SALAMANCA, Revista de Estudios, 68, 2024, pp. 139-151
ISSN: 0212-7105

EL CAMBIO CLIMÁTICO COMO MANIFESTACIÓN DEL CAMBIO GLOBAL. SALAMANCA EN EL FUTURO

Climate Change as a Manifestation of Global Change: Salamanca in the Future

José-Abel Flores
Universidad de Salamanca

RESUMEN: La Tierra ha contado con episodios cálidos y fríos atribuibles a la concentración diferencial de carbono en las *geosferas* y de la energía solar. Desde la segunda mitad del siglo XX en el sistema terrestre se ha materializado un Cambio global. Parte de ese proceso es el Cambio climático: gases de efecto invernadero están modificando las temperaturas y afectando a los modelos sobre los que se desarrolla la sociedad. La aplicación de modelos predictivos y escenarios propuestos por el IPCC indican ascenso de la temperatura y descenso de las precipitaciones en las próximas décadas en Salamanca.
PALABRAS CLAVE: Cambio climático; Cambio global; Escenarios climáticos; Proyección climática; Clima en Salamanca.

SUMMARY: In the history of the Earth, cold and warm episodes have been defined related to the differential concentration of carbon in the *geospheres* and solar energy. Since the second half of the 20th century a Global Change occurred in the Earth system. Part of this process is the anthropic Climate Change: greenhouse gases are modifying temperatures and affecting social patterns. The application of predictive models and scenarios proposed by the IPCC indicate an increase in temperature and a decrease in precipitation in the coming decades in Salamanca.
KEY WORDS: Climate Change; Global Change; climate scenarios; climate projection; climate in Salamanca.

Voy a recoger plantas y fósiles, y realizar observaciones astronómicas con el mejor de los instrumentos. (…). Trataré de averiguar cómo las fuerzas de la naturaleza actúan unas sobre otras, y de qué manera el entorno geográfico ejerce su influencia sobre los animales y las plantas. En resumen, debo aprender acerca de la armonía en la naturaleza.

Carta a Karl Freiesleben (Junio de 1799) de Alexander von Humboldt 1769-1859

1. LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

La historia de la Tierra ha sido la del *cambio*. Fenómenos descritos en el Poema babilónico de la creación hace 5.000 años, los propios que refiere el Génesis en los tres primeros días de la creación, o acontecimientos como el Diluvio universal, narran esa variabilidad determinante para el devenir de la propia humanidad. Sobre esas ideas, James Ussher de Armagh en 1650, dedujo que la edad del universo era de 6008 años, y desentrañando señales apócrifas, que el primer día de la creación comenzó en el crepúsculo anterior al domingo del 23 de octubre del año 4004 a.C. del calendario juliano. Su coetáneo John Lightfoot modificó el cálculo y propuso que la creación comenzó el atardecer próximo al equinoccio de otoño de 3929 a.C. Isaac Newton las consideraba «recientes» y comentó que debería estar en torno a los 6000 años. Un siglo después, el marqués de Buffon calculaba, ante el asombro y las burlas de los académicos, 76.000 años. Charles Lyell, y con él Darwin, estimó una edad de 240 Ma.

Empleando datos recuperados de las rocas que se han ido depositando paulatinamente en cuencas oceánicas o surgidas del propio interior del planeta y que se constituyen como archivos de los cambios que han acaecido, los científicos confirman una edad de 4600 millones de años, en los que episodios extremadamente cálidos, con otros en los que el planeta llega a congelarse casi completamente, han sido reconocidos por los geólogos que han sido capaces de datarlos y, en un buen número de casos, explicarlos, si bien, como sucede en las Ciencias naturales, el propio desarrollo del conocimiento va incrementando la precisión y, consiguientemente, la formulación de nuevas teorías.

Volcanismo y meteorización de las tierras emergidas, ligados a la dinámica de los continentes en un océano variable a través del tiempo en el que se incorporan seres que llegan a fotosintetizar y en algún momento producir oxígeno, se añaden a un ciclo en el que el carbono y sus *especies* químicas (CO_2 y CH_4) acaban siendo protagonistas al erigirse como termorreguladores del sistema, estabilizadas las *geosferas*[1], sin olvidar la dinámica solar cambiante, tanto orbital como la propia interna del astro, que dará lugar a que acceda más o menos energía al sistema

1. Las geosferas que constituyen la Tierra son: litosfera, atmósfera, hidrosfera + crisofera (agua líquida y sólida) y biosfera.

o se reparta estacionalmente de diferente manera. Un clima histórico que ha ido cambiando, manteniendo agua líquida en el exterior de forma continuada y concentrando hielo en diversas etapas. Glaciaciones en los últimos millones de años han ido alternando con episodios más cálidos, como en el que nos encontramos en la actualidad, el Holoceno, en ciclos de decenas de miles de años. Dentro de cada uno de esos ciclos, la propia emisión solar, a veces condicionada por factores de transporte energético esencialmente ligados a la dinámica del océano combinados, han definido episodios relativamente cálidos, como puede ser el «Óptimo medieval» en torno al año 1000 d.C., u otros de tendencia opuesta, como la «Pequeña edad del hielo», entre los siglos XVII y XIX, con descensos sustanciales en las temperaturas medias. En todos estos casos la actividad de las *geosferas* proporciona una explicación. Conviene llamar la atención sobre que el equilibrio dinámico que se ha ido definiendo ha posibilitado un sistema propicio para el desarrollo de nuestra especie desde hace 200.000 años (Flores, 2009; Filippelli, 2022).

2. LA INTERFERENCIA ANTRÓPICA: EL CAMBIO GLOBAL VS. CAMBIO CLIMÁTICO

Los organismos han sido protagonistas y responsables de la evolución climática de la Tierra. Las bacterias fueron capaces de modificar la atmósfera una vez eclosionaron, incorporando el oxígeno libre hace 2000 millones de años. Las plantas una vez colonizan el continente hace 400 millones de años absorben y expulsan carbono, facilitando su retirada del exterior terrestre una vez se entierran. La especie humana no lo está siendo menos. Desde su aparición, pero sobre todo una vez que coloniza la práctica totalidad del planeta, tras la domesticación de vegetales y el desarrollo masivo de estrategias de caza (no siempre selectiva) para su supervivencia, ha iniciado un proceso de modificación que se vio sustancialmente incrementado tras la «Segunda revolución industrial», a finales del siglo XIX, y de manera extremada hacia la mitad del siglo XX en lo que se ha denominado la «Gran aceleración» (Steffen *et. al.*, 2015). La Figura 1 muestra la incuestionable relación existente entre indicadores socioeconómicos, directamente ligados a las actividades humanas y la tendencia observada en parámetros del sistema terrestre. Ese límite marca la base de lo que la Comisión Internacional de Estratigrafía ha propuesto como *Antropoceno*[2] (Crutzen y Stoermer, 2000). Este término tiene carácter «estratigráfico», temporal, aunque a menudo se está *adjetivando,* adoptando un uso generalista, impreciso.

La idea de que la sociedad ha producido una alteración no es nueva. El marqués de Buffon consideraba en su obra *Les époques de la Nature* (1778) que la séptima etapa de la Historia de la Tierra la caracterizaba el desarrollo de los *humanos*; y alguno de los patriarcas de la Geología como Antonio Stoppani o James Haughton

2. La oficialización del término Antropoceno está en trámites, pendiente de una definición final y de la caracterización de su límite inferior, aún en discusión.

a mediados del siglo XIX, al tiempo que se establecían alguno de los principios de esa ciencia, mencionaban un Antropozoico como lapso en el que la humanidad se imbricaba en los procesos geológicos e incluso los podía condicionar.

El programa *Future Earth*, que comenzara su desarrollo hace tres décadas con el *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP), *DIVERSITAS* and *The International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change* (IHDP), ha desarrollado una labor científica y de diseminación encomiable, sentando en buena medida las bases de los efectos sociales en el medio ambiente.

> *El término «Cambio Global» abarca: cambios a escala planetaria en la circulación atmosférica y oceánica, el clima, el ciclo del carbono, el ciclo del nitrógeno, el ciclo del agua y otros ciclos, cambios en el hielo y en el nivel del mar, redes tróficas, diversidad biológica, contaminación, salud, poblaciones de un número considerable de organismos, además de otros.*
> *La sociedad humana es la impulsora del Cambio Global, por lo que el término incluye población, economía, uso de recursos, energía, desarrollo, transporte, comunicaciones, uso del suelo y cobertura del suelo, urbanización y globalización. Algunos cambios en el sistema de la Tierra, naturales o impulsados por humanos, pueden tener consecuencias significativas sin involucrar cambios en el clima. El Cambio Global no debe confundirse con el Cambio climático; de hecho, es significativamente más importante. El Cambio climático es parte de este desafío mucho mayor* (IGBP, International Geosphere-Biosphere Program)

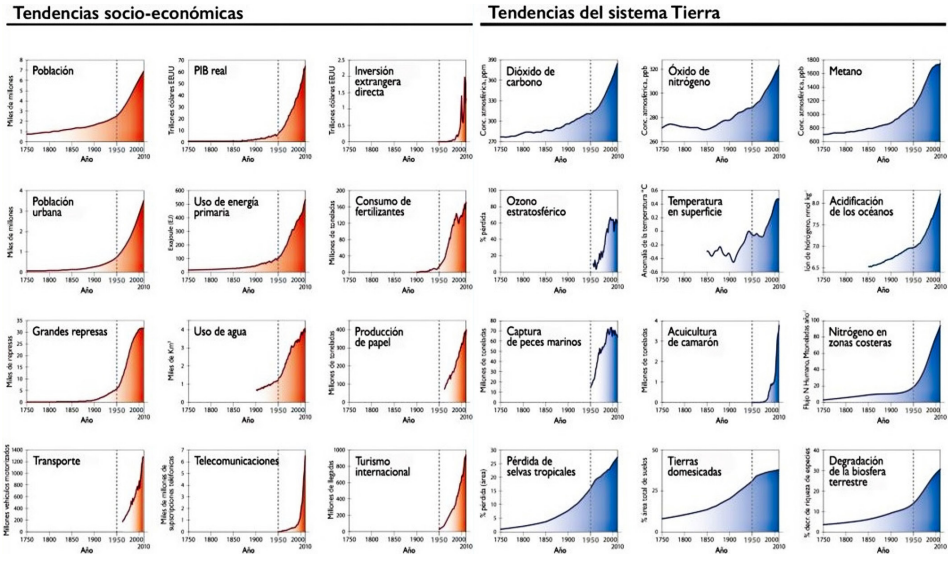


Figura 1. La Gran aceleración manifestada en patrones socioeconómicos y repercusión en el sistema terrestre (IGBP, 2004).

En ese marco internacional, aglutinando un número destacadísimo de científicos y especialistas de diversas áreas, la Organización de Naciones Unidas puso en marcha el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC; Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) en 1988, una vez se confirmó el indiscutible efecto de la sociedad humana en el clima, esencialmente como consecuencia de la emisión de gases de efecto invernadero (CO_2, CH_4, óxido nitroso-N_2O…) en una situación de incremento extremado de la población mundial, con vinculación directa con la actividad industrial y otras socioeconómicas. A comienzos del siglo XVIII la población mundial se ha estimado en 1.000 millones de personas; la última aproximación del Fondo de Población Organización de las Naciones Unidas (diciembre de 2023) es de 8.045 millones de personas. En las tres próximas décadas se prevé superar los 9.500 millones.

La acción humana que ha derivado a partir de los años 50 en el Estado del Bienestar ha trasmitido su señal al sistema terrestre, llegando a infligir una modificación apreciable (Figura 2).

> *El Cambio Climático hace referencia a una variación del estado del clima identificable (p. ej., mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante periodos prolongados, generalmente décadas o incluso más largos. El Cambio Climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos, tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), define el Cambio Climático como «cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables». La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales* (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)

La idea no es nueva, aunque es cierto que el efecto ha merecido mayor atención en las últimas décadas una vez los efectos se han manifestado ostensiblemente, tras disponer de más información sobre las características moleculares del CO_2. La idea de que el carbono actúa como termorregulador, implicando a la litosfera (volcanismo, meteorización) y a la biosfera, ya estaba implícita en los principios de la Geología en el siglo XVIII; sin embargo, la impronta humana no encuentra voz hasta que Svante August Arrhenius (premio Nobel de Química en 1903), junto con Thomas Chamberlin, expusiera la relación entre la concentración de CO_2 atmosférico y la temperatura de la atmósfera debido a su capacidad de absorción de la radiación infrarroja.

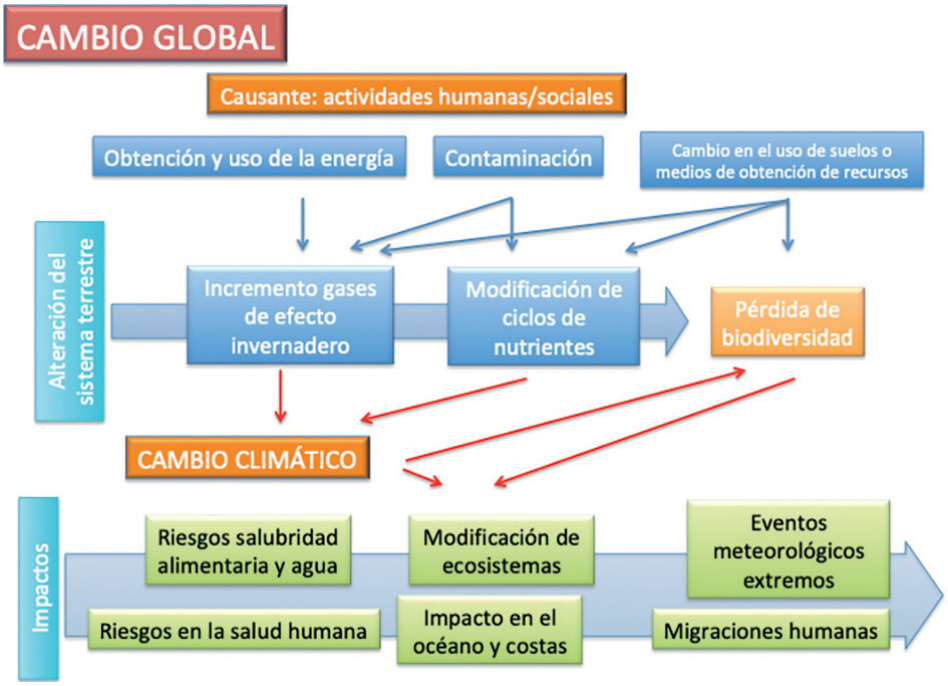


Figura 2. Relación entre las actividades humanas y su vinculación con el cambio global y Cambio Climático.

3. MODELOS HISTÓRICOS Y PREDICTIVOS

La predicción de Arrhenius (1896) se ha visto confirmada. La disponibilidad de series climáticas largas, abarcando los últimos cientos de miles de años con considerable resolución temporal, junto con las instrumentales disponibles en el último siglo, ha puesto de manifiesto una evidente interferencia antrópica en el clima. Así lo pone de manifiesto la Figura 3, en la que se contrastan las temperaturas globales de los últimos millones de años con las actuales. Los ciclos y procesos de la litosfera y biosfera, junto con variaciones en la emisión y reparto energético del pasado, se ven alterados sensiblemente en lapsos y por mecanismos que no se han identificado con anterioridad.

Los datos disponibles, que van ampliándose progresivamente, han permitido a la comunidad científica, asistida por el IPCC y las más relevantes instituciones académicas e investigadoras internacionales, *concebir modelos climáticos*. Los denominados *General Circulation Models* (GCMs) se definen como la representación numérica del sistema climático partiendo de las propiedades físicas, químicas y

biológicas de las *geosferas*, para lo que se emplean técnicas informáticas complejas (supercomputadores). Con ello se posibilita la proyección, la definición de modelos que pueden anticipar escenarios climáticos (representación simplificada de una situación esperable en función de la variabilidad de los parámetros que definen el clima), así como trasformar parámetros determinantes en la evolución ambiental. Considerando el balance energético existente en un momento dado, es posible la proyección del forzamiento radiativo (energía entrante al sistema y elementos que potencien su permanencia o remoción) y consecuentemente estimar parámetros como la temperatura.

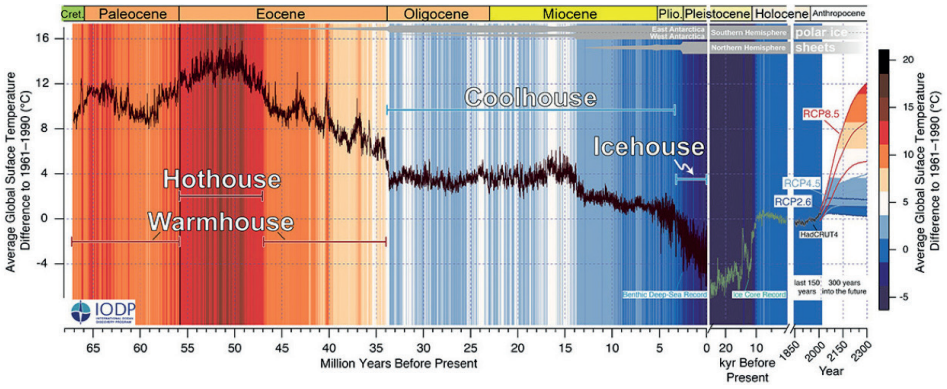
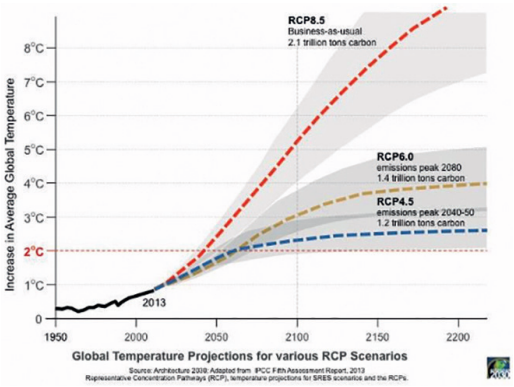


Figura 3. Temperatura media del océano a lo largo de los últimos 67 millones de años obtenida mediante isótopos de oxígeno en microfósiles bentónicos (relativos a la media global 1961-1990) y su comparación con los escenarios RCP. Los datos históricos parten de 1850, con una clara aceleración hacia 1950 (Westerhold et al, 2020 y CENOGRID).

La proyección climática posibilita la predicción de determinados parámetros en escenarios que se fundamentan en supuestos de variabilidad, como por ejemplo la concentración de gases invernadero, forzamiento radiativo (FR) y su relación con aspectos sociales como las tasas demográficas, contextos económicos o aplicación de recursos tecnológicos, que pueden materializarse o excluirse. El IPCC lleva a cabo propuestas de carácter general al tiempo que propone otros *regionalizados*, teniendo en cuenta factores de carácter local, más adaptables a ámbitos geográficamente reducidos.

El IPCC en sus últimos informes maneja cuatro escenarios en los que se considera el forzamiento radiativo, su tendencia global y concentración potencial de CO_2, en función de situaciones de emisión (reducida, mantenida o creciente). Estas situaciones son las que los expertos emplean en sus propuestas.



	FR W/M^2	TENDENCIA DEL F	CO_2 EN 2010 (PPM)
RCP2.6	2.6	decreciente en 2100	421
RCP4.5	4.5	estable en 2010	538
RCP6.0	6	creciente	670
RCP8.5	8.5	creciente	936

Figura 4. Proyección de las temperaturas medias globales en función de los escenarios RCP (Representative Concentration Pathways) de acuerdo a lo que se manifiesta en la tabla (IPCC, 2023).

Un aspecto destacado, que pone de manifiesto la importancia del estudio paleoclimático, es la posibilidad de comparar concentraciones de CO_2 atmosférico en tiempos pretéritos y la caracterización de las otras *geosferas*, como por ejemplo temperatura media, extensión de las masas de hielo, nivel del mar o caracterización de la biosfera. Partiendo de esos modelos es posible realizar una comparación sobre potenciales escenarios y aquellos que se han materializado en el pasado en los que las concentraciones de gases de efecto invernadero, en concreto el CO_2, fueron el causante esencial de que la temperatura media del océano, siempre en conexión con la atmósfera, alcanzase valores de hasta 12 ºC por encima de los actuales (Figura 3).

Un escenario optimista de cese de emisiones a día de hoy supondría un incremento en las próximas décadas de en torno a 2 ºC (Figura 4). La concentración de CO_2 en el observatorio de Mauna Loa, Hawai (*National Oceanic and Atmospheric Administration,* NOOA) en noviembre de 2023 ha sido de 420,46 ppm (partes por millón); noviembre de 2022, 417,47 ppm. De acuerdo con la información disponible en archivos fidedignos como son los testigos de hielo, debería estar en torno a las 285 ppm. De mantener el actual ritmo de emisiones, los contextos que se manejan

indican una situación similar a la que la Tierra tuvo hace 50 millones de años o. en casos más optimistas, similar a las temperaturas de hace 5 millones de años (Figura 4).

El cambio ejercido por la sociedad es incuestionable. La Figura 5 muestra el cambio que se ha venido observando en la temperatura media. Como elemento a destacar, la comparación con la situación que debería darse en ausencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera, teniendo en cuenta la retroalimentación positiva y/o negativa de otros elementos que contribuyen a definir los patrones climáticos.

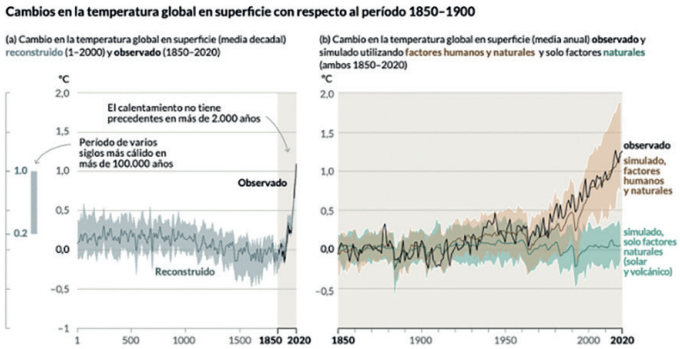


Figura 5. Variación de la temperatura global registrada instrumentalmente y su comparación con registros simulados en los que se excluirían elementos como el efecto de gases de efecto invernadero, pero incluyendo otros elementos como la actividad solar o/y volcánicos, en el caso que pudieran acaecer.

4. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN SALAMANCA

Los efectos del Cambio Climático antrópico, como parte de ese fenómeno que es el Cambio global, tienen como protagonista la subida media de las temperaturas y, consecuentemente, expansión térmica de los océanos, deshielo (con el consiguiente ascenso del nivel del mar, modificación de los ecosistemas, cambios en los regímenes hídricos (con afectación directa al sistema agrícola), desplazamiento de las isotermas vinculadas a vectores de transmisión de enfermedades, incremento de golpes de calor, entre otras (Figura 2).

Salamanca, como la totalidad de la península Ibérica, está siendo afectada por el fenómeno global mencionado. De acuerdo con el Atlas climático ibérico (https://doi.org/10.31978/784-11-002-5), la provincia de Salamanca estaría incluida en las categorías Csa (Mediterráneo) y Csb (oceánico con verano seco), y en algunos puntos Bsk (estepario frío) (Aemet) (Figura 6).

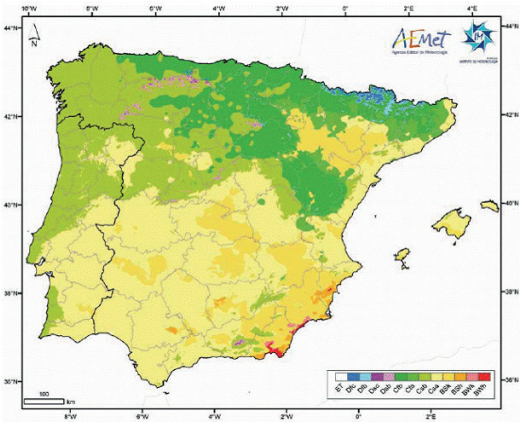


Figura 6. Mapa de la península Ibérica (Atlas climático ibérico-AEMET) en el que se muestra la distribución en la península Ibérica de las categorías climáticas estándar (Köppen, Peel et. al., 2007).

Los parámetros fundamentales que definen esta categoría en los términos que estamos tratando son la temperatura y las precipitaciones, de los que van a depender otros factores determinantes como la vegetación.

La AEMET ha llevado a cabo una importante toma de datos que permite su uso, por una parte para el análisis histórico y evaluación de la variabilidad, y por otro, cercano a lo expuesto anteriormente, la aplicación a escenarios RCP.

A modo de ejemplo, en la Figura 7 se muestra la serie histórica de temperatura media anual para Salamanca a lo largo de los siglos XX y XXI. En la misma se puede observar una oscilación, aunque la tendencia observada es claramente tendente al ascenso térmico.



Figura 7. Gráfico tipo Warming Stripes de las temperaturas medias anuales para Salamanca en el periodo 1901-2022. Datos obtenidos de la base de datos CRU TS Version 4.07 Climatic Research Unit (University of East Anglia) and Met Office. Las bandas azules marcan temperaturas bajas y las rojas temperaturas altas, sobre los valores medios. Elaborado por Miguel Ángel Fuertes, Universidad de Salamanca.

Aplicando los modelos RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, partiendo de los datos de las últimas décadas, las proyecciones son las que muestra la Figura 8. En las mismas

se pone de manifiesto que en un supuesto de emisión continuada, las temperaturas máximas extremas en las próximas décadas alcanzarían valores entre 2 y 6 ºC, dependiendo del escenario.

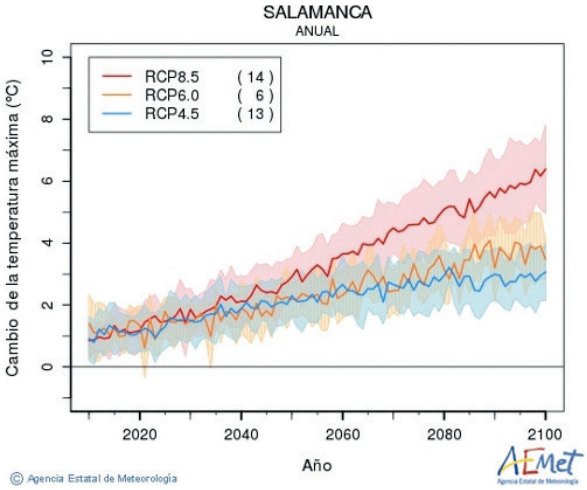


Figura 8. Modelización de la tendencia de temperatura máxima en función de los escenarios de emisión RCP aplicados.

Algo similar sucede con la precipitación. Tal como aparece en la Figura 9, la tendencia oscilante de las últimas décadas indica una ligerísima caída.

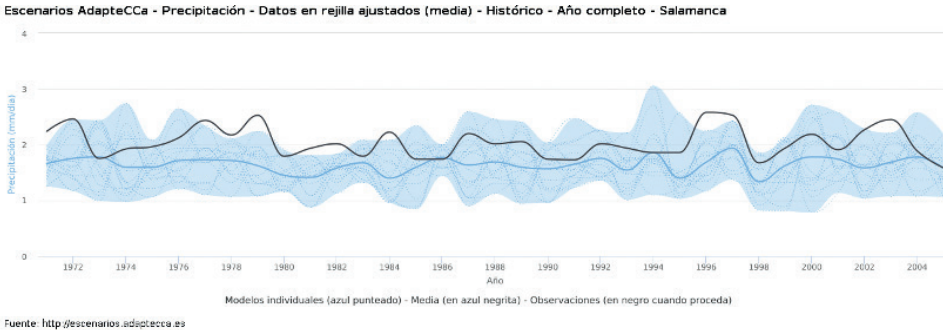


Figura 9. Serie histórica de la precipitación media anual en Salamanca (AEMET).

La aplicación de los modelos RCP muestra una tendencia a la reducción, con alta probabilidad de generación de fenómenos extremos (Figura 10).

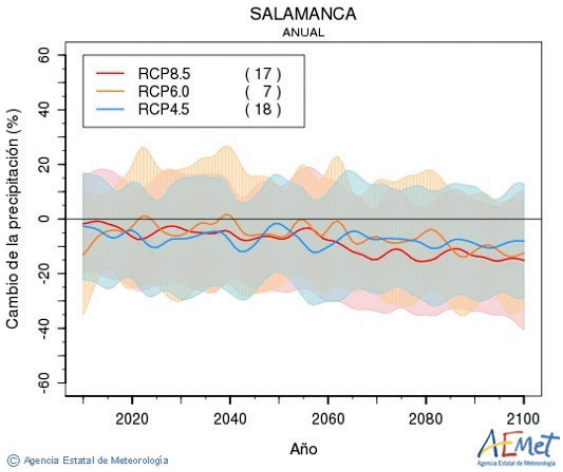


Figura 10. Modelización de la tendencia de precipitación en función de los escenarios de emisión RCP aplicados.

La información disponible pone de manifiesto que en escenarios como los propuestos, altamente probables para el caso del RCP4.5, el incremento de la temperatura y la reducción de precipitaciones determinaría un incremento de superficies que se corresponderían con la categoría Bsk (Köppen; estepario frío). No obstante, hay que tener en cuenta que las características orográficas y fisiográficas de buena parte de la provincia determinan que los modelos predictivos no sean tan dramáticos como los que se proponen para otras regiones donde la cercanía al mar, la altitud o latitud intensificarían las constantes, hecho que, por otra parte, contribuiría a generar gradientes más extremos.

Un aspecto a tener en cuenta es que, pese a que la población provincial pueda sufrir un descenso, la mundial marcará máximos en las próximas décadas afectando a todo el sistema. Los escenarios de emisión debidos a combustibles fósiles o producción de metano agroalimentario a fecha de hoy no son optimistas, propiciando situaciones en las que la temperatura media global alcance valores por encima de los deseables, manteniendo en el mejor de los casos la impronta de escenarios entre el RCP4.5 o RCP6.0.

5. COMENTARIO FINAL

El Cambio Climático antrópico está gobernado por procesos que están afectando las *geosferas* a nivel planetario de manera que, aunque las manifestaciones no lleguen a tener igual entidad, el efecto será global. Los principales distribuidores y acumuladores de la energía en el sistema terrestre son la atmósfera y el océano,

que operan de forma paralela y dependiente. Es inevitable nuestra *subordinación*, aunque está en nuestra mano, quizás, controlar los tiempos.

REFERENCIAS

ARRHENIUS, S., 1896. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, *Philosophical Magazine*, 41, 237-276.

AEMET. Atlas climático ibérico. https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/Atlas-climatologico

CRUTZEN P. y STOERMER E. 2000. The Anthropocene. Global *Change Newsletter* 41: 17.

DIVERSITAS. http://www.diversitas-international.org/

FILIPPELLI, G.M. 2022. Climate Change and Life The Complex Co-evolution of Climate and Life on Earth, and Beyond. *Elsevier.*

FLORES, J.A. (Editor). 2009. Cambio climático y sociedad. *Universidad Internacional de Andalucía*. 152 pp.

FUTURE EARTH. https://futureearth.org

IGBP 2004. First Synthesis, Global Change and the Earth System: a planet under pressure, *Springer*, Steffen, W. *et. al.* (Eds).

IPCC. 2006. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm

IPCC. 2014. Climate Change 2014 The Physical Science Basis. Summary for Policymakers Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group I of the IPCC, Paris, February 2007.

IPCC. 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Pörtner, H.O., et al Eds.). *Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge,* UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., and MCMAHON, T. A.: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, 2007. *Hydrol. Earth Syst. Sci.,* 11, 1633-1644, https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007

STEFFEN, W. BROADGATE, W., DEUTSCH, L. *et. al.* 2015. The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. T*he Anthropocene Review* 2: 81-98.

The International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP). http://essp.org/partners/ihdp/

WESTERHOLD, T. *et. al.*, 2020. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science,* 369, 1383-1387, https://doi.org/10.1126/science.aba6853