

Calentamiento global: una secuencia didáctica

J.H. Mondragón-Suárez*, A. Sandoval-Villalazo†, and F. Breña-Ramos

Departamento de Física y Matemáticas

Universidad Iberoamericana,

*Prolongación Paseo de la Reforma 880, Lomas de Santa Fe, 01219,
Ciudad de México.*

**humberto.mondragon@ibero.mx*; †*alfredo.sandoval@ibero.mx*

Received 14 August 2018; accepted 28 November 2018

El calentamiento global antropogénico es un fenómeno físico que se ha ido incrementando, generando efectos negativos que están afectando cada vez más a los ecosistemas terrestres. En este trabajo se instruye al lector en los fundamentos y procesos físicos básicos que lo producen, dándole elementos confiables para tomar mejores decisiones y coadyuvar a la disminución de los efectos nocivos. La secuencia didáctica propuesta, conduce lógicamente a la conclusión de que la civilización atraviesa por una crisis climática grave, la cual obliga a los países y al habitante común a hacer una reflexión profunda sobre su responsabilidad en dicho fenómeno y a utilizar herramientas analíticas para apreciar avances o retrocesos en la implementación de estrategias a nivel internacional para enfrentar el problema.

Descriptor: Calentamiento global; enseñanza de la física del cambio climático; gases de efecto invernadero.

Anthropogenic global warming is a physical phenomenon that has increased, generating negative effects that are affecting terrestrial ecosystems. In this work, the reader is introduced to the foundations and basic physical processes involved in global warming, providing reliable elements to make better decisions and contribute to the reduction of harmful effects. The didactic sequence proposed, logically leads to the conclusion that our civilization is going through a severe climate crisis, which forces countries and common inhabitants to make a profound reflection on their responsibility in this phenomenon and to use analytical tools to appreciate progress or setbacks in the implementation of strategies at an international level to face the problem.

Keywords: Global warming; climate change physics didactics; greenhouse effect gases.

PACS: 01.40.gb; 92.60.Vb

1. Introducción

Actualmente es inevitable darse cuenta de que existe un cambio climático. Los agricultores de temporal lo han detectado y sufrido desde ya hace algunas décadas [1,2]. Los habitantes de las costas e islas han dado cuenta de los múltiples destrozos provocados por las tormentas y huracanes que han ido aumentando en cantidad e intensidad [3,4]. En las grandes ciudades, los costos por mantener un habitat confortable se ha ido incrementando, volviéndose muy costoso. Las diferentes especies animales también sienten los cambios en grado tal que queda en juego su viabilidad. En fin en todos los sectores ha impactado este cambio climático, el cual es el resultado del aumento de la temperatura media de la tropósfera. En la actualidad dicho aumento, es causado principalmente por la actividad humana que ha incrementado en forma sustancial la cantidad de gases que generan un efecto invernadero intenso en nuestro planeta [5]. Esta situación ha venido preocupando a la sociedad en general y actualmente la organización de las Naciones Unidas, a través del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) se ha abocado a intentar revertir o al menos mitigar esta situación, siendo su esfuerzo hasta ahora insuficiente de acuerdo a las observaciones y mediciones realizadas [6, 16]. Así el deshielo polar, el aumento de la frecuencia de las ondas de calor, la extinción de animales, contaminación, el incremento en los niveles de CO₂, entre otras, son evidencias de que tenemos que emprender acciones adicionales para evitar el deterioro apresurado del

planeta. Cabe mencionar que a pesar de todos estos hechos, aún existen en la sociedad personas que consideran que los cambios son pasajeros, aleatorios o inexistentes y que aún en el caso de que existieran, la naturaleza se encargará de estabilizarlos, manteniéndose el clima, con variaciones menores. Este tipo de escepticismo derivado de la falta de conocimiento científico del fenómeno, ha sido la principal causa de que las acciones emprendidas hasta ahora no sean suficientes. En este trabajo se proporciona, desde una perspectiva didáctica, información veraz y útil, respaldada por argumentos científicos surgidos de la física contemporánea, con los cuales el lector pueda apoyarse para la correcta toma de decisiones.

Para cumplir con este objetivo, el trabajo se dividió de la siguiente manera: en la Sec. 2, se muestran los fundamentos de la física del calentamiento global, incluyendo elementos empíricos que validan los efectos observados, como la radiación de cuerpo negro de Planck y la absorción de la radiación infrarroja por las moléculas del dióxido de carbono. Estos conceptos muestran cómo el aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero, refuerzan el fenómeno y generan el calentamiento global antropogénico. En la Sec. 3, se presentan las mediciones realizadas inicialmente por Charles D. Keeling [7] donde se observa la evolución de CO₂ en el tiempo y se analizan tres posibles escenarios para las próximas décadas. En la Sec. 4, se consideran algunas proyecciones de la temperatura global bajo diversos escenarios de reducción de emisiones. En este punto se enfatiza al

lector la necesidad de emplear y desarrollar constantemente herramientas analíticas para dar seguimiento a las mismas. En la quinta y última sección, se presentan las consideraciones finales y reflexiones de carácter didáctico, que incluyen la discusión de los argumentos esgrimidos por aquellos que niegan o minimizan la crisis actual.

2. La física del calentamiento global

El calentamiento global es una consecuencia directa del efecto invernadero (EI) (Fig. 1). El proceso natural que lo conforma contiene cuatro factores, la radiación recibida desde el Sol sobre la corteza terrestre, la temperatura promedio de la superficie del globo terráqueo, la radiación infrarroja generada por ella y la retención de la misma por los gases que generan este fenómeno (GEI). Cabe señalar que debido a la geografía de la Tierra y a parámetros como la inclinación del eje de rotación (aproximadamente 23°) y su órbita alrededor del Sol, la temperatura de la superficie terrestre varía constantemente; es por esto, que se considera una temperatura promedio que oscila entre los 14 y 15° Celsius. La temperatura ambiente, también varía de acuerdo a la ubicación en la que es medida. Por conveniencia numérica, el valor medio asignado a este parámetro referente a un sitio cálido es de 26.85°C (300 K). Este valor es resultado de un efecto invernadero natural que hace posible la vida como la conocemos. En ausencia de los GEI, la mayor parte de la radiación infrarroja escaparía y reduciría aproximadamente la temperatura ambiente a -18° Celsius, un valor inapropiado para la vida actual [4,5]. De la totalidad de la radiación emitida por el Sol que llega a nuestra atmósfera, parte es reflejada, parte es absorbida y parte llega a la superficie de la tierra interactuando con ella, produciéndose un aumento de su temperatura. Debido a ello, la superficie terrestre radia en el rango del infrarrojo. La radiación que no logra abandonar la atmósfera debido al vapor de agua existente y a los GEI, provoca al ser

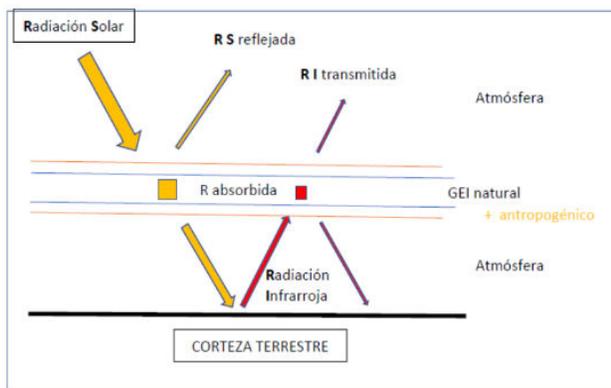


FIGURA 1. Efecto invernadero, donde el 48 por ciento de la radiación solar llega a la superficie terrestre, 31 por ciento es reflejada al espacio exterior y el 21 por ciento es absorbida por la atmósfera [18].

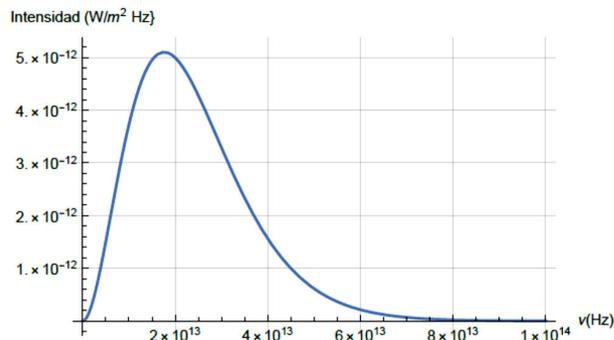


FIGURA 2. Densidad espectral correspondiente a un cuerpo negro con temperatura de 300 K. Lo mayor parte de la radiación se encuentra en la región del infrarrojo.

reflejada el aumento de temperatura de la superficie terrestre y de los océanos (Fig. 1).

Planck demostró que cualquier objeto a una temperatura dada, emite radiación equivalente a la de un cuerpo negro con la misma temperatura T y la ecuación que determina la distribución de esta radiación emitida se puede representar por (Fig. 2):

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/KT} - 1} \quad (1)$$

donde h es la constante de Planck, ν es la frecuencia de la radiación y K es la constante de Boltzmann. De la Fig. 2 se puede observar que el valor máximo de la curva depende del valor $h\nu/KT$, el cual al considerar una temperatura del orden de 300 K, nos arroja un valor para la frecuencia que está dentro del intervalo del infrarrojo. Esto nos indica que la superficie de la Tierra y del océano por estar a una temperatura T , emiten principalmente radiación infrarroja al espacio (la atmósfera), con una intensidad determinada por la Ec. (1).

Desde el punto de vista termodinámico, este calentamiento natural es resultado de una transferencia de calor por radiación desde el Sol a la Tierra. Al interactuar con la superficie terrestre incluyendo los océanos, genera un aumento de la energía cinética de los átomos y moléculas, produciendo conducción de calor a sus alrededores. En el caso de los fluidos este aumento de temperatura propicia también la transferencia de calor por convección, ya que al aumentar la temperatura del aire cercano a la superficie terrestre, éste aumenta su volumen y por tanto disminuye su densidad, de modo que al ser más ligero que el aire frío provoca un ciclo de flujo de calor por convección.

Para comprender mejor el fenómeno físico por cual la radiación infrarroja es retenida por el CO₂, nos apoyaremos en los siguientes conceptos físicos:

La radiación electromagnética satisface la relación dada por:

$$\lambda\nu = c \quad (2)$$

donde λ es la longitud de onda, ν es la frecuencia de la onda electromagnética y c es la velocidad de la luz.

Dado que el número de onda k (magnitud de frecuencia que indica el número de veces que vibra una onda en una unidad de distancia), cuyas unidades en el sistema cgs es cm⁻¹,

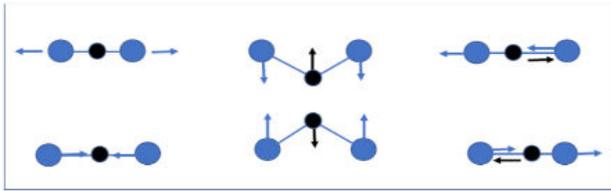


FIGURA 3. El CO_2 no conforma una molécula dipolar en su estado base, sin embargo algunos modos de vibración producen una estructura como un dipolo molecular. En esta circunstancia el dióxido de carbono absorbe fuertemente la radiación infrarroja.

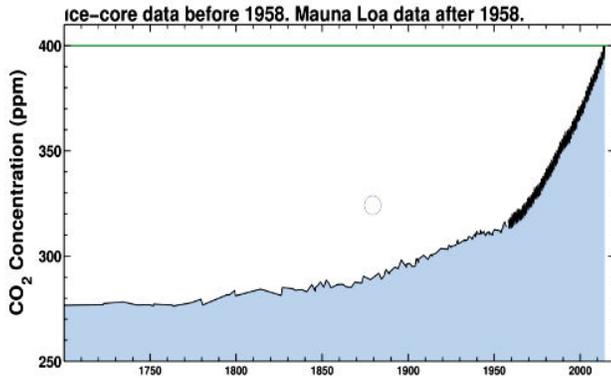


FIGURA 4. Curva de Keeling a partir de la revolución industrial. La imagen ha sido generada en el marco del programa Scripps CO_2 , ver Refs. [8-10].

satisface la relación $k = 2\pi/\lambda$, de la Ec. (2) se puede expresar la frecuencia de cualquier radiación electromagnética, en términos del número de onda por medio de la expresión:

$$\nu = \frac{ck}{2\pi} \quad (3)$$

En la Fig. 2 se observa que k corresponde a la radiación infrarroja, cuya longitud de onda está en el intervalo de 750 nm [400 THz] a 1 mm [300 GHz], es decir, se encuentra en la región de [62.8 - 83775.8] cm^{-1} .

Finalmente, se tiene que el vapor de agua y los GEI, dentro de los que se encuentran principalmente el metano (CH_4), el ozono (O_3) y el dióxido de carbono (CO_2), interactúan con una fracción de la radiación infrarroja emitida al espacio. Es importante mencionar que el principal componente de los GEI es el CO_2 . La radiación es absorbida por él y se lleva a cabo debido a que esta molécula cambia de estado cuántico de tres maneras diferentes (ver Fig. 3), impidiendo que una importante proporción de la radiación salga al espacio, emitiéndola después en todas direcciones incluida la superficie de la Tierra e incrementando la temperatura de ésta.

3. La curva de Keeling

El equilibrio termodinámico está regulado naturalmente por los gradientes de temperatura, los movimientos de rotación y traslación de la Tierra alrededor de su eje y del Sol respectivamente. Este equilibrio, se ha ido modificando de manera

CUADRO I. Partes por millón (ppm) de GEI y su permanencia en la atmósfera. En el caso del N_2O la cifra está dada en partes por billón.

Gas	Concentración ppm	Permanencia Años
CO_2	373	50-200
CH_4	1.77	12
N_2O	316 ppb	120

acelerada debido a la actividad humana (cambio antropogénico), ya que en su proceder ha modificado dicho equilibrio al deforestar miles de hectáreas de bosques y praderas, al invadir muchas otras con asentamientos urbanos, al contaminar el agua y la atmósfera con diversos tipos de químicos y al uso indiscriminado de combustibles fósiles. Estas actividades han incrementado principalmente la producción de CO_2 en cantidad alarmante y generando un efecto invernadero significativo [9] (Fig. 1).

Es importante considerar que los GEI permanecen en la atmósfera terrestre durante un largo periodo de tiempo. De acuerdo a la literatura especializada en el caso del CO_2 estos tiempos pueden variar entre 50 y 200 años (Cuadro I) [5].

Charles David Keeling (1928 - 2005), de la Universidad de California en San Diego, basado en las mediciones tomadas en el observatorio Mauna Loa en Hawái, elaboró por primera vez una gráfica que muestra los cambios en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera desde la década de los 50's. Esta gráfica es una evidencia incontrovertible de los incrementos en los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera (Figs. 4 y 5). Keeling encontró que este incremento tiene una correlación con los combustibles fósiles utilizados en la actividad humana e industrial [10].

En la curva de Keeling mostrada (Fig. 4), los valores anteriores a 1958 fueron extraídos de las concentraciones del bióxido de carbono encontradas en el hielo de los glaciares del polo sur [11].

En la Fig. 6, se presentan algunos escenarios que muestran las concentraciones de CO_2 en un futuro próximo dependiendo del comportamiento humano. Examinando la gráfica de abajo hacia arriba tenemos: la curva azul indica cual sería el comportamiento de los niveles de CO_2 de seguir los acuerdos de París [12]. La segunda curva (café) y la tercera (gris) representan situaciones intermedias con mayor o menor riesgo para la vida aunque en ambos casos las zonas habitables se restringirían y se requeriría de cambios importantes de hábitos para la población en general. Adicionalmente la fauna marina y terrestre sufriría cambios de alto riesgo, debido a fenómenos tales como las ondas de calor [13]. Finalmente la curva roja nos muestra la proyección del aumento del dióxido de carbono si se mantiene el ritmo actual, generándose un escenario catastrófico que haría inviable la civilización.

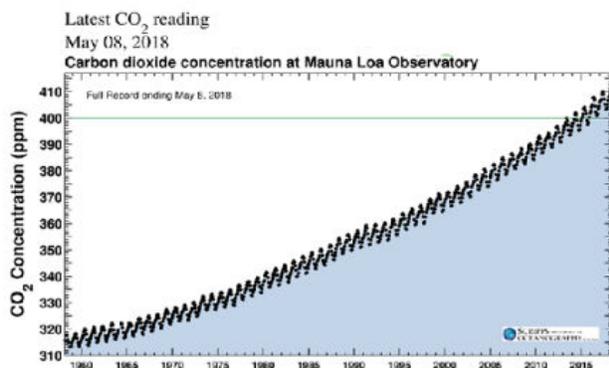


FIGURA 5. Aumento del CO₂ desde 1960. La imagen ha sido generada en el marco del programa Scripps CO₂, ver Ref. [8-10].

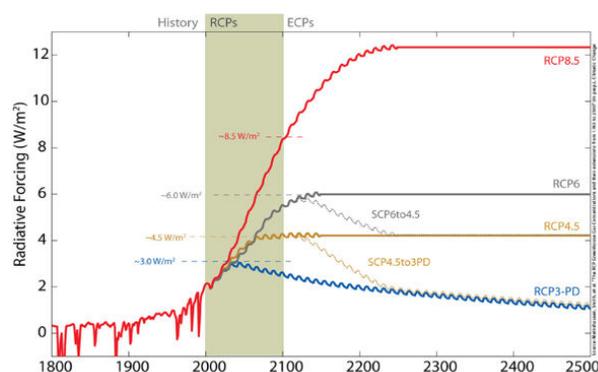


FIGURA 6. Escenarios posibles en función de las acciones que la humanidad y la producción de CO₂ que genera la curva azul indica la situación en la que se siguen los acuerdos de París².

4. Proyecciones de la temperatura global bajo distintos escenarios

Para referirnos a distintos escenarios que muestran los incrementos en la temperatura global como consecuencia de la retención de la radiación infrarroja, el IPCC define una importante medida que corresponde a la diferencia entre la luz solar que llega a la Tierra y la que se refleja al espacio respecto a los niveles existentes en 1750. Esta medida tiene un valor asignado en unidades de W/m² y es llamada forzamiento radiativo, $F = \Delta F$ cuyas siglas corresponden a las iniciales de Representative Concentration Pathways (RCPs). Ahora bien, este número se utiliza para determinar el cambio de temperatura global calculado para el final del siglo XXI, considerando una relación simplificada obtenida a partir de la termodinámica irreversible [16], la cual está dada por:

$$\Delta T = \lambda F \tag{4}$$

donde λ es una constante denominada parámetro de susceptibilidad climática que tiene un valor aproximado de 0.8 K/(W/m²). En la Fig. 6 se presentan cuatro curvas con diferen-

CUADRO II. Incrementos de temperatura global para diferentes valores de RCPs.

RCP (W/m ²)	ΔT (K)
2.6	2.08
4.5	3.60
6.0	4.80
8.5	6.80

tes “RCPs” correspondientes a cuatro posibles escenarios, dependientes del calentamiento global antropogénico. En este contexto, los incrementos en la temperatura global se muestran en el Cuadro II.

Se puede observar, que de seguir la tendencia actual (curva roja), el incremento anual de la temperatura global sería significativamente grande, lo que provocaría muchas catástrofes, comenzando por el deshielo acelerado polar y sus consecuencias ecológicas. En este trabajo se ha realizado una recopilación lógica de los elementos básicos que intervienen en el calentamiento global, proporcionando los conceptos físicos necesarios para argumentar las mediciones hechas y sus proyecciones a mediano y largo plazo. Los autores creemos que este análisis puede ser de utilidad para las generaciones actuales, de manera que en un solo documento se tengan agrupados estos elementos, enfatizándose los conceptos de física indispensables para entender con fundamentos científicos la gravedad del fenómeno.

5. Consideraciones finales

Después de haber presentado los elementos que sustentan la física del calentamiento global, se puede concluir que:

1. Las temperaturas de la superficie de la Tierra y su tropósfera se han estado incrementando a partir de la revolución industrial, debido principalmente al aumento de los GEI emitidos y la continua deforestación vinculada con la actividad humana.
2. Los efectos de este calentamiento se ven reflejados en un cambio climático que impacta de diferentes maneras en distintos lugares del planeta. Entre estos efectos se destacan: la frecuencia e intensidad de las ondas de calor, el aumento en las intensidades de los huracanes, el impacto en diversos ecosistemas, el deshielo de los casquetes polares y el consecuente aumento del nivel del mar, entre otros.
3. Los puntos anteriores corresponden a focos rojos para la viabilidad de la vida humana en un futuro no muy lejano, por lo que es imperativo hacer conciencia de este riesgo y tomar las medidas necesarias que mitiguen este aumento de temperatura o bien, que lo reviertan de

manera que los niveles de gases de efecto invernadero retomen los valores previos a la revolución industrial [15].

4. Es importante señalar que la tarea es monumental, ya que además de la magnitud del problema, prevalecen sectores principalmente políticos que niegan la problemática actual, argumentando que el cambio climático es fruto de variaciones estadísticas normales e inevitables [14].
5. Se debe enfatizar que los efectos dañinos de la actividad humana sobre la temperatura global del planeta superan ya los mecanismos naturales de regularización del clima y purificación del aire, generándose una situación que debe ser atendida inmediatamente en un esfuerzo global, coordinado y sustentado científicamente. En la actualidad, los esfuerzos en esta dirección son insuficientes.

De acuerdo a la más reciente encuesta realizada por la Universidad de Yale sobre el cambio climático, el 43 por ciento de los ciudadanos de Estados Unidos no considera que el calentamiento global es causado fundamentalmente por actividades humanas, y más de la mitad ignora el consenso científico referente al mismo [20]. El presente trabajo corresponde a una propuesta didáctica pertinente para un tema tan importante como el calentamiento global, sustentada en bases físicas expuestas de manera secuenciada y simple, para que sea de fácil acceso a los lectores.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dra. Alma Rocío Sagaceta Mejía por sus comentarios y su apoyo en la versión final de este trabajo.

i. Disponible públicamente en la dirección electrónica <http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/>

1. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, *El estado mundial de la agricultura y la alimentación: Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria*. FAO, República Unida de Tanzania (2016). www.fao.org/3/a-i6030s.pdf
2. Gerald C. Nelson *et al.*, *Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación*. IFPRI, Washington, D.C. (2009). http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/costo.pdf
3. I. Lin, Gustavo J. Goni, John A. Knaff, Cristina Forbes and M.M. Ali, *Ocean heat content for tropical cyclone intensity forecasting and its impact on storm surge*, *Natural Hazards*, Volume 66 (2013) Issue 3, pp. 1481-1500. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-012-0214-5>
4. Michael Hopkin, *Warming seas cause stronger hurricanes*, *Nature News* (16 de marzo de 2006), <http://www.nature.com/news/2006/060313/full/news060313-12.html>
5. Raymond T. Pierrehumbert, *Infrared Radiation Planetary Temperature*, *Physics Today*, Vol. 64, pp 33-38, (2011). <https://geosci.uchicago.edu/~rtp1/papers/PhysTodayRT2011.pdf>
6. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell Raymond T. Pierrehumbert (Eds), *The Science of Climate Change*, Cambridge University Press (1995). <https://geosci.uchicago.edu/~rtp1/papers/PhysTodayRT2011.pdf> (2011)
7. Keeling, Charles D. *The Influence of Mauna Loa Observatory on the Development of Atmospheric CO2 Research*. In *Mauna Loa Observatory: A 20th Anniversary Report*. (National Oceanic and Atmospheric Administration Special Report, September 1978), edited by John Miller, pp. 36-54. Boulder, CO: NOAA Environmental Research Laboratories.
8. SCRIPPS Institution of Oceanography, (2000). <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>
9. Citation: MacFarling Meure, C., D. Etheridge, C. Trudinger, P. Steele, R. Langenfelds, T. van Ommen, A. Smith, and J. Elkins. 2006. The Law Dome CO2, CH4 and N2O Ice Core Records Extended to 2000 years BP. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, No. 14, L14810 10.1029/2006GL026152.
10. C. D. Keeling, S. C. Piper, R. B. Bacastow, M. Wahlen, T. P. Whorf, M. Heimann, and H. A. Meijer, *Exchanges of atmospheric CO2 and 13CO2 with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects*, SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, 88 pages, 2001. <http://escholarship.org/uc/item/09v319r9>
11. D.M. Etheridge, L.P. Steele, R.L. Langenfelds, R.J. Francey, J.-M. Barnola and V.I. Morgan. *Historical CO2 records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores*. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center*, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. (1998). <https://www.co2.earth/co2-ice-core-data>
12. Una descripción del contenido de los acuerdos de París, puede encontrarse en la siguiente dirección electrónica: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement>
13. Camilo Mora et al, *Global risk of deadly heat*. *Nature Climate Change*, volume 7, pages 501-506 (2017), (1970).
14. *EPA Chief Pruitt Refuses to Link CO2 and Global Warming*. *Scientific American News*, 10/03/2017. <https://www.scientificamerican.com/article/epa-chief-pruitt-refuses-to-link-co2-and-global-warming/>
15. Christiana Figueres *et al.* *Three years to safeguard our climate: six-point plan for turning the tide of the world's carbon dioxide by 2020*. *Nature Comment* 593, Vol 546, 29 June (2017).

16. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
17. Hartmann Dennis L, Global Physical Climatology. Elsevier Science. capítulos 1-4, 10, 12 y 13. 498 pp. 2nd edition (2016).
18. Una descripción detallada del balance radiativo, puede encontrarse en la siguiente dirección electrónica: https://people.ucsc.edu/mdmccar/migrated/ocea80b/public/lectures/lect_notes_1/03_Energy_Balance_MDM_11F.pdf
19. IPCC Third Assessment Report - Climate Change 2001. Archivado del original el 30 de junio 2009. https://web.archive.org/web/20090630133202/http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar
20. Los resultados de esta encuesta se encuentran disponibles en la dirección electrónica <http://climatecommunication.yale.edu/visualizations-data/ycom-us-2018>