Svante Arrhenius
Los albores del cambio climático

Josep Enric Llebot
Universidad Autónoma de Barcelona
Miembro del Instituto de Estudios Catalanes

Svante Arrhenius (1859-1927), físico sueco que llegó a ser rector de la Universidad de Estocolmo y director del Instituto Nobel. Desarrolló la teoría química de la ionización de los electrolitos, trabajo por el que obtuvo el premio Nobel en 1903. En 1895 presentó una comunicación en la que sugería que si se reducía o incrementaba la concentración de un constituyente menor de la atmósfera, el dióxido de carbono, en un cuarenta por ciento se podían originar retroacciones que provocasen el avance o el retroceso de los neveros. Por este motivo, se le puede considerar pionero del posible origen antrópico del cambio climático actual.

"La Tierra recibe los rayos del Sol, que penetran su masa y se convierten en calor no luminoso. La Tierra posee el calor interno con que fue creada, que continuamente se disipa en la superficie y, finalmente, la Tierra recibe los rayos de luz y de calor de incontables estrellas, entre las cuales se encuentra el sistema solar. Éstas son las tres causas generales que determinan la temperatura de la Tierra."[1] *Joseph Fourier (1824)*

Podemos pensar que el cambio climático es un concepto nuevo, generado y utilizado para designar una serie de fenómenos que se dan desde no hace más de quince años y, probablemente, acertaremos. La climatología, como ciencia, no se ha tenido en cuenta hasta hace muy poco, cuando se constató, por un lado, el profundo desconocimiento que se tenía de los mecanismos importantes que caracterizan el sistema climático; por otro lado, se ha constatado la necesidad de disponer de una buena capacidad predictiva, también en lo que se refiere al clima.

Hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XX no se empezó a prestar atención al clima y al trabajo de los climatólogos. La climatología era considerada una rama menor de la meteorología que se dedicaba simplemente a la compilación de datos. Un climatólogo era una persona que describía el clima, habitualmente a nivel del suelo, y se le valoraba en razón de los datos útiles que aportaba para la agricultura y para la construcción de infraestructuras. Para estas tareas, se pensaba que bastaba con reunir y tratar grandes cantidades de datos y extensos análisis estadísticos sobre el tiempo meteorológico. Se creía que el comportamiento del clima en el pasado cercano era una guía adecuada para el tiempo del futuro. Así pues, hasta la década de 1950, el clima no era más que una adición del comportamiento del tiempo meteorológico diario y hay que tener en cuenta que, por aquel entonces, el estudio del tiempo meteorológico se encontraba en un estado embrionario. En este contexto, eran pocos los que sabían de los trabajos de Arrhenius, el primer científico que realizó el cálculo de lo que pasará en la atmósfera cuando ésta tenga el doble de dióxido de carbono de la cantidad existente al principio de la era industrial. En este artículo se pretende realizar una pequeña aproximación a la generación de los conceptos de efecto invernadero y de cambio climático, atribuidos al físico francés Joseph Fourier y al químico físico sueco Svante Arrhenius respectivamente, tanto desde el punto de vista estrictamente científico como desde un enfoque social.

Carnot y Fourier: los inicios

Podríamos decir que, simbólicamente, por lo que se refiere al cambio climático, la historia empieza en 1824. En aquel año, el ingeniero francés Sadi Carnot [2] publicó su trabajo *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propes à développer cette puissance*. El siglo XIX sería el siglo del desarrollo de los conceptos fundamentales de la termodinámica y el trabajo de Carnot fue uno de los puntos clave, que rompió con el newtoniano de la mecánica clásica. Sadi Carnot afirmaba en 1824: "Es al calor a lo que hay que atribuir los grandes movimientos que caracterizan la Tierra; a él se deben las agitaciones de la atmósfera, el ascenso de las nubes, las lluvias y otros meteoros, las corrientes de agua por la superficie del globo, de las que el hombre utiliza una pequeña parte; incluso los temblores de tierra y las erupciones volcánicas se deben al calor".

Sin embargo, aunque conceptualmente Sadi Carnot es muy importante no solo para la física sino también para lo que hoy denominaríamos ciencias ambientales, ya que sus estudios conducen al reconocimiento de los límites del aprovechamiento de los recursos energéticos, su referencia al funcionamiento de la Tierra no fue mucho más lejos. En el mismo año, 1824, fue el físico Jean Baptiste Joseph Fourier, conocido por la ley de Fourier de conducción del calor y por el desarrollo de las series de Fourier, útil herramienta matemática para el análisis de funciones, quien proporcionó una visión pionera en cuanto al papel energético de la atmósfera.

Fourier era un hombre con intereses diversos y amplias facultades. Además de ser miembro perpetuo de la Academia Francesa de las Ciencias, amigo de Napoleón y barón, fue también profesor de matemáticas, policía, gobernador de Egipto y egiptólogo. Se le conoce sobre todo por su obra Théorie analytique de la chaleur (1822), pero es en el artículo[3] *Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires* –publicado como resumen de una intervención ante la Academia Francesa de las Ciencias y fundamentado en trabajos previos realizados y publicados entre 1807 y 1809 sobre el calentamiento del planeta y el movimiento periódico del sistema solar– donde resume sus consideraciones sobre lo que hoy denominamos efecto invernadero. El afán de Fourier, como el de Carnot, era reconocer los fenómenos generales. Por lo tanto, extraía abstracciones de las causas secundarias y de los detalles numéricos para alcanzar una visión del funcionamiento térmico de la Tierra, en parte también porque no podía hacer otra cosa, pues, como todos sus contemporáneos y muchos de los que le sucederían, no disponía prácticamente de datos meteorológicos. Fourier escribió sobre el sistema solar: "... está ubicado en una región del universo donde todos los puntos tienen una temperatura común y constante, determinada por los rayos de luz y de calor que envían todos los astros del entorno. La Tierra está así sumergida en la temperatura fría del cielo planetario y, por otro lado, se calienta gracias a los rayos solares, cuya diferente distribución produce la diversidad del clima". También escribió: "la temperatura aumenta por la interposición de la atmósfera, ya que el calor encuentra menos obstáculo al penetrar por el aire cuando es luz que cuando tiene que atravesarla convertido ya en calor oscuro". Asimismo, se atribuye a Fourier la primera advertencia sobre el hecho de que las actividades humanas pueden influir en el clima. Fourier afirmaba: "el establecimiento y el progreso de las sociedades humanas, así como la acción de las fuerzas naturales, pueden cambiar notablemente y en regiones extensas el estado de la superficie del suelo, la distribución de las aguas y los grandes movimientos del agua. Estos efectos son susceptibles de hacer variar, en el transcurso de muchos siglos, el grado de calor medio". No obstante, la idea de que las actividades humanas afectan al comportamiento de la atmósfera ya se documenta en el filósofo Teofrasto, discípulo de Aristóteles, quien sospechó que cambios en los usos de zonas del territorio para aumentar la superficie cultivable, como el drenaje de zonas húmedas o la eliminación de bosques, comportaban cambios en los períodos de frío o de calor de una determinada zona. También David Hume, dos mil años más tarde, sugirió que los cambios climáticos de Europa podían deberse al avance de la superficie cultivable.

Tyndall y las propiedades radiactivas de los gases

Podemos afirmar que los primeros pasos de lo que hoy es el ámbito de la investigación sobre el cambio climático se establecieron durante la segunda mitad del siglo XIX. Tanto el irlandés John Tyndall como el sueco Svante Arrhenius tuvieron amplios intereses científicos y realizaron sus singulares investigaciones climáticas únicamente como parte de sus numerosos campos de investigación. Muy diferente es la situación actual: la investigación es necesariamente muy especializada y existe un gran número de científicos, institutos y organizaciones que se dedican a la investigación sobre el clima.

Como hemos mencionado anteriormente, John Tyndall nació en Irlanda y era ingeniero de formación. Trabajó en las propiedades magnéticas de los cristales, en la transmisión del calor a través de estructuras orgánicas, en las propiedades físicas del hielo y en las propiedades radiactivas de los gases, entre las que estudió especialmente la absorción en la región del infrarrojo próximo y a temperaturas muy diferentes de las que se dan en el ambiente terrestre. Era muy aficionado al excursionismo y, motivado por sus excursiones a los neveros alpinos, en 1854 empezó a interesarse en la geología, especialmente en cuestiones relacionadas con la presión y la pizarra. En 1859, Tyndall inició una serie notable de experimentos sobre las propiedades radiactivas de diversos gases. Determinó y publicó[4] que la absorción de la radiación terrestre por el vapor de agua y por el dióxido de carbono presentes en la atmósfera tiene un papel importante en la explicación de fenómenos meteorológicos como el enfriamiento nocturno, la escarcha y las heladas y, posiblemente, la variación de los climas durante el pasado geológico.

También intentó explicar el color del cielo, trabajando en la polarización y la difusión de la luz por moléculas de aire y polvo. Naturalmente, influyeron en

él las condiciones ambientales, científicas y materiales. La atmósfera cargada de polvo y contaminación del Londres de mediados del siglo XIX ayudó a Tyndall, entonces ya miembro de la Royal Society de Londres, a plantearse y a plantear de una forma brillante, aunque prudente, la idea revolucionaria de que los cambios de la temperatura del planeta asociados a las variaciones de los constituyentes activos de la atmósfera, en lo que respecta a su radiación, podían haber producido algunas de las variaciones climáticas constatadas por los geólogos.

No obstante, la geología, como toda la historia natural, era objeto de apasionadas discusiones. En la época en que Tyndall exploraba con minuciosidad las propiedades radiantes del vapor de agua y del dióxido de carbono, las declaraciones de Louis Agassiz sobre los períodos glaciales de la historia climática de la Tierra produjeron acaloradas discusiones científicas. Todavía tenían que pasar muchos años antes de que el mundo científico y la opinión pública aceptasen la alternancia de períodos cálidos y fríos en el transcurso de la dilatada historia de la Tierra y de las especies que la habitan.

Las propuestas de Tyndall apenas llamaron la atención, ya que nadie podía imaginar en aquellos tiempos que unos constituyentes tan minoritarios en la composición atmosférica como el vapor de agua o el dióxido de carbono pudiesen desestabilizar el equilibrio energético de la atmósfera e inducir la transición de un clima cálido a un clima frío, aunque fuese en miles de años. Otras consideraciones generaron mucho más interés, como las causas astronómicas formuladas bastantes años después por Milutin Milankovitch. Hoy en día, la paleoclimatología es un componente interdisciplinario imprescindible para la comprensión del clima y se podría afirmar que Tyndall fue uno de sus iniciadores.

Svante Arrhenius y el cambio climático

Hasta hace poco, Svante Arrhenius era conocido tan solo por sus contribuciones en el campo de la electroquímica, por las que obtuvo el premio Nobel de Química en 1903. Arrhenius nació en Uppsala (Suecia), en 1859, justamente cuando John Tyndall realizaba los experimentos sobre la absorción de la radiación por parte de algunos gases atmosféricos. Fue el segundo hijo de una familia vinculada por el trabajo del padre a la universidad de Uppsala, fundada en 1477 y desde entonces motor cultural de la ciudad y del país. Como era común en aquella época, el pequeño Arrhenius estudió hasta los ocho años en casa con un tutor y, hasta su ingreso en la universidad, asistió a la escuela de la catedral de la ciudad. Ya en la universidad, inició estudios de física, química, latín, historia, geología y botánica. Completó su primer título en física y empezó a preparar lo que entonces se conocía como licenciatura en filosofía. A pesar de la historia y el prestigio de la universidad de Uppsala, cuando Arrhenius acababa sus estudios, el departamento de Física atravesaba un período difícil, con importantes problemas que incluso habían llegado a ser de dominio público. Esto impulsó a Arrhenius a marcharse a Estocolmo, donde trabajó en el Instituto de Física de la Academia Sueca de Ciencias con Erik Edlund, un profesor de física interesado en la meteorología.

En Estocolmo, Arrhenius también estudió química con Otto Petterson y utilizó sus conocimientos de física en el análisis de problemas de electroquímica, lo que culminó en la redacción de una tesis sobre la teoría química de los electrólitos, publicada en 1884. La comisión de evaluación no se mostró muy sensible a las aportaciones del trabajo teórico de Arrhenius y no lo valoró con la máxima calificación. Este trabajo fue la base por la que, posteriormente, Arrhenius recibiría el premio Nobel juntamente con otros dos electroquímicos: Wilhem Ostwald y Jacobus H. van't Hoff. Al igual que los profesores que evaluaron su tesis doctoral, los profesores de química de la universidad de Estocolmo no sabían apreciar el trabajo de Arrhenius, que decidió cambiarse al politécnico de Riga para trabajar con Wilhem Ostwald. La colaboración con Ostwald y una valiosa ayuda de la Academia de Ciencias le permitieron visitar numerosos laboratorios europeos y trabajar con prestigiosos científicos de la época, como Ludwig Boltzmann, en Graz, Friedrich Kohlrausch, en Wurzburgo, y Jacobus H. van't Hoff, en Amsterdam. Estos contactos sirvieron al inquieto e imaginativo Arrhenius para completar su teoría sobre la disociación electrolítica, lo cual propició que, después de un largo período posdoctoral de seis años, Arrhenius obtuviese su primer puesto estable como profesor de física en la Escuela Superior de Estocolmo.

Además de estabilidad, este puesto le permitió disponer de un laboratorio en el que pudo completar su trabajo de electroquímica. Fundó, entonces, la Sociedad de Física de Estocolmo, de la que fue el primer secretario. Esta sociedad, de espíritu abierto, reunía a físicos, geólogos, meteorólogos y astrónomos. En 1895, le promocionaron a catedrático de física y fue rector de la Escuela Superior de Estocolmo entre 1896 y 1902. Asimismo, fue elegido miembro de la Academia Sueca de Ciencias en 1901 y, como ya hemos dicho, recibió el premio Nobel en 1903. Durante este período se casó en dos ocasiones y tuvo cuatro hijos: uno de su primer matrimonio con una estudiante y ayudante suya, Sophia Rudbeck, y tres de su matrimonio con Maria Johansson. Fue también el primer director del Instituto Nobel de Física y Química y, al final de su carrera científica, se interesó por problemas teóricos de inmunoquímica y por la divulgación de la ciencia. Reconocido por el mundo científico de la época, entre otras actuaciones significativas, en 1914 pronunció la conferencia Tyndall en la Royal Institution de Gran Bretaña, conferencia que lo vinculó formalmente al otro científico del siglo XIX que inició el conocimiento de las propiedades radiantes de la atmósfera trascendentes para el fenómeno del cambio climático. Arrhenius falleció en octubre de 1927 en Estocolmo, tras haber sufrido un infarto a los sesenta y seis años, a raíz del cual disminuyeron sus facultades hasta tener que abandonar sus responsabilidades al frente del Instituto Nobel, medio año antes de su muerte.

Cabe destacar el papel de la Sociedad de Física de Estocolmo en la estimulación del interés de Arrhenius por la física de la Tierra, del mar y de la atmósfera. El contacto científico con geólogos, meteorólogos y oceanógrafos despertó en Arrhenius el interés por algunos problemas planteados en el ámbito de estas ciencias. Su formación en física y química le permitió introducirse fácilmente en el análisis teórico de fenómenos eléctricos de la atmósfera, como el estudio de los rayos y de las influencias del Sol y de la Luna en el estado eléctrico de la atmósfera, o en el desarrollo de una teoría sobre la formación del sistema solar. No se interesó mucho por la parte experimental y de observación, sino que su trabajo fue mayoritariamente teórico y consistía en aplicar sus conocimientos a observaciones y medidas, muy limitadas entonces, realizadas por otros.

En 1895, Arrhenius presentó en la Sociedad de Física de Estocolmo una comunicación, hoy considerada pionera, donde sugería que una reducción o un incremento del 40% en la concentración de un componente menor de la atmósfera, el dióxido de carbono, podía provocar retroacciones que podían explicar el avance o el retroceso de los neveros. En su investigación, Arrhenius desarrolló un modelo de equilibrio de energía que consideraba los efectos radiactivos del dióxido de carbono y del vapor de agua a temperatura ambiente y estudiaba las respuestas de este modelo a cambios en las concentraciones de CO_2. Su trabajo se publicó el año siguiente [5] y, naturalmente, heredaba los resultados recientes de Josef Stefan sobre la ley de emisión de radiación en función de la cuarta potencia de la temperatura, de Léon Teisserenc de Bort sobre la estimación del albedo de las nubes en diferentes latitudes, de Knut Ansgström sobre los valores de los coeficientes de absorción del dióxido de carbono y del vapor de agua, y de Alexander Buchan sobre las medias de temperaturas en todo el planeta. El modelo formulado y elaborado por Arrhenius era bastante simple y realizaba estimaciones sobre la reflexión de la radiación por la superficie terrestre y las nubes o las retroacciones producidas por la capa de nieve que, teniendo en cuenta los conocimientos actuales, hoy consideraríamos rudimentarias o simplemente erróneas. Arrhenius llegó a la conclusión de que las variaciones del contenido de dióxido de carbono y de vapor de agua de la atmósfera pueden tener una gran influencia en el equilibrio de calor del sistema climático. Llegó a esta conclusión después de realizar cálculos a mano que incluían entre 10.000 y 100.000 operaciones (entonces no existía ningún soporte mecánico de cálculo) en lo que hoy denominaríamos diferentes escenarios de contenido de dióxido de carbono de la atmósfera (considerando que el CO_2 que había entonces era 1, lo calculó para situaciones en las que el CO_2 fuese 0,67; 1,5; 2,0; 2,5; y 3,0). Realizó los cálculos para las cuatro estaciones del año y discriminando por la latitud. A partir de sus cálculos, Arrhenius concluyó de forma general: "... si la cantidad de carbónico aumenta en progresión geométrica, la temperatura variará en progresión aritmética". Asimismo, Arrhenius dedujo que la variación de la temperatura será mayor cuanto mayor sea la cantidad de dióxido de carbono y cuanto más alta sea la latitud, y que será mayor en invierno que en verano. En general, Arrhenius predijo un ascenso de la temperatura al duplicarse el contenido de CO_2 atmosférico de 5 a 6 grados.

Sorprende el hecho de que las predicciones de Arrhenius sean tan similares, desde el punto de vista cuantitativo, a los resultados actuales obtenidos mediante

sofisticados modelos de circulación general. Probablemente, en esta similitud estriba también la consideración general del físico sueco como el iniciador de la temática del posible origen antrópico del cambio climático actual. No obstante, es importante señalar que Arrhenius, en su trabajo, inicialmente miraba hacia el pasado, ya que lo que pretendía era hallar la causa de la evolución de los ciclos climáticos glaciales del pasado, con el cálculo de la probabilidad de grandes variaciones en el contenido del dióxido de carbono en tiempos geológicos relativamente cortos.

Llegó a estos resultados gracias a los estudios de su amigo y colega, el geólogo Arvid Gustaf Högbom, quien investigó lo que hoy denominaríamos el ciclo del carbono. Högbom sostenía, en contra de la idea más generalizada de la época, que durante la historia geológica de la Tierra se han producido grandes variaciones en las fuentes y los procesos de desaparición del carbono que han conducido a cambios sustanciales en el contenido atmosférico de dióxido de carbono. En sus trabajos sobre el ciclo del carbono, Högbom utilizaba muchos componentes plenamente vigentes hoy, como el papel regulador de los océanos y la actividad volcánica, a la que Högbom concedía el protagonismo, como principal fuente de CO_2 de la atmósfera. Sin embargo, desde la perspectiva del geólogo sueco, ni quemar combustibles fósiles ni eliminar bosques influía en el contenido atmosférico de carbono, ya que la formación de sedimentos y de carbonatos o la descomposición de los silicatos eran procesos geológicos naturales a los que él otorgaba mucha más importancia desde un punto de vista cuantitativo. Högbom calculó que el CO_2 atmosférico es del orden de magnitud de todo el carbono fijado en el mundo orgánico y, comparándolo con el carbono emitido a la atmósfera a causa del uso del carbón, vio que este último representaba una proporción muy pequeña (inferior al uno por mil). El trabajo de Arrhenius de 1896 fue una importante aportación a la cuantificación de estos efectos, a pesar de que más tarde cuestionaría las causas. Efectivamente, el modelo de Arrhenius permitió el cálculo del aumento de la temperatura en el Ártico o entre los paralelos 40 y 50, y mostró que las variaciones del contenido de CO_2 atmosférico podían dar cuenta de las eras glaciales e interglaciales.

La perspectiva histórica permite enmarcar el trabajo de Arrhenius tomando como referencia la situación actual de los conocimientos sobre el cambio climático. Una de sus contribuciones más importantes fue la elaboración de un modelo cuantificado a partir de datos obtenidos por observación, en contraste con los análisis más frecuentes entonces, de cariz cuantitativo. Sin embargo, la información de la que disponía Arrhenius no era de gran calidad. Por ejemplo, la idea de que las erupciones volcánicas eran la principal fuente del carbónico atmosférico era simplista y estaba relacionada con los conocimientos geológicos de la época. La información espectroscópica de que se disponía entonces era muy primitiva: no se tenía información completa sobre la absorción de la radiación infrarroja, especialmente en la banda con longitudes de onda superiores a 9,5 micrómetros[6], muy importante tanto para el dióxido de carbono como para el vapor de agua, y la mayoría de los datos se referían a medidas de la presión atmosférica, presión que si bien se da en la superficie terrestre no es la presión que hay en las capas medias y altas de la troposfera. La imprecisión de la información espectroscópica fue una de las principales críticas que recibió el trabajo de Arrhenius en dos aspectos. Por un lado, el efecto del vapor de agua, que es mucho más abundante que el CO_2, y que absorbe toda la radiación infrarroja en una banda espectral que, según los datos de que se disponían entonces, coincidía con una banda de absorción del gas carbónico. Por lo tanto, al duplicarse el contenido de dióxido de carbono, aumenta la capacidad de absorber radiación, pero no la absorción real[7]. Por otro lado, la saturación: si una determinada cantidad de CO_2 absorbe una cantidad de radiación, aunque dupliquemos la cantidad de gas carbónico, no se duplica necesariamente la radiación absorbida, puesto que hay un momento en el que ya se ha absorbido toda la radiación que se puede absorber.

A principios del siglo XX, Arrhenius siguió trabajando en su teoría del clima. Consciente de la fragilidad de sus datos espectroscópicos, continuó estudiando el ciclo del carbono y la absorción de la radiación de onda corta y de onda larga, llegando a bandas de absorción considerables[8]. Además, publicó sus trabajos de forma poco técnica con el objetivo de que llegasen a un público amplio[9]. Revisó el trabajo de Fourier, Tyndall y otros investigadores, y habló de la teoría del invernadero, refiriéndose a la atmósfera.

Arrhenius utilizaba su modelo para señalar que la temperatura observada de la Tierra es treinta grados superior a la que tendría si se consideran exclusivamente factores geométricos (o, lo que es lo mismo, una Tierra sin atmósfera) y que la causa de esta diferencia radica en el papel de la atmósfera, lo que hoy denominamos efecto invernadero. Con su modelo también demostró que una atmósfera sin dióxido de carbono tendría una temperatura unos veintiún grados inferior. No solo como científico, sino como atento observador de la evolución de la sociedad de su tiempo, Arrhenius se dio cuenta del rápido incremento de las emisiones antrópicas de dióxido de carbono a causa de las actividades industriales y manifestó que era probable que los avances de la industria y de la sociedad desarrollada en general condujesen en el transcurso de pocos siglos a una atmósfera más rica en CO_2 y, por lo tanto, más cálida.

Las investigaciones de Arrhenius, junto con su visión desde la perspectiva de un ciudadano de un país septentrional, con un clima riguroso y frío, y su visión positivista del progreso le llevaron a escribir: "Mediante la influencia de un porcentaje cada vez mayor de ácido carbónico en la atmósfera podemos esperar disfrutar de períodos con un clima mejor y más templado, especialmente en las regiones más frías del planeta, lo cual significará que la tierra producirá cosechas mejores y más abundantes que incidirán en beneficio del género humano"[10]. He aquí, pues, la primera mención moderna de los impactos antrópicos en el cambio del clima.

Epílogo

La visión actual del trabajo de Arrhenius a veces hace sonreír a los investigadores. Probablemente tuvo la suerte que un investigador siempre busca, pero también tenía mucha intuición. La coincidencia de sus predicciones con los resultados de las simulaciones de los grupos más avanzados actuales, a pesar de ser meramente fortuitos, no dejan de sorprender. Tampoco es banal su mención de los impactos, punto en el que actualmente se ha avanzado mucho. La visión optimista de Arrhenius choca con la enorme capacidad de la sociedad moderna de incidir en el ciclo del carbono y de modificar el equilibrio energético de la atmósfera, pero también en este contexto se habla hoy de un desplazamiento de determinados cultivos hacia las latitudes frías. En definitiva, a veces la arrogancia que nos da la tecnología nos hace olvidar y menospreciar el esfuerzo y el trabajo del pasado. Poco más de cien años después de que Arrhenius hablase de cambio climático, hoy intentamos simplemente mejorar, introduciendo matices a todo lo que él hizo.

Referencias

[1] Joseph Fourier. Conferencia pronunciada en la Académie Royale des Sciences en 1824 y publicada en "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires" *Annales de Chimie et de Physique,* 27 136-167, (1824)

[2] Sadi Carnot "Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propes à développer cette puissance" Paris:Bachelier, (1824)

[3] Joseph Fourier "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires" *Annales de Chimie et de Physique,* 27 136-167, (1824)

[4] John Tyndall, "On the absorption and radiation of heat by gases and vapour, and on the physical connection of radiation, absorption and conduction" *Philisophical Magazine*, 22, 167 – 194; 273 – 285, (1861)

[5] Svante Arrhenius "Über den Einfluss des atmosphärischen Kohlensäuregehalts auf die Temperatur der Erdoberfläche" *Bihang* 22 102, (1896); "On the influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground" *Philisophical Magazine* 41 237-76, (1986)

[6] 1 micrómetro = 10-6 metros = 0,000001 metros

[7] Esta crítica al trabajo de Arrhenius aparecía en una prestigiosa publicación de la Sociedad Americana de Meteorología en 1951: C.E.P. Brooks a "Compendium of Meteorology", T.F.Malone ed. , American Meteorological Society, p. 1004, (1951)

[8] Svante Arrhenius, "Lehrbuch der kosmishen Physik", Leipzig, S. Hirzel (1903)

[9] Svante Arrhenius, "Worlds in the Making: The Evolution of the Universe", Harper and brothers, New York, (1908)

[10] Ver nota 9