaciones de la presión. Nótese que el valor calculado en este estudio de 0.3°C, es próximo al valor observado de 0.7°C. La diferencia entre lo calculado y los observado, se debe a que no se están considerando los efectos combinados del vapor del agua $H_2O(g)$, y el

resto de los gases de invernadero (CH_4 , NO , NO_2). Sin embargo, el $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ tiene un efecto de invernadero muy poderoso por molécula, en comparación con el resto de los gases de invernadero.

Actualmente, a diferencia de los gases de invernadero forzantes como el CO_2 , NO_2 , CH_4 etc., no hay bases de datos climatológicas, que lleven una estadística del $\%\text{H}_2\text{O}$ presente en la atmósfera en función del tiempo. La razón de esto, se debe a que existe el consenso, entre los especialistas en climatología, de que el vapor de agua tiene una muy corta vida atmosférica (cerca de 10 días), y está casi en un equilibrio dinámico en la atmósfera, por lo que no es un gas forzante en el contexto del calentamiento global (<https://www.realclimate.org/index.php/archives/2005/04/water-vapour-feedback-or-forcing/>). Sin embargo, el vapor de agua es el mayor contribuyente al efecto invernadero natural, y es el que está más directamente vinculado al clima y, por consiguiente, menos directamente controlado por la actividad humana. Esto es así porque la evaporación depende fuertemente de la temperatura de la superficie, y el vapor de agua atraviesa la atmósfera en ciclos muy rápidos, de una duración por término medio de uno cada ocho días. Por el contrario, las concentraciones de los demás gases de efecto de invernadero (GEI) están sujetas a la influencia fuerte y directa de las emisiones asociadas con la quema de combustibles fósiles (actividades forestales, y agrícolas que implica la producción y el empleo de diversas sustancias químicas). Por lo tanto, cantidad de vapor de agua, al hacerse el clima más cálido, aumenta la concentración de vapor de agua. Puesto que el vapor de agua es un GEI, esto representa una retroalimentación positiva (respecto al incremento de la temperatura global) (Benavides & León, 2007).

En vista de los problemas de la falta de información confiable de los niveles del H_2O gaseoso presente en la atmósfera en función del tiempo, se puede, al menos, numéricamente, estimar el efecto del vapor de agua en el calentamiento global. Por ejemplo, si se asume que el parámetro $\%\Delta\text{H}_2\text{O}$ es igual en valor al $\%\Delta\text{CO}_2$ (cuyo valor se estableció en este estudio igual a 0.007%), entonces, se puede obtener un valor para el ΔT para el efecto combinado de los gases CO_2 y H_2O (ver ecuación 18):

$$\Delta T = \frac{\left[\left(\frac{0.007}{100}\right)\right] \cdot 5.4927 \times 10^5 + \left[\left(\frac{0.007}{100}\right)\right] \cdot 1.3092 \times 10^5}{29} = 1.6K \equiv 1.6^\circ C \quad (21)$$

Si hacemos la diferencia entre este resultado, y el obtenido en la ecuación (20), se tiene un valor igual a 1.3°C (esta sería la contribución de únicamente del H_2O gaseoso). Este resultado indica que el agua es un poderoso GEI mayor que el CO_2 . Por lo tanto, el efecto del incremento de la temperatura global por efecto del $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ es, al menos, unas 4 veces mayor que el efecto del incremento de la temperatura global del CO_2 ($1.3/0.3 \approx 4$).

CONCLUSIONES

En este estudio se ha desarrollado una teoría relativamente sencilla basada en principios fundamentales de la Termodinámica, que nos permiten demostrar que el CO_2 es un gas con el potencial de calentar la atmósfera de la Tierra.

También en este estudio se determinó que el efecto de invernadero del vapor del agua es muy superior al del CO_2 (al menos en un factor de 4). Esto significa que un aumento del CO_2 traería como consecuencia, un aumento indirecto del vapor de agua en la atmósfera potenciando aún más el efecto invernadero de la Tierra.

REFERENCIAS

Benavides, H.O. & León, G.E. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. IDEAM-METEO/008-2007. Nota Técnica del IDEAM, pag.41. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>

Michaels, P.J. & Balling, R.C. (2000). "*The Satanic Gases: Clearing the Air about Global Warming*", p.25. Cato Institute.

Nelson, T. (2011). *Cold Facts on Global Warming*. Science notes. <https://www.randombio.com/co2.html>

Patadia, F., Levy, R.C. & Mattoo, S. (2018). Correcting for trace gas absorption when retrieving aerosol optical depth from satellite observations of reflected shortwave radiation. *Atmos. Meas. Tech.*, *11*, 3205–3219. <https://doi.org/10.5194/amt-11-3205-2018>

Peng-Sheng, W., Yin-Chih, H., Hsuan-Han, Ch., Da-Lun, Y., Chieh, L., Yi-Cheng, T. *et al.* (2018). Absorption coefficient of carbon dioxide across atmospheric troposphere layer. *Heliyon*, *4* (10): e00785. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon>

Shimazaki, T. & Helmle, L.C. (1979). *A Simplified Method for Calculating the Atmospheric Heating Rate by Absorption of Solar Radiation in the Stratosphere and Mesosphere*. NASA Technical Paper 1398. Ames Research Center, NASA. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19790008322/downloads/19790008322.pdf>

Thomas, G.E. & Stamnes, K. (1999). "*Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean*", p.441. Cambridge University Press.

