

# **UNA VISIÓN TERMODINÁMICA PARA EXPLICAR LA CORRELACIÓN ENTRE EL INCREMENTO DE LA TEMPERATURA GLOBAL DE LA TIERRA CON LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> EN LA ATMÓSFERA**

## **A THERMODYNAMIC VIEW TO EXPLAIN THE CORRELATION BETWEEN GLOBAL TEMPERATURE AND THE INCREASING CONCENTRATION OF CO<sub>2</sub> IN THE EARTH'S ATMOSPHERE**

---

**Iván Machin-Morera<sup>1\*</sup>, Lorena Pérez-Orta<sup>1</sup>, Susana Martínez<sup>1</sup>**

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

*Recibido: 05/05/2023 - Evaluado: 30/05/2023 - Aceptado: 21/06/2023*

---

### **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. Existe abundante información tanto a nivel de literatura como en las redes sociales, sin embargo, existe información contradictoria sobre el efecto del CO<sub>2</sub> en el calentamiento global. El objetivo en este estudio es demostrar, usando métodos basados en principios fundamentales de la Termodinámica, que, efectivamente, existe una correlación causa-efecto entre el aumento global de la temperatura con el aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera de la Tierra.

### **ABSTRACT**

Currently, there is a great media coverage of those issues that are important to humanity, among these issues is the problem of global warming of the Earth. There is abundant information both in literature and on social networks, however, there is contradictory information about the effect of CO<sub>2</sub> on global warming. In this study, a relatively simple theory has been developed based on fundamental principles of Thermodynamics, which allows us to demonstrate that CO<sub>2</sub> is a gas with the potential to heat the atmosphere and generate global climate change on Earth.

Palabras claves: dióxido de carbono, cambio climático, modelo climático, modelo termodinámico  
keywords: carbon dioxide, climate change, climate model, thermodynamic model

## INTRODUCCION

Se ha estimado que sin los gases de invernadero la Tierra estaría a 33 grados centígrados más fría o a -18 grados centígrados (255 K) en promedio (Nelson 2011; Thomas & Stamnes, 1999). Existe un cambio climático desde 1880 asociado con el aumento de la temperatura global de la Tierra. La Tabla 1 contiene las variaciones de la temperatura global de la atmósfera de la Tierra. La primera columna contiene los años asociados con las mediciones de temperatura global, los cuales hemos definido con la variable  $t$ . La segunda columna de la Tabla 1 contiene la evolución de la variación de temperatura global de la Tierra desde el año 1880 (o, también, con respecto al año 1880), definimos esta columna como  $\Delta T_{1880}(t)$  en °C (por lo tanto,  $t$  es un valor entre 1880 y 2022). La tercera columna de la Tabla 1 contiene la evolución de la variación de la temperatura global de la Tierra desde el año 1900, definimos esta columna como  $\Delta T(t)$  en °C. El parámetro  $\Delta T(t)$  se calculó en este estudio por medio de la siguiente relación:

$$\Delta T(t) = \Delta T_{1880}(t) - \Delta T_{1880}(1900) \quad (1)$$

Donde  $\Delta T_{1880}(1900)$  es el cambio de la temperatura global de la Tierra para el año 1900 ( $t=1900$ ) respecto al año 1880. La Figura 1 contiene la gráfica de las columnas 1 y 3 de la Tabla 1. Por otro lado, la Tabla 2 contiene la evolución de la concentración del  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera de la Tierra. La segunda columna de la Tabla 2 contiene la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera de la Tierra en unidades de ppm en volumen (ppm  $\text{CO}_2$ ). La tercera columna contiene la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera de la Tierra en unidades de porcentaje volumen/volumen (%v/v), el cual fue calculado mediante la siguiente relación:

$$\% \text{CO}_2(t) = \text{ppmCO}_2 \times 10^{-4} \quad (2)$$

La cuarta columna contiene la variación de la concentración en %v/v respecto al año 1900, el cual fue calculado mediante la siguiente relación:

$$\% \Delta \text{CO}_2(t) = \% \text{CO}_2(t) - \% \text{CO}_2(1900) \quad (3)$$

La Figura 2 contiene la gráfica de las columnas 1 y 4 de la Tabla 2. Si se unen los gráficos de las figuras 1 y 2, se obtiene la gráfica de la Figura 3. Es importante mencionar que los valores de  $\% \Delta \text{CO}_2$  de la gráfica de la Figura 3, se multiplicaron por un factor de escala igual a 90. La gráfica de la Figura 3 reproduce los resultados obtenidos por numerosas agencias de estudios climáticos y meteorológicos de la atmósfera de la Tierra (<https://news.un.org/es/story/2023/01/1517852>). Por conveniencia hemos planteado en este artículo, el gráfico de la Figura 4, donde se ha graficado  $\Delta T(t)$  contra  $\% \Delta \text{CO}_2(t)$ . La gráfica de la Figura 4 estaría indicando que existe una conexión entre los parámetros  $\Delta T(t)$  contra  $\% \Delta \text{CO}_2(t)$ , en otras palabras, un aumento de la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera implica un aumento de la temperatura global de la Tierra.

Es importante mencionar que, pese a que las gráficas de las figuras 3 y 4 indican de manera aparentemente elocuente, la conexión entre  $\Delta T(t)$  y  $\% \Delta \text{CO}_2$ , sin embargo, podría tratarse de un resultado fortuito como consecuencia de otros efectos desconocidos. Para poder demostrar de manera contundente las conclusiones que se derivan de gráficas 3 y 4, especialmente, la gráfica de la Figura 4, es necesario desarrollar una teoría cuya premisa sea que: el calentamiento global es consecuencia directa de la presencia de  $\text{CO}_2$  en cantidades crecientes en la atmósfera de la Tierra. A partir de esta premisa, se debería generar una correlación teórica entre  $\Delta T(t)$  y  $\% \Delta \text{CO}_2$ , que pueda superponerse en la curva observada de la gráfica  $\Delta T(t)$  versus  $\% \Delta \text{CO}_2$  de la Figura 4. Por lo tanto, el objetivo de este artículo es reproducir la gráfica de la Figura 4 por medio del desarrollo de una teoría termodinámica que permita demostrar, la existencia de una correlación entre los parámetros  $\Delta T(t)$  y  $\% \Delta \text{CO}_2(t)$ .

Tabla 1: Evolución con el tiempo de la variación de la temperatura global de la Tierra.

Year t	$\Delta T_{1880}(t)$ °C	$\Delta T(t)$ °C	Notes	Year t	$\Delta T_{1880}(t)$ °C	$\Delta T(t)$ °C	Notes
1900	-0.2	0	(*)	1989	0.33	0.53	(*)
1905	-0.34	-0.14	(*)	1990	0.33	0.53	(*)
1910	-0.41	-0.21	(*)	1991	0.33	0.53	(*)
1915	-0.3	-0.1	(*)	1992	0.33	0.53	(*)
1920	-0.27	-0.07	(*)	1993	0.33	0.53	(*)
1925	-0.22	-0.02	(*)	1994	0.34	0.54	(*)
1930	-0.19	0.01	(*)	1995	0.36	0.56	(*)
1935	-0.14	0.06	(*)	1996	0.4	0.6	(*)
1940	0.06	0.26	(*)	1997	0.42	0.62	(*)
1945	0.04	0.24	(*)	1998	0.44	0.64	(*)
1950	-0.08	0.12	(*)	1999	0.47	0.67	(*)
1955	-0.06	0.14	(*)	2000	0.5	0.70	(*)
1958	-0.01	0.19	(*)	2001	0.52	0.72	(*)
1959	0.01	0.21	(*)	2002	0.54	0.74	(*)
1960	0.03	0.23	(*)	2003	0.58	0.78	(*)
1961	0.01	0.21	(*)	2004	0.6	0.80	(*)
1962	-0.01	0.19	(*)	2005	0.61	0.81	(*)
1963	-0.03	0.17	(*)	2006	0.62	0.82	(*)
1964	-0.04	0.16	(*)	2007	0.63	0.83	(*)
1965	-0.05	0.15	(*)	2008	0.64	0.84	(*)
1966	-0.06	0.14	(*)	2009	0.64	0.84	(*)
1967	-0.05	0.15	(*)	2010	0.64	0.84	(*)
1968	-0.03	0.17	(*)	2011	0.66	0.86	(*)
1969	-0.02	0.18	(*)	2012	0.69	0.89	(*)
1970	0	0.2	(*)	2013	0.74	0.94	(*)
1971	0	0.2	(*)	2014	0.78	0.98	(*)
1972	0	0.2	(*)	2015	0.83	1.03	(*)
1973	0	0.2	(*)	2016	0.87	1.07	(*)
1974	0.01	0.21	(*)	2017	0.91	1.11	(*)
1975	0.02	0.22	(*)	2018	0.93	1.13	(*)
1976	0.04	0.24	(*)	2019	0.92	1.12	(*)
1977	0.07	0.27	(*)	2020	0.95	1.15	(*)
1978	0.12	0.32	(*)	2021	0.97	1.17	(*)
1979	0.16	0.36	(*)	2022	0.99	1.19	(*)
1980	0.2	0.4	(*)				
1981	0.21	0.41	(*)				
1982	0.22	0.42	(*)				
1983	0.21	0.41	(*)				
1984	0.21	0.41	(*)				
1985	0.22	0.42	(*)				
1986	0.24	0.44	(*)				
1987	0.27	0.47	(*)				
1988	0.31	0.51	(*)				

(\*): <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/temperatura-global/>

Tabla 2: Evolución de la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera de la Tierra en ppm en volumen.

Year t	ppm CO <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	%ΔCO <sub>2</sub> v/v	Notes	Year t	ppm CO <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	%ΔCO <sub>2</sub> v/v	Notes
1900	296.7	0.02967	0	(*)	1988	351.5	0.03515	0.00548	(*)
1905	298.2	0.02982	0.00015	(*)	1989	352.9	0.03529	0.00562	(*)
1910	299.9	0.02999	0.00032	(*)	1990	354.2	0.03542	0.00575	(*)
1915	301.5	0.03015	0.00048	(*)	1991	355.6	0.03556	0.00589	(*)
1920	303.2	0.03032	0.00065	(*)	1992	356.4	0.03564	0.00597	(*)
1925	304.9	0.03049	0.00082	(*)	1993	357	0.0357	0.00603	(*)
1930	306.5	0.03065	0.00098	(*)	1994	358.9	0.03589	0.00622	(*)
1935	308	0.0308	0.00113	(*)	1995	360.9	0.03609	0.00642	(*)
1940	309.3	0.03093	0.00126	(*)	1996	362.6	0.03626	0.00659	(*)
1945	310.5	0.03105	0.00138	(*)	1997	363.8	0.03638	0.00671	(*)
1950	312	0.0312	0.00153	(*)	1998	366.6	0.03666	0.00699	(*)
1955	314.1	0.03141	0.00174	(*)	1999	368.3	0.03683	0.00716	(*)
1958	315.3	0.03153	0.00186	(*)	2000	369.5	0.03695	0.00728	(*)
1959	316	0.0316	0.00193	(*)	2001	371	0.0371	0.00743	(*)
1960	316.9	0.03169	0.00202	(*)	2002	373.1	0.03731	0.00764	(*)
1961	317.6	0.03176	0.00209	(*)	2003	375.6	0.03756	0.00789	(*)
1962	318.5	0.03185	0.00218	(*)	2004	377.4	0.03774	0.00807	(*)
1963	319	0.0319	0.00223	(*)	2005	379.6	0.03796	0.00829	(*)
1964	319.2	0.03192	0.00225	(*)	2006	381.8	0.03818	0.00851	(*)
1965	320	0.032	0.00233	(*)	2007	383.6	0.03836	0.00869	(*)
1966	321.4	0.03214	0.00247	(*)	2008	385.4	0.03854	0.00887	(*)
1967	322.2	0.03222	0.00255	(*)	2009	387.4	0.03874	0.00907	(*)
1968	323	0.0323	0.00263	(*)	2010	389.9	0.03899	0.00932	(*)
1969	324.6	0.03246	0.00279	(*)	2011	391.6	0.03916	0.00949	(*)
1970	325.7	0.03257	0.0029	(*)	2012	393.9	0.03939	0.00972	(*)
1971	326.3	0.03263	0.00296	(*)	2013	396.6	0.03966	0.00999	(*)
1972	327.5	0.03275	0.00308	(*)	2014	398.6	0.03986	0.01019	(*)
1973	329.7	0.03297	0.0033	(*)	2015	400.9	0.04009	0.01042	(*)
1974	330.2	0.03302	0.00335	(*)	2016	404.3	0.04043	0.01076	(*)
1975	331.2	0.03312	0.00345	(*)	2017	406.6	0.04066	0.01099	(*)
1976	332.2	0.03322	0.00355	(*)	2018	408.6	0.04086	0.01119	(*)
1977	333.9	0.03339	0.00372	(*)	2019	412.0	0.041196	0.011526	(**)
1978	335.5	0.03355	0.00388	(*)	2020	413.1	0.04131	0.01164	(**)
1979	336.9	0.03369	0.00402	(*)	2021	416.2	0.04162	0.01195	(**)
1980	338.7	0.03387	0.0042	(*)	2022	419	0.0419	0.01223	(**)
1981	339.9	0.03399	0.00432	(*)					
1982	341.1	0.03411	0.00444	(*)					
1983	342.8	0.03428	0.00461	(*)					
1984	344.4	0.03444	0.00477	(*)					
1985	345.9	0.03459	0.00492	(*)					
1986	347.2	0.03472	0.00505	(*)					
1987	348.9	0.03489	0.00522	(*)					

(\*): [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores18/conjuntob/indicador/archivos/pdf/01\\_atmosfera/cambio/indicadores/1.2-4.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores18/conjuntob/indicador/archivos/pdf/01_atmosfera/cambio/indicadores/1.2-4.pdf) y (\*\*): <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

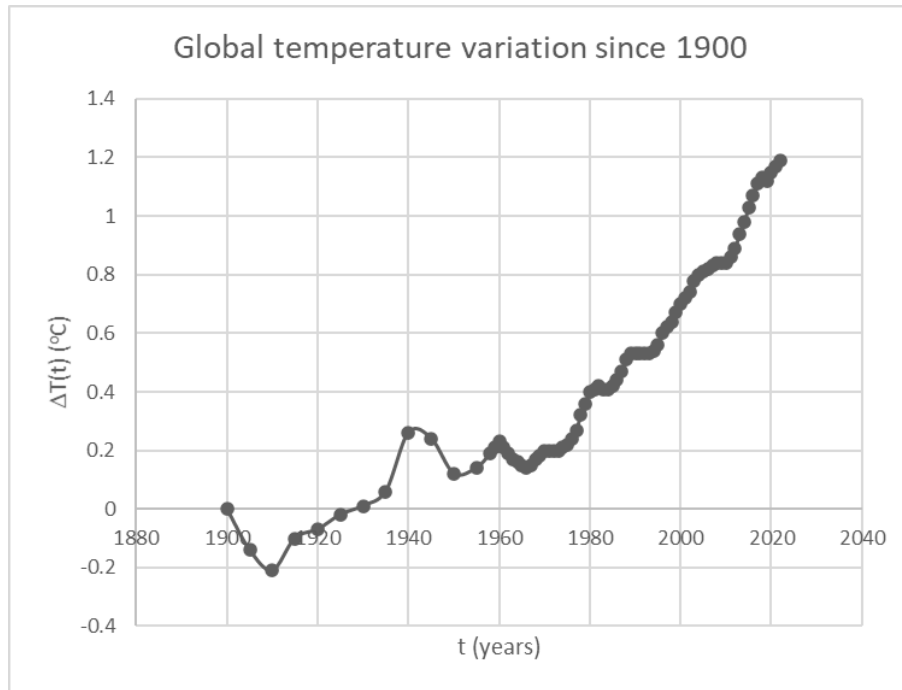


Fig. 1: Gráfico de la variación con respecto al año 1900 de la temperatura global de la atmosfera de la Tierra.

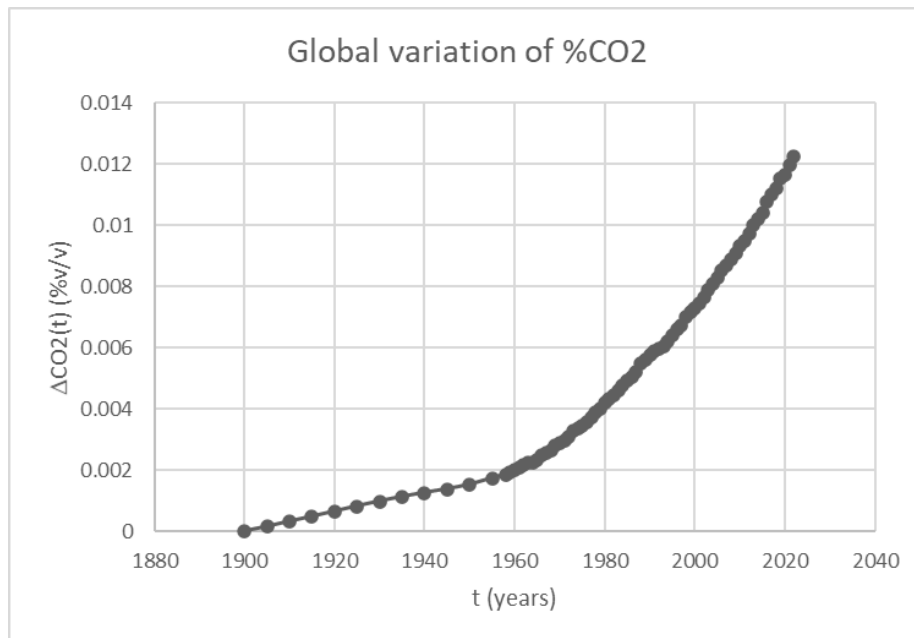


Fig. 2: Gráfico de la variación con respecto al año 1900 del porcentaje global del CO<sub>2</sub> en la atmósfera de la Tierra.

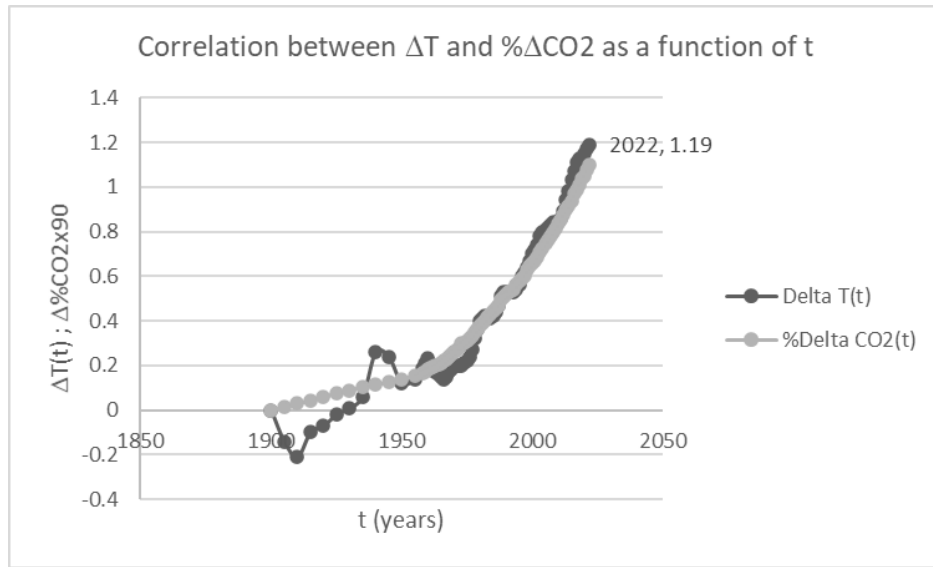


Fig. 3: Gráfico que muestra la correlación entre la variación de la temperatura global con la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera terrestre. Nótese que para el año 2022 (t=2022), la variación de temperatura respecto al año 1900 fue de 1.2°C. Los valores de %ΔCO<sub>2</sub> se multiplicaron por un factor de escala igual a 90 (%ΔCO<sub>2</sub>×90).

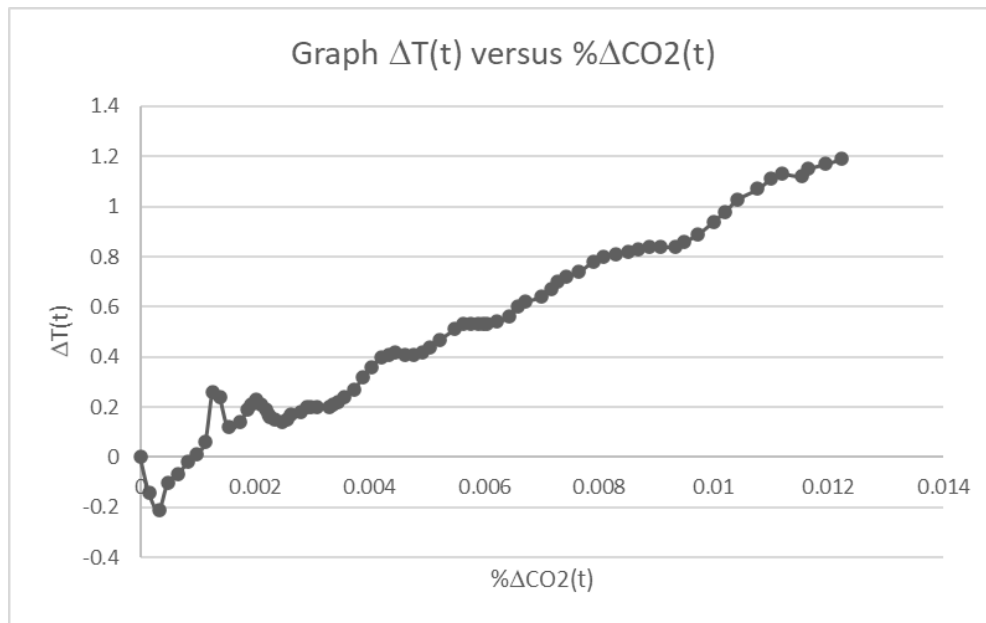


Fig. 4: Gráfico  $\Delta T(t)$  versus  $\% \Delta CO_2$  del aumento de la temperatura global debido a las crecientes cantidades de CO<sub>2</sub> en la atmósfera terrestre.

Es importante mencionar que, se han desarrollado modelos para la correlación entre  $\Delta T(t)$  y  $\% \Delta CO_2(t)$  tanto elaborados o muy complejos (<https://meteosim.com/modelos-globales-regionales-cambio-climatico/>), como también, se han desarrollado modelos relativamente menos complejos (Shimazaki & Helmle, 1979). La teoría

desarrollada en este artículo está basada, exclusivamente, en términos termodinámicos, y es, por lo tanto, la primera vez que se hace un modelo este tipo para la explicación del cambio climático.

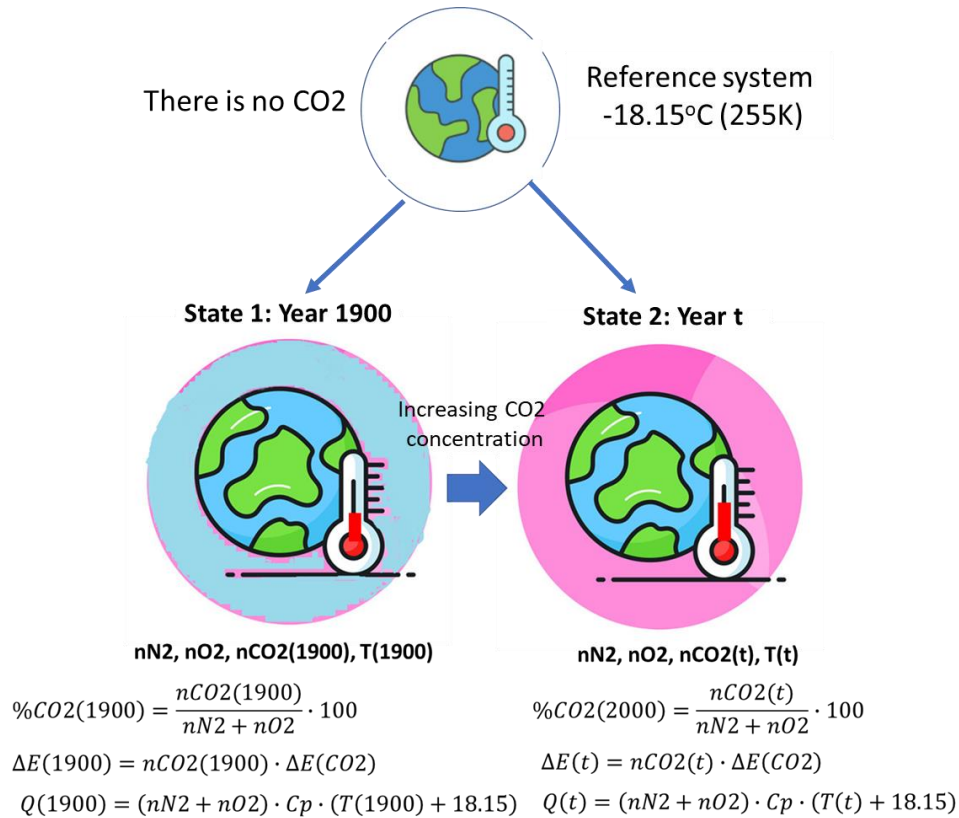


Fig. 5: Definición de los estados termodinámicos de la atmósfera terrestre entre los años 1900 y t.

## FUNDAMENTOS

En Termodinámica, la resolución de los problemas empieza por definir el sistema a estudiar y los distintos estados que puede tomar dicho sistema durante uno o varios procesos. En este artículo, el sistema a estudiar es la atmósfera de la Tierra. Los estados termodinámicos están definidos por la composición de la atmósfera de la Tierra (moles de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), y su temperatura global definida como T(t) (en unidades de °C). En la Figura 5 se resume la idea de los estados termodinámicos para la atmósfera de la Tierra. Por lo tanto, el Estado 1 está asociado a las condiciones de la atmósfera de la Tierra para el año 1900, y el Estado 2 está asociado a las condiciones de la atmósfera de la Tierra para el año t. Partimos de las siguientes premisas y aproximaciones:

- 1) La cantidad de radiación solar recibida por la Tierra es constante e independiente de t. Esta radiación solar es absorbida por la superficie de la Tierra y reemitida a la atmósfera como radiación infrarroja.
- 2) La cantidad de moles de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> presentes en el sistema (la cantidad de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en la atmósfera de la Tierra), el parámetro Cp de la atmósfera (calor específico a presión constante), y el volumen del sistema son independientes de t.
- 3) El sistema es tan grande (la Tierra) y las cantidades de CO<sub>2</sub> son tan pequeñas, que se puede considerar el sistema en equilibrio termodinámico en cada instante t.

- 4) Se define un estado de referencia en el cual, no existe la presencia de CO<sub>2</sub> y su temperatura es igual a 255K (-18.15 °C) (Nelson 2011; Thomas & Stamnes, 1999). Este estado de referencia es conveniente, ya que nos permite definir los parámetros termodinámicos de los estados 1 y 2, ver Figura 5.
- 5) El proceso de adición de CO<sub>2</sub> en el Estado 1 del sistema genera el Estado 2. Esta cantidad de CO<sub>2</sub> es la responsable de la diferencia de temperaturas ente los estados 1 y 2, como consecuencia de la capacidad del CO<sub>2</sub> de adsorber la radiación infrarroja descrita en Premisa 1. El CO<sub>2</sub> absorbe la radiación infrarroja para transmitirla a las otras moléculas de la atmósfera (mediante un proceso colisional entre las moléculas de CO<sub>2</sub> con las moléculas de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>) haciendo que la atmósfera aumente su temperatura global en un valor definido como T(t) (Michaels & Balling, 2000).

El Estado 1 está caracterizado por los parámetros nN<sub>2</sub> (moles de N<sub>2</sub>), nO<sub>2</sub> (moles de O<sub>2</sub>), nCO<sub>2</sub>(1900) (moles de CO<sub>2</sub> para t=1900), T(1900) (temperatura global de la Tierra para t=1900). Se definen los siguientes parámetros (ver Figura 5). La concentración porcentual de CO<sub>2</sub> para 1900, se expresa como:

$$\%CO_2(1900) = \frac{nCO_2(1900)}{(nN_2 + nO_2 + nCO_2(1900))} \cdot 100 \cong \frac{nCO_2(1900)}{(nN_2 + nO_2)} \cdot 100 \quad (4)$$

Nótese que nN<sub>2</sub>+nO<sub>2</sub> es mucho mayor que nCO<sub>2</sub>(1900), y en general, nN<sub>2</sub>+nO<sub>2</sub> es mucho mayor que nCO<sub>2</sub>(t) (independientemente del valor de t). La cantidad de energía respecto a la referencia (ver Premisa 4) transferida a la atmósfera por efecto del CO<sub>2</sub> para t=1900, se define como:

$$\Delta E(1900) = (nCO_2(1900) - nCO_2(\text{ref})) \cdot \Delta E(CO_2) \quad (5)$$

Donde nCO<sub>2</sub>(ref) es la cantidad de CO<sub>2</sub> de la referencia definida en Premisa 4 (nCO<sub>2</sub>(ref)=0), donde ΔE(CO<sub>2</sub>) es la cantidad de energía por mol en la banda de IR que absorbe el CO<sub>2</sub>. La cantidad de calor transferido a la atmósfera para t=1900, con respecto a la referencia definida en la Premisa 4, se calcula mediante la siguiente relación:

$$Q(1900) = (nN_2 + nO_2) \cdot C_p \cdot (T(1900) - (-18.15)) \quad (6)$$

Es importante mencionar que %CO<sub>2</sub> (1900) es un porcentaje molar, pero, es también equivalente al porcentaje volumen a volumen %v/v. Esto es consecuencia de la ecuación de los gases ideales:

$$P \cdot (VN_2 + VO_2) = (nN_2 + nO_2) \cdot R \cdot Tk \quad (7)$$

$$P \cdot VCO_2 = nCO_2 \cdot R \cdot Tk \quad (8)$$

Donde R es la constante de los gases ideales y Tk es temperatura en Kelvin. Dividiendo esta ecuación entre la ecuación 7, se obtiene:



$$\%v/v = \frac{V_{CO2}}{(V_{N2} + V_{O2})} \cdot 100 = \frac{n_{CO2}}{(n_{N2} + n_{O2})} \cdot 100 = \%Molar \quad (9)$$

Este resultado muestra la equivalencia entre el % molar y el % v/v. La ecuación 5 permite calcular la cantidad de energía almacenada en los moles de CO<sub>2</sub> presentes en el año 1900, nCO<sub>2</sub>(1900). La ecuación 6 permite calcular la cantidad de energía calórica para el año 1900 respecto a la temperatura de referencia de -18.15°C (255K). Es conveniente mencionar que el Cp en la ecuación 6 es la capacidad calórica del aire. La primera ley de la Termodinámica se define como:

$$\Delta E = Q + W \quad (10)$$

Si se asume que el trabajo asociado por la expansión de la atmósfera desde la temperatura de referencia -18.5 °C (255 K) hasta la temperatura T (1900) es despreciable (como consecuencia de la Premisa 2, no hay cambio de volumen en la atmósfera), entonces, la primera ley adquiere una forma más sencilla:

$$\Delta E = Q \quad (11)$$

Esta relación permite igualar las ecuaciones 5 y 6:

$$n_{CO2}(1900) \cdot \Delta E(CO2) = (n_{N2} + n_{O2}) \cdot C_p \cdot (T(1900) + 18.15) \quad (12)$$

Aplicando los mismos razonamientos al Estado 2, ver Fig.5, se obtiene:

$$n_{CO2}(t) \cdot \Delta E(CO2) = (n_{N2} + n_{O2}) \cdot C_p \cdot (T(t) + 18.15) \quad (13)$$

Se define la siguiente relación:

$$\% \Delta CO2(t) = \%CO2(t) - \%CO2(1900) \quad (14)$$

Donde %CO<sub>2</sub>(t) y %CO<sub>2</sub>(1900) son los porcentajes de CO<sub>2</sub> presentes en la atmósfera de los años t y 1900 respectivamente. Despejando nCO<sub>2</sub>(1900) de la ecuación 4, se obtiene:

$$n_{CO2}(1900) = \left( \frac{\%n_{CO2}(1900)}{100} \right) \cdot (n_{N2} + n_{O2}) \quad (15)$$

Una expresión similar se obtiene para nCO<sub>2</sub>(t):

$$nCO_2(t) = \left( \frac{\%nCO_2(t)}{100} \right) \cdot (nN_2 + nO_2) \quad (16)$$

Restando la ecuación 16 menos 15, y usando la definición de la ecuación 14, se obtiene:

$$nCO_2(t) - nCO_2(1900) = \left( \frac{\%\Delta CO_2(t)}{100} \right) \cdot (nN_2 + nO_2) \quad (17)$$

Restando la ecuación 13 menos la ecuación 12, se obtiene:

$$nCO_2(t) - nCO_2(1900) = \frac{(nN_2 + nO_2) \cdot C_p \cdot [T(t) - T(1900)]}{\Delta E(CO_2)} \quad (18)$$

Igualando las ecuaciones 17, 18 y simplificando, se obtiene la siguiente relación fundamental propuesta en este estudio:

$$\Delta T(t) = \frac{\left[ \left( \frac{\%\Delta CO_2(t)}{100} \right) \right] \cdot \Delta E(CO_2)}{C_p} = \% \Delta CO_2(t) \cdot \left( \frac{\Delta E(CO_2)}{100 \cdot C_p} \right) \quad (19)$$

Donde  $\Delta T(t) = (T(t) - T(1900))$ , es el parámetro buscado, ya que representa la diferencia de temperaturas entre los años  $t$  y 1900, o, en otras palabras, es el incremento de la temperatura global de la Tierra entre los años  $t$  y 1900.

## RESULTADOS Y DISCUSION

La ecuación 19 obtenida en este estudio, establece la existencia de una linealidad entre el  $\Delta T(t)$  y el  $\% \Delta CO_2(t)$ , por otro lado, vamos a redefinir la ecuación 19 de la siguiente manera:

$$\Delta T(t) = F \cdot \% \Delta CO_2(t) \quad (20)$$

Donde el parámetro  $F$  se define como:

$$F = \left( \frac{\Delta E(CO_2)}{100 \cdot C_p} \right) \quad (21)$$

Si hace un estudio de línea tendencia para la curva de la Figura 4 usando el programa Excel, y asumimos un modelo lineal que pasa por el origen de esta gráfica, se obtiene la siguiente correlación lineal entre  $\Delta T(t)$  y  $\% \Delta CO_2(t)$ :

$$\Delta T(t) = 93.898 \cdot \% \Delta CO_2(t) \quad (22)$$

Esta correlación lineal tiene un factor de correlación ( $R^2$ ) igual a 0.9877, esto confirma el modelo termodinámico que se ha desarrollado en este estudio (ver ecuación 20), el cual predice una linealidad entre  $\Delta T(t)$  y  $\% \Delta CO_2(t)$  con un factor de correlación de 0.9877. En la Figura 6 se tiene la gráfica  $\Delta T(t)$  contra  $\% \Delta CO_2(t)$  donde se puede ver la tendencia lineal del modelo de la ecuación 20, ver línea continua en color rojo.

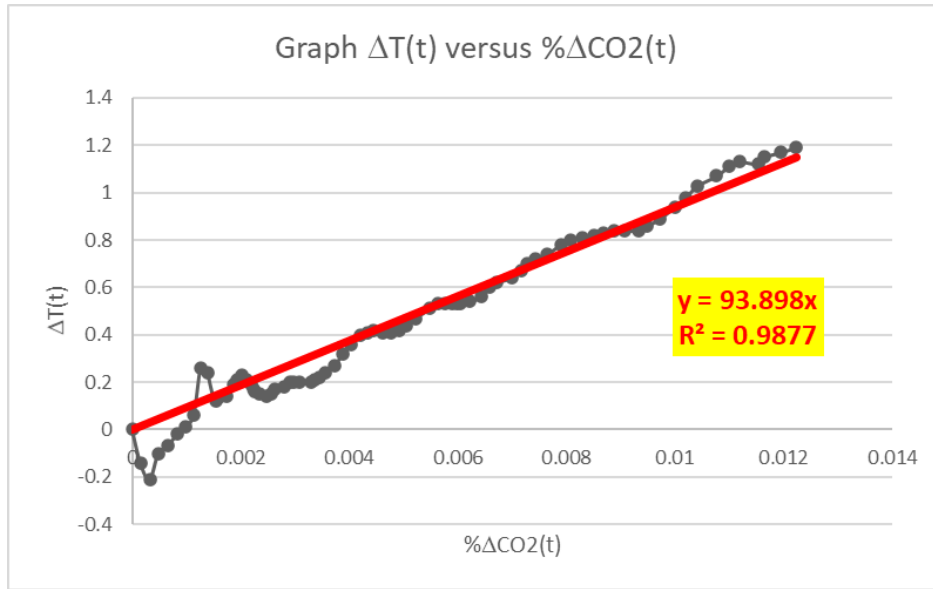


Fig. 6: Gráfico  $\Delta T(t)$  versus  $\% \Delta CO_2(t)$  que muestra la curva gris oscuro, obtenida a partir de datos observacionales del aumento de la temperatura global debido a las crecientes cantidades de  $CO_2$  en la atmósfera terrestre. La curva en rojo se obtuvo del ajuste de la ecuación 20, la cual se obtuvo del desarrollo de un modelo termodinámico en este estudio.

Comparando la ecuación 20 con la ecuación 22, se obtiene el valor del factor F:

$$F = \left( \frac{\Delta E(CO_2)}{100 \cdot C_p} \right) = 93.898 \quad (23)$$

El valor del  $C_p$  (29 J/K·mol) 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. Sustituyendo este valor del  $C_p$  en esta ecuación y despejando el parámetro  $\Delta E(CO_2)$ , se obtiene:

$$\Delta E(CO_2) = 93.898 \times 100 \times C_p = 2.72 \times 10^5 \frac{J}{mol} \quad (24)$$

Comparando este valor con el obtenido en un artículo previo (Machin *et al.*, 2023), cuyo valor del parámetro  $\Delta E(CO_2)$  es igual a  $1.3 \times 10^5$  J/mol. Ambos valores del parámetro  $\Delta E(CO_2)$  están muy cercanos.

## CONCLUSIONES

En este estudio se ha desarrollado una teoría basada en principios fundamentales de la Termodinámica, que nos permiten demostrar que el CO<sub>2</sub> es un gas con el potencial de calentar la atmósfera de la Tierra, y potenciar un cambio climático global en la Tierra. El modelo está representado por la ecuación 19, la cual fue deducida en este estudio usando sólo argumentos termodinámicos.

Los resultados resumidos en la Figura 6 permiten demostrar que el modelo termodinámico desarrollado en este estudio, se correlaciona muy bien con la data observada de la evolución de la variación de la temperatura desde el año 1900 hasta el 2022. Estos resultados del modelo termodinámico refuerzan la teoría del calentamiento global de la Tierra como consecuencia de la presencia, en concentraciones crecientes, del CO<sub>2</sub>.

## REFERENCIAS

- Machin I., Pérez-Orta L. & Martínez S. (2023). 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 espectroscopía de infrarrojo a las moléculas de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 14 (1), 85-93. <https://www.executivebs.org/publishing.cl/avances-en-ciencias-e-ingenieria-vol-14-nro-1-ano-2023-articulo-5/>
- Michaels, P.J. & Balling, R.C. (2000). " *The Satanic Gases*", p.25. Cato Institute.
- Nelson T. (2011). Cold Facts on Global Warming. Science notes. <https://www.randombio.com/co2.html>
- 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.