GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
AEMet Agencia Estatal de Meteorología

I Jornada del cambio climático en las Islas Baleares
Palma de Mallorca, 25-26 octubre de 2018

Proyecciones de cambio climático en la atmósfera: estrategia de AEMET

E. Rodríguez Camino

erodriguezc@aemet.es

PRESENTA: Romualdo Romero (Catedràtic de Meteorologia, UIB)

Índice

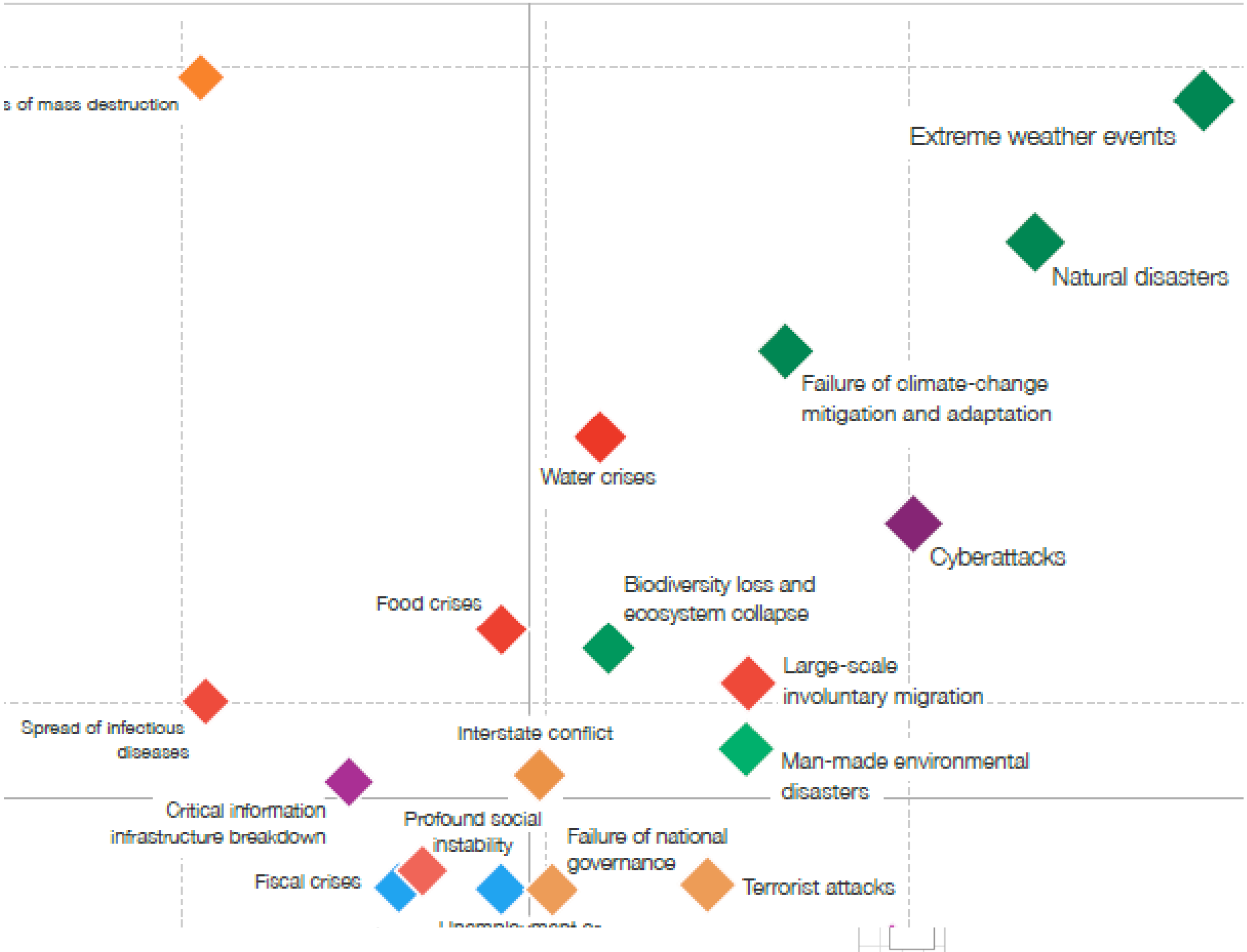
- Motivación
- Metodología
    - Explotación de todas las fuentes de información disponibles
    - Énfasis en la estimación de incertidumbres
- Algunos resultados agregados para España peninsular e Illes Balears
- Conclusiones
- Comentarios finales

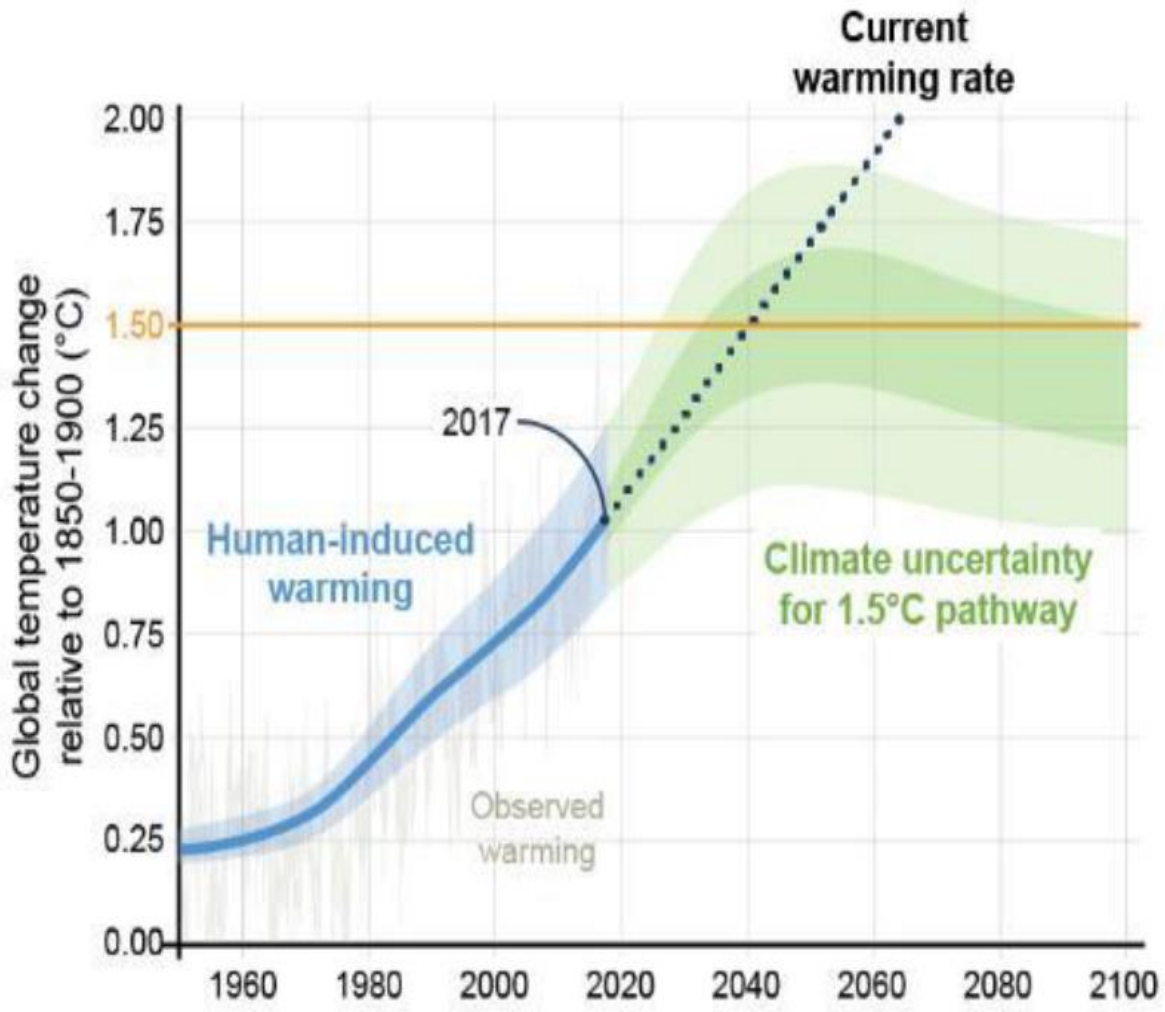
Categories

- Economic
- Environmental
- Geopolitical
- Societal
- Technological

The Global Risks Report 2018
13th Edition

WORLD ECONOMIC FORUM

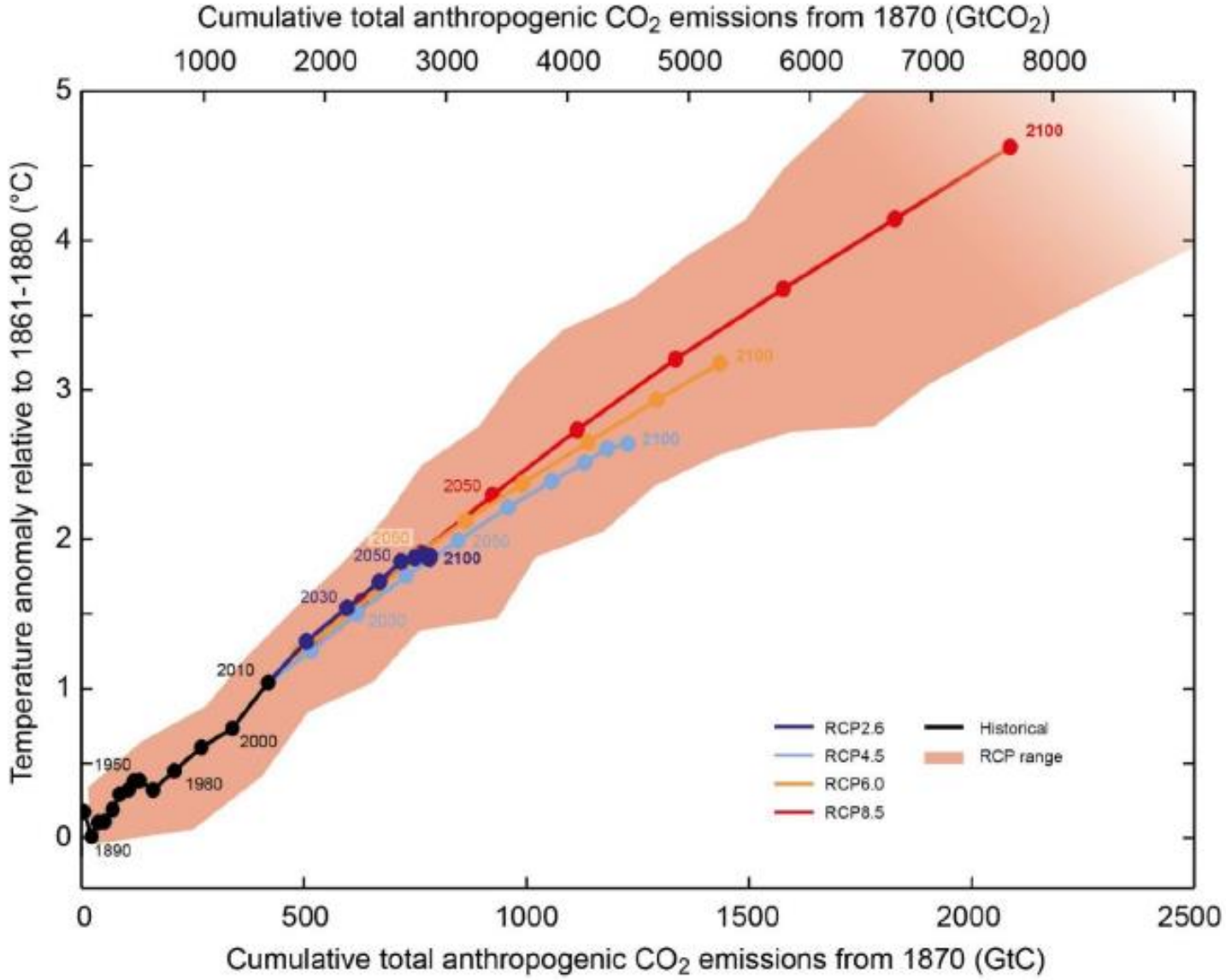




- El calentamiento global inducido por el hombre ha alcanzado en 2017 aproximadamente 1°C sobre el nivel preindustrial
- Si las emisiones continuasen al ritmo actual se alcanzará un calentamiento de 1.5°C alrededor de 2040

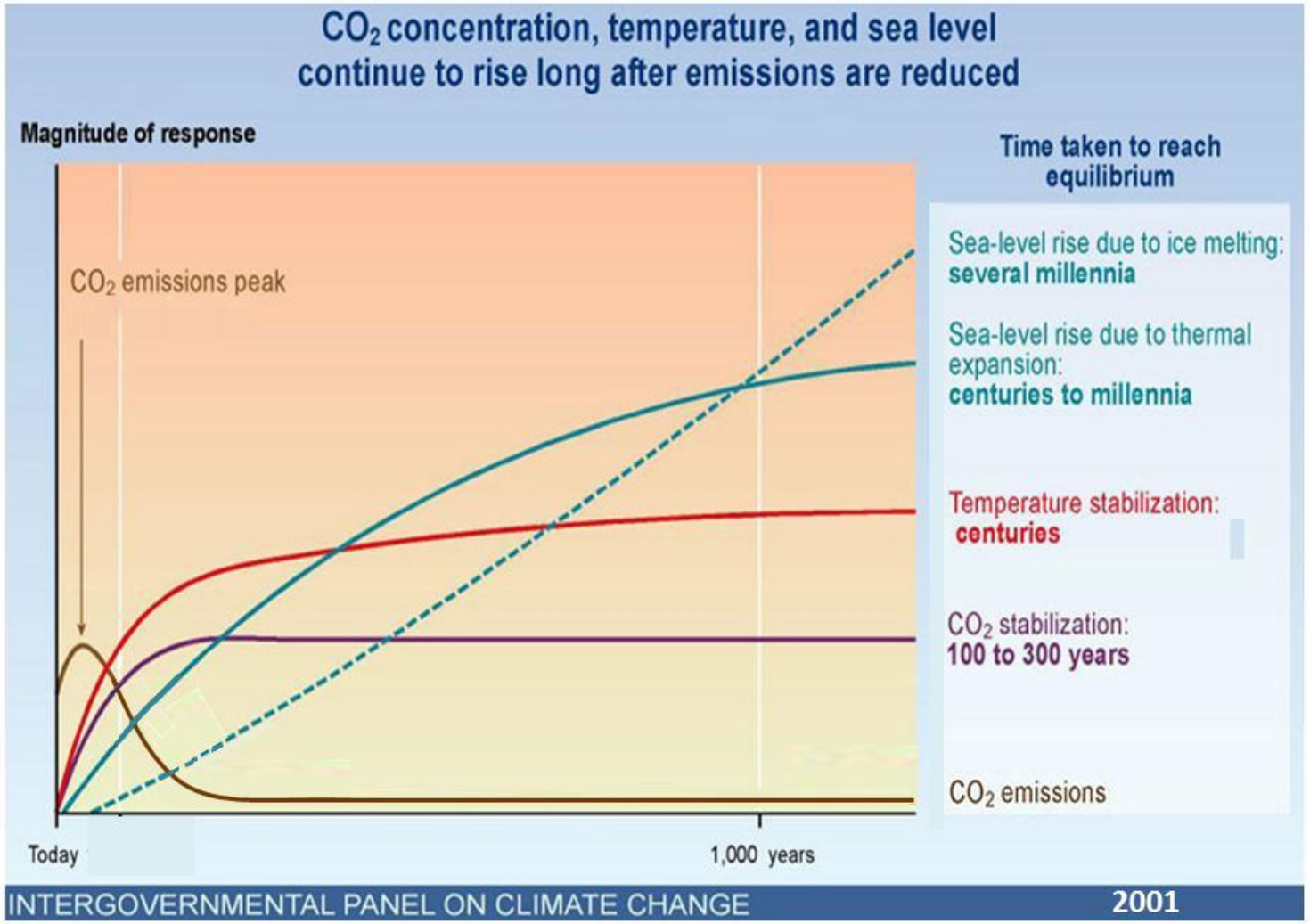
(SR1.5 IPCC, 2018)

El incremento de temperatura y emisiones acumuladas de CO2 están aproximadamente relacionadas de forma lineal



El cambio climático está comprometido:

El incremento del nivel del mar continuará durante muchos siglos

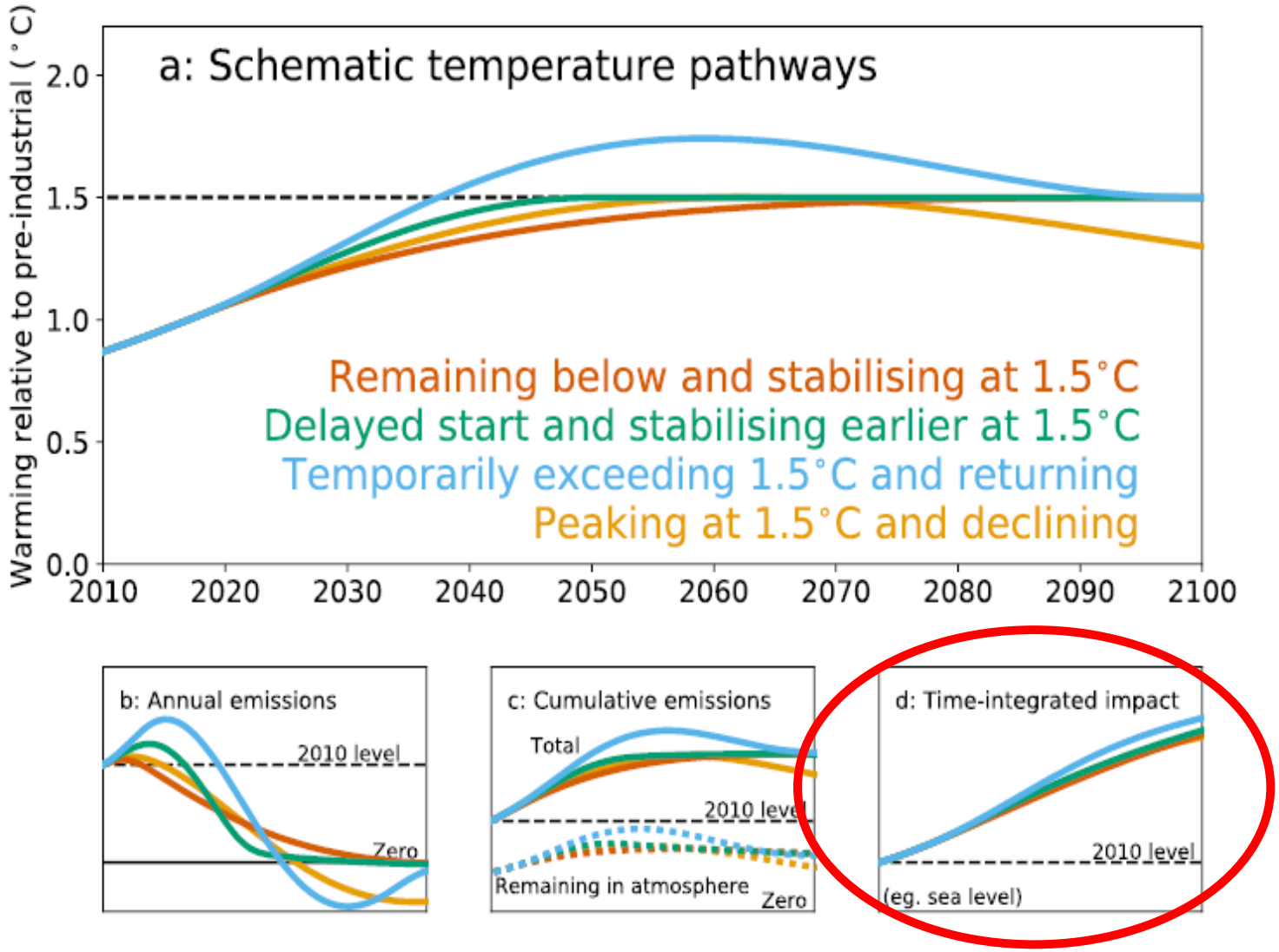


- El incremento del nivel del mar por expansión térmica continuará durante muchos siglos.
- La pérdida continuada de masas de hielo, que en algunos casos tiene un carácter irreversible, contribuirá también a ese ascenso.
- Un calentamiento prolongado por encima de un cierto umbral podría desencadenar la fusión, casi completa, del manto de hielo de Groenlandia. Esa fusión, que se produciría en un periodo superior a un milenio, conllevaría un aumento del nivel del mar de hasta 7 metros.

El cambio climático está comprometido:

El incremento del nivel del mar continuará durante muchos siglos

(incluso si se limita el calentamiento a 1.5ºC)



(SR1.5 IPCC, 2018)

¿Qué opciones tenemos? Proyecciones de cambio climático global

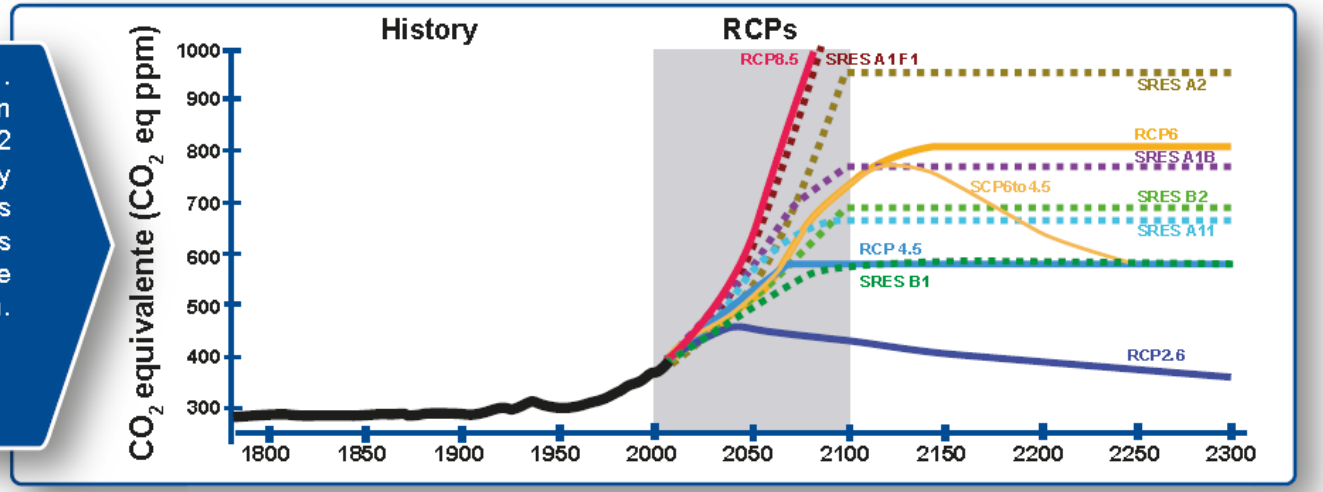
	Forzamiento	Tendencia del forzamiento	[CO_2] en 2100
RCP2.6	2,6 W m^{-2}	decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4,5 W m^{-2}	estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6,0 W m^{-2}	creciente	670 ppm
RCP8.5	8,5 W m^{-2}	creciente	936 ppm

- En el AR5 se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, las denominadas Sendas Representativas de Concentración (RCP, de sus siglas en inglés). Éstas se identifican por su forzamiento radiativo total para el año 2100. que varía desde 2,6 a 8,5 W m-2. Los escenarios de emisión utilizados en el AR4 (denominados SRES, de sus siglas en inglés) no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendentes a mitigar las emisiones, representando posibles evoluciones socio-económicas sin restricciones en las emisiones. Por el contrario, algunos de los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI.

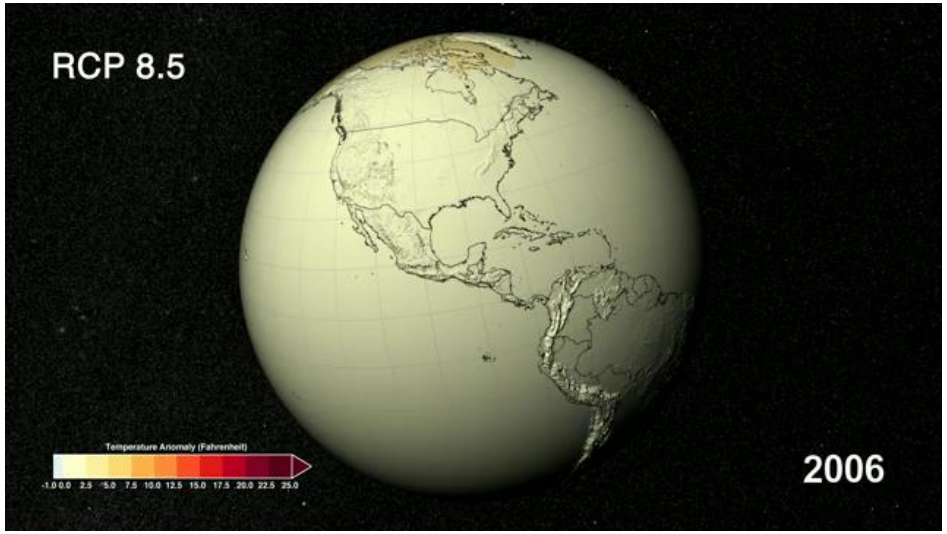
• Las proyecciones para las próximas décadas de muchas magnitudes muestran cambios similares a los ya observados.

• El cambio climático proyectado basado en los RCP es similar al mostrado en el AR4.

Gráfico 11. Concentración de CO2 equivalente y de emisiones para distintos escenarios de emisión.



Modelos climáticos: herramientas para estudiar el clima



Animación del NASA's Goddard Space Flight Center

Primitive equations

Momentum conservation

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}.\nabla u - fv = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla_h\left(K_{Mh}.\nabla_h u\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{Mv}\frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u}.\nabla v + fu = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial y} + \nabla_h\left(K_{Mh}.\nabla_h v\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{Mv}\frac{\partial v}{\partial z}\right)$$

Hydrostatic

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g$$

Continuity

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

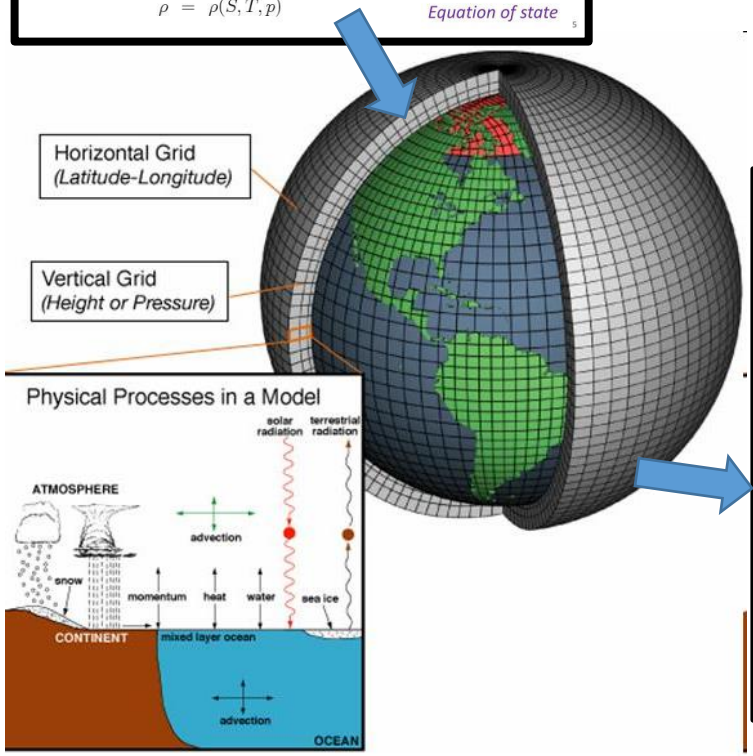
Tracer conservation

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u}.\nabla T = \nabla_h\left(K_{Th}.\nabla_h T\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{Tv}\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{u}.\nabla S = \nabla_h\left(K_{Sh}.\nabla_h S\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{Sv}\frac{\partial S}{\partial z}\right)$$

Equation of state

$$\rho = \rho(S,T,p)$$



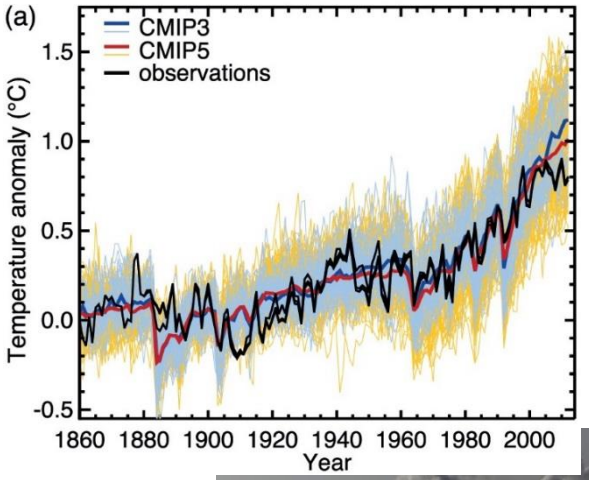

```
#include "rundeck_opts.h"

      MODULE STATIC_OCEAN
!@sum  STATIC_OCEAN contains the ocean subroutines common to all Q-flux
!@+    and fixed SST runs
!@auth Original Development Team
!@ver  1.0 (Q-Flux ocean)
!@cont OSTRUC,OCLIM,init_OCEAN,daily_OCEAN,DIAGCO
!@+    PRECIP_OC,OCEANS
      USE CONSTANT, only : lhm,rhows,rhoi,shw,shi,byi2,byshi
      USE MODEL_COM, only : im,jm,lm,focean,fland,flice
     *     ,iyear1,itime,jmon,jdate,jday,jyear,jeqdy,JDendofM,JDendofM
     *     ,itimei,kocean,itocean,itoice
      USE GEOM
      USE PBLCOM, only : npbl,uabl,vabl,tabl,qabl,eabl,cm=>cmgs,ch=>chgs
     *     ,cq=>cqgs,lpbl,rough
      USE SEAICE, only : xsi,ace1i,z1i,ac2oim,z2oim,ssi0,tfrez,fleadoc
     *     ,hmi
      USE SEAICE_COM, only : rsi,msi,hsi,snowi,ssi
#ifdef TRACERS_WATER
     *     ,trsi,trsi0,ntm
#endif
      USE LANDICE_COM, only : snowli,flandi
      USE FLUXES, only : gtemp,sss,fwsim,mlhc
      USE DAGCOM, only : aij, areg, jreg, ij_smfx, aj, j_implh, j_implm,
     *     j_imelt, j_hmelt, j_smelt
      IMPLICIT NONE
      SAVE
      logical :: off_line=.false.
!@dbparam ocn_cycl determines whether prescribed ocean data repeat
!@+    after 1 year - 0:no 1:yes 2:seaice repeats,sst does not
      integer :: ocn_cycl = 1
!@var TOCEAN temperature of the ocean (C)
      REAL*8, DIMENSION(3,IM,JM) :: TOCEAN
!@var SSS0 default sea surface salinity (psu)
      REAL*8 :: SSS0=34.7d0

!@var OTA,OTB,OTC ocean heat transport coefficients
      REAL*8, DIMENSION(IM,JM,4) :: OTA,OTB
      REAL*8, DIMENSION(IM,JM) :: OTC
!@var SINANG,COSANG Fourier coefficients for heat transports
      REAL*8 :: SINANG,SN2ANG,SN3ANG,SN4ANG,
     *          COSANG,CS2ANG,CS3ANG,CS4ANG

!@var Z1O ocean mixed layer depth
      REAL*8, DIMENSION(IM,JM) :: Z1O
!@var Z1OOLD previous ocean mixed layer depth
      REAL*8, DIMENSION(IM,JM) :: Z1OOLD
!@var Z12O annual maximum ocean mixed layer depth
      REAL*8, DIMENSION(IM,JM) :: Z12O
```

- Los modelos climáticos son **programas informáticos basados en las ecuaciones** que describen la evolución de los distintos componentes del sistema climático (atmósfera, océano, hielos, biosfera, …), sus **interacciones y sus procesos de retroalimentación**.

- Los modelos climáticos poseen una **complejidad variable**. Para cualquiera de los componentes del modelo climático existe una jerarquía de modelos que difieren en el número de dimensiones espaciales, resolución, procesos físicos, químicos o biológicos explícitamente representados o el diferente nivel de las parametrizaciones empíricas para los procesos no explícitamente resueltos.

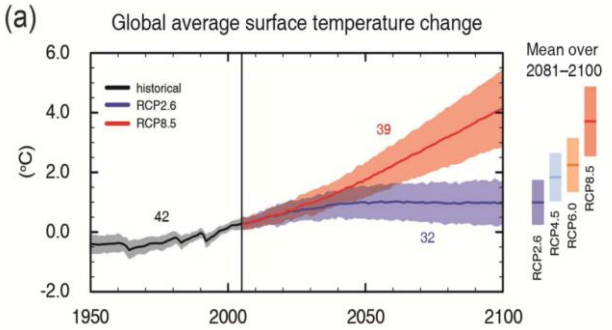
Los modelos climáticos permiten:

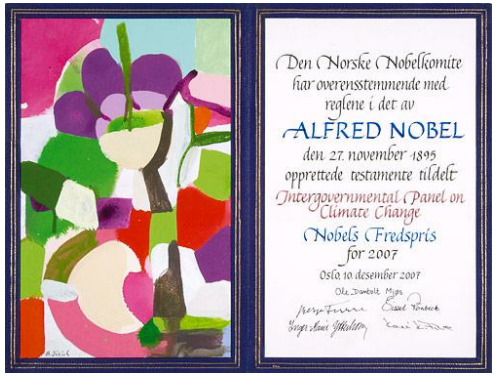
- **Simular climas pasados**



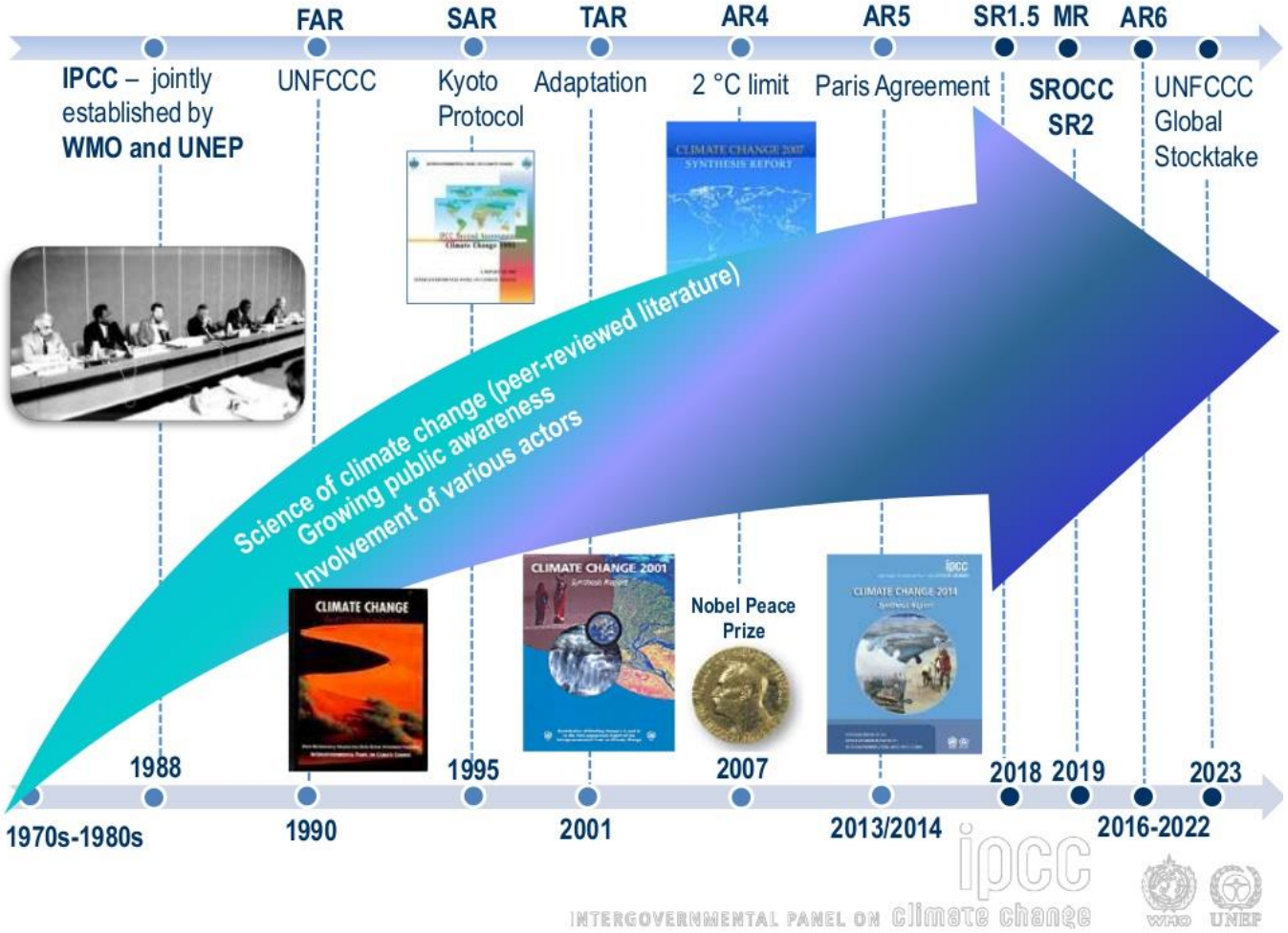
- **Realizar estudios de atribución del cambio climático**

- **Estimar la futura evolución del clima**





El IPCC y sus informes



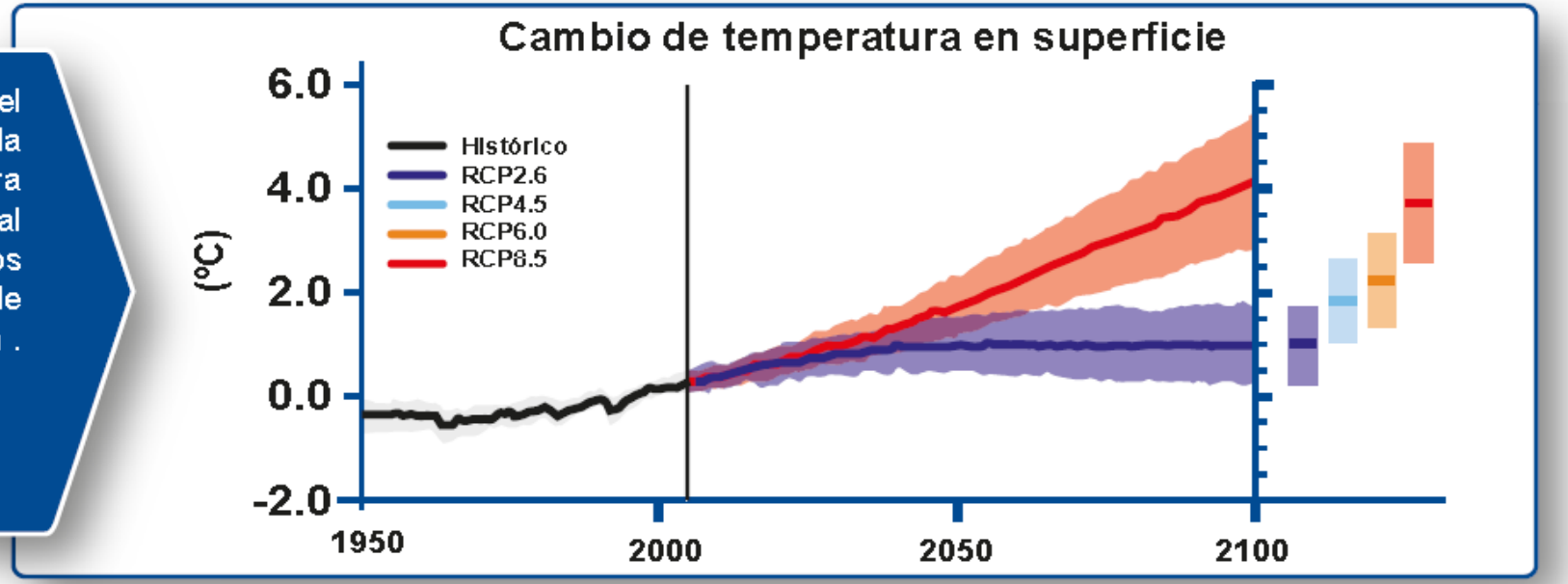
- Las evaluaciones del IPCC proporcionan una **base científica a los gobiernos**, a todos los niveles, para la formulación de políticas relacionadas con el clima, y sirven de **apoyo para las negociaciones de la CMNUCC**.
- Si bien esas evaluaciones revisten importancia política, no poseen carácter preceptivo, es decir, pueden servir para presentar proyecciones sobre el cambio climático futuro basadas en varias hipótesis, los riesgos que conlleva el cambio climático y las repercusiones de las posibles medidas de respuesta al mismo, pero no para determinar las medidas que deben adoptar las instancias normativas (**policy relevant but not prescriptive**)
- Los informes del IPCC son objeto de un **minucioso proceso de redacción y revisión en varias etapas** para garantizar un resultado exhaustivo y objetivo, y se elaboran de forma abierta y transparente. Miles de expertos contribuyen como revisores para asegurar que en los informes se reflejen todos los puntos de vista de la comunidad científica.

Atmósfera

- El cambio de la temperatura superficial no será regionalmente uniforme. El calentamiento será mayor sobre tierra que sobre los océanos. La región Ártica se calentará más rápidamente.
- En un clima más cálido, el contraste en la precipitación estacional media entre las regiones secas y húmedas aumentará en la mayor parte del globo. Las regiones situadas en latitudes altas y en el océano Pacífico ecuatorial verán incrementarse sus precipitaciones.

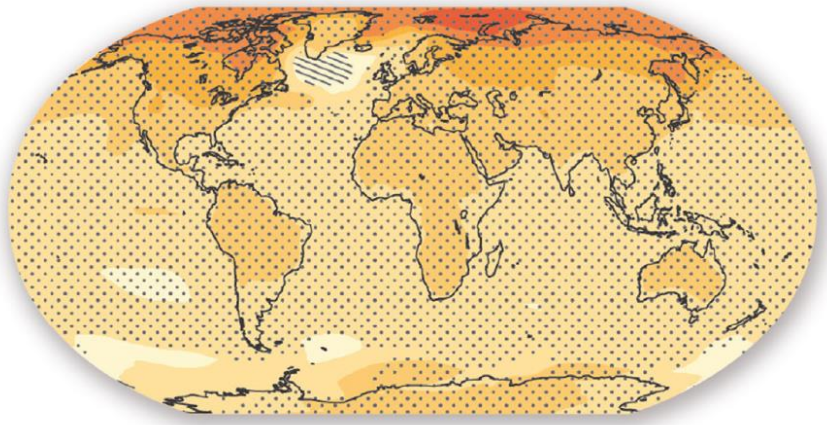
		2046-2065		2081-2100	
variable	escenario	media	rango probable	media	rango probable
Cambio temperatura superficial media (°C)	RCP2.6	1.0	0.4 - 1.6	1.0	0.3 - 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 - 2.0	1.8	1.1 - 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 - 1.8	2.2	1.4 - 3.1
	RCP8.5	2.0	1.4 - 2.6	3.7	2.6 - 4.8

Evolución del cambio en la temperatura media global para distintos escenarios de emisión .

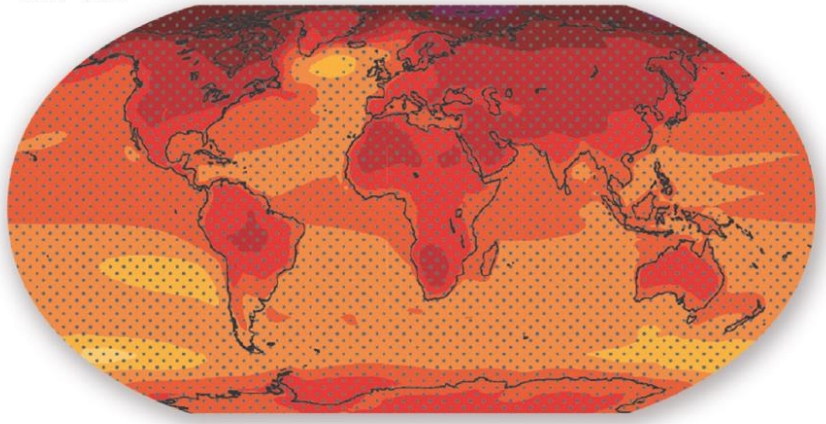


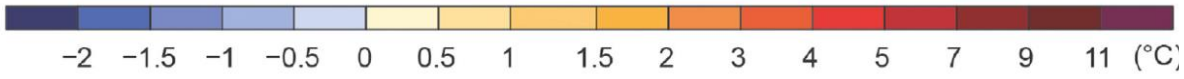
Cambio de temperatura media en superficie (entre 1986-2005 y 2081-2100)

RCP 2.6



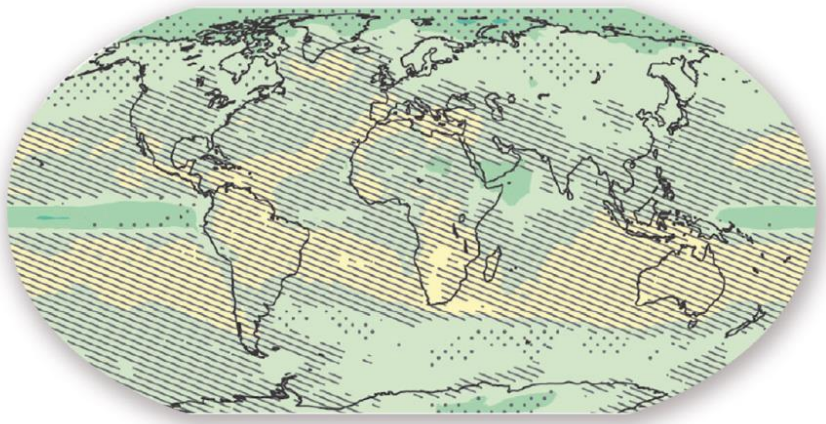
RCP 8.5



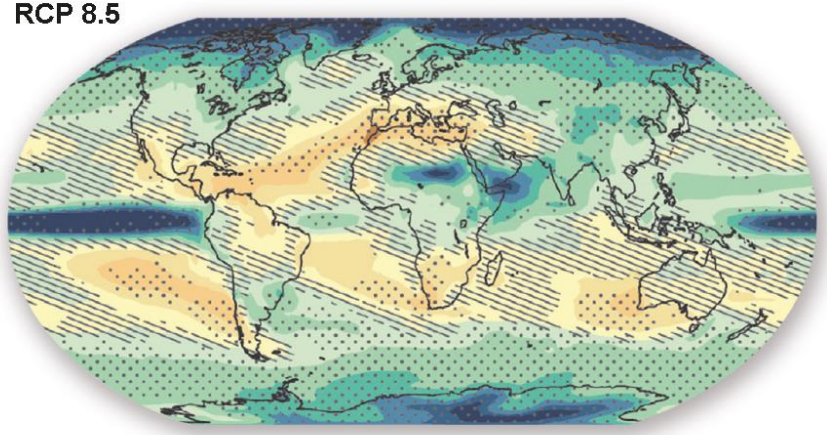


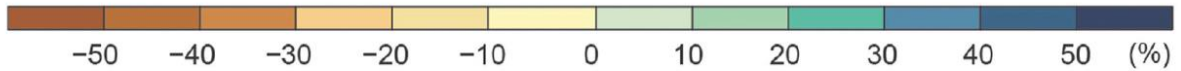
Cambio de precipitación media (entre 1986-2005 y 2081-2100)

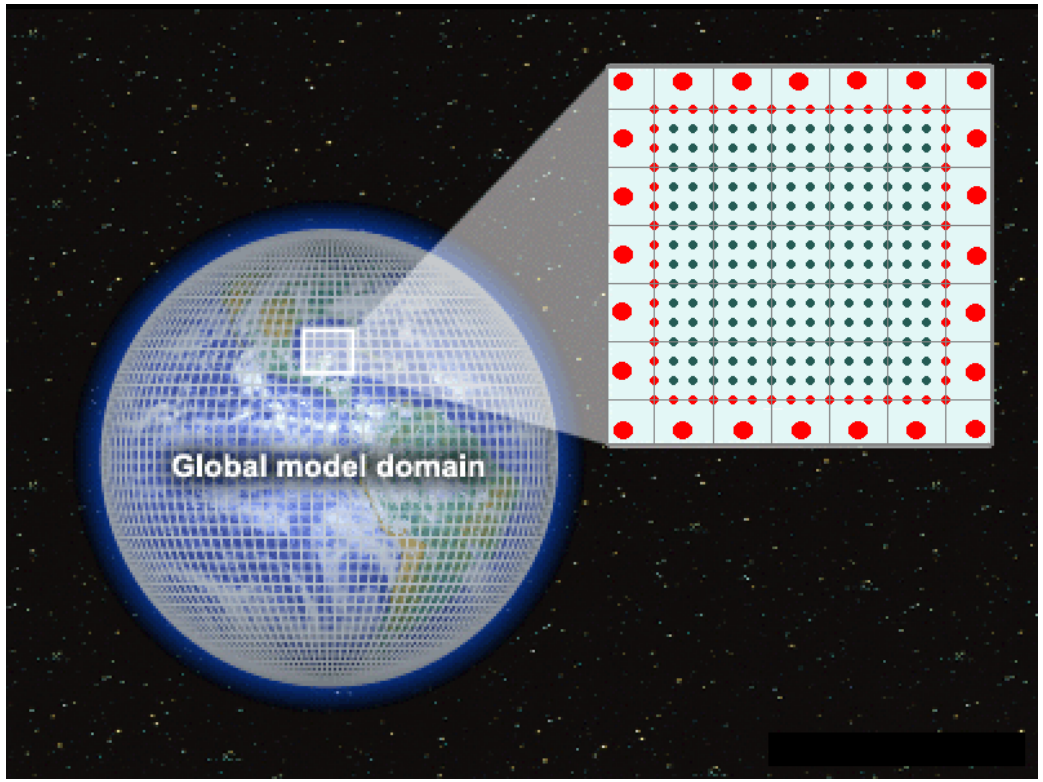
RCP 2.6



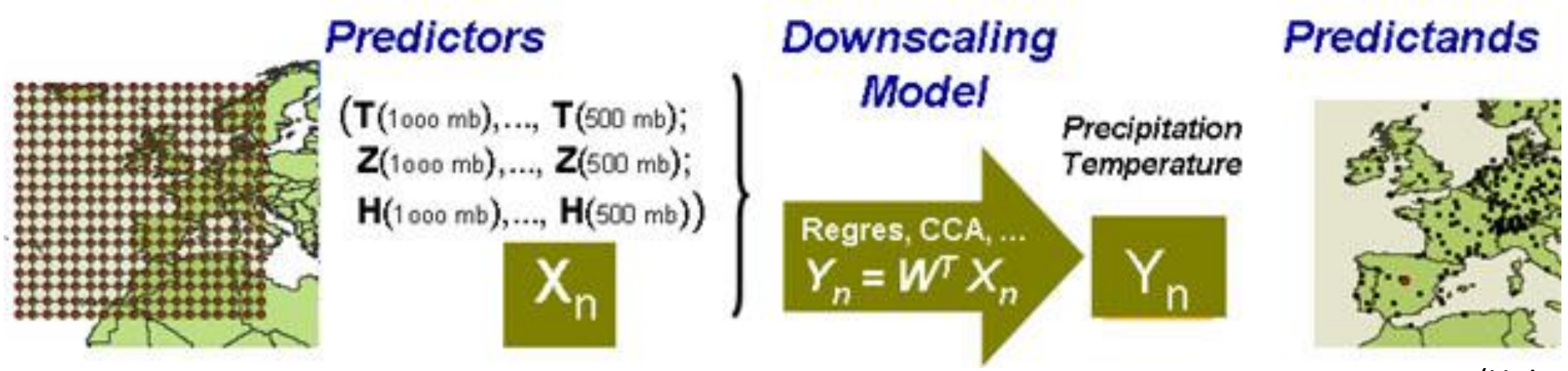
RCP 8.5







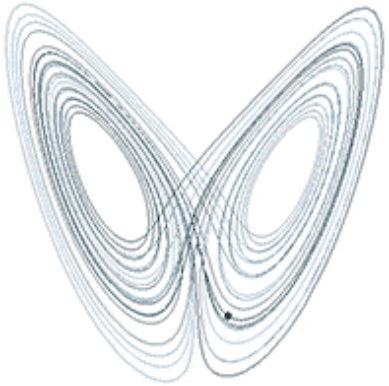
Regionalización dinámica y estadística

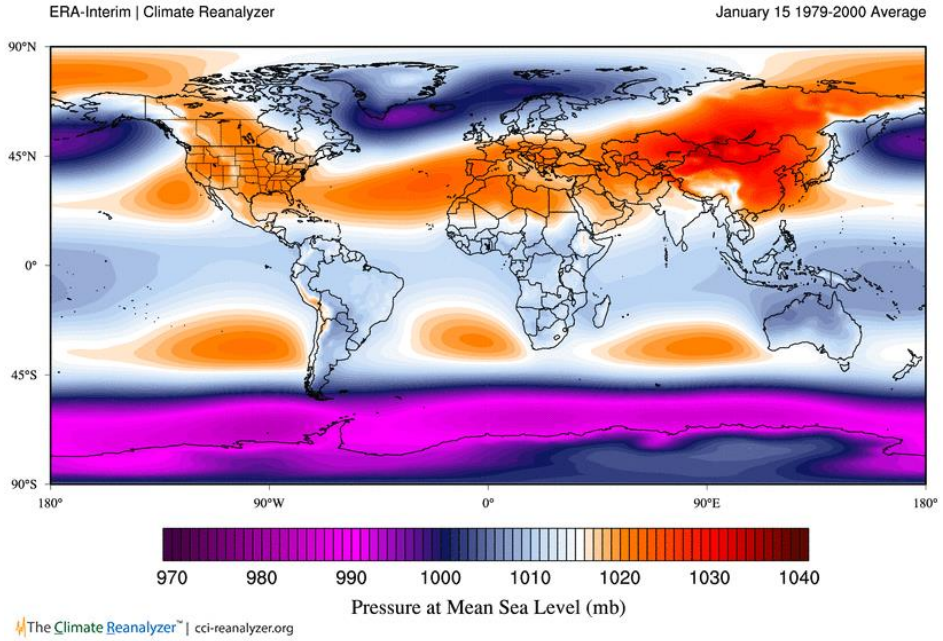


(Univ. Cantabria)

Naturaleza caótica del sistema climático:

evolución fuertemente dependiente de las CIs → predicciones basadas en múltiples realizaciones





Reprinted from JOURNAL OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES, Vol. 20, No. 2, March, 1963, pp. 130-141

Deterministic Nonperiodic Flow[1]

EDWARD N. LORENZ

Massachusetts Institute of Technology

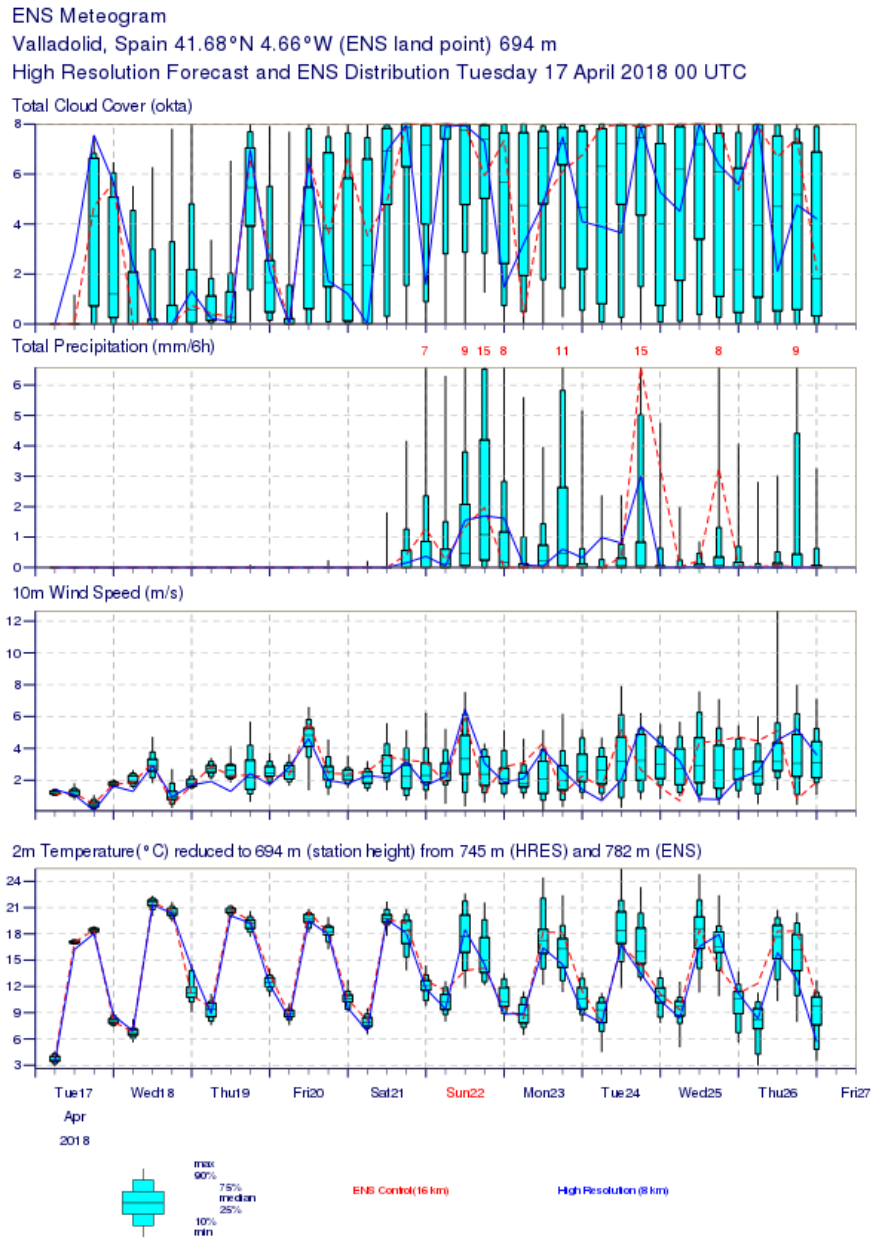
(Manuscript received 18 November 1962, in revised form 7 January 1963)

ABSTRACT

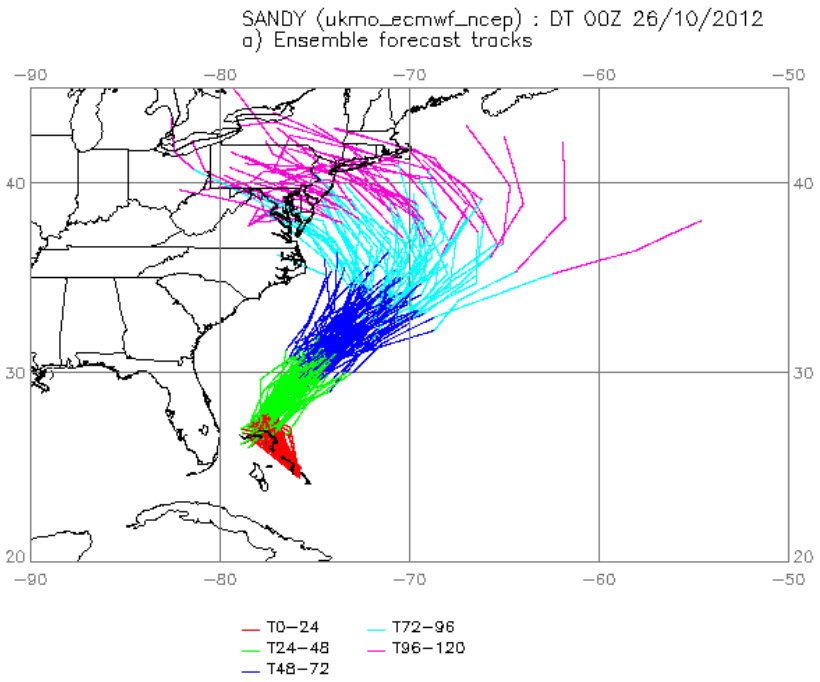
1. Introduction

25

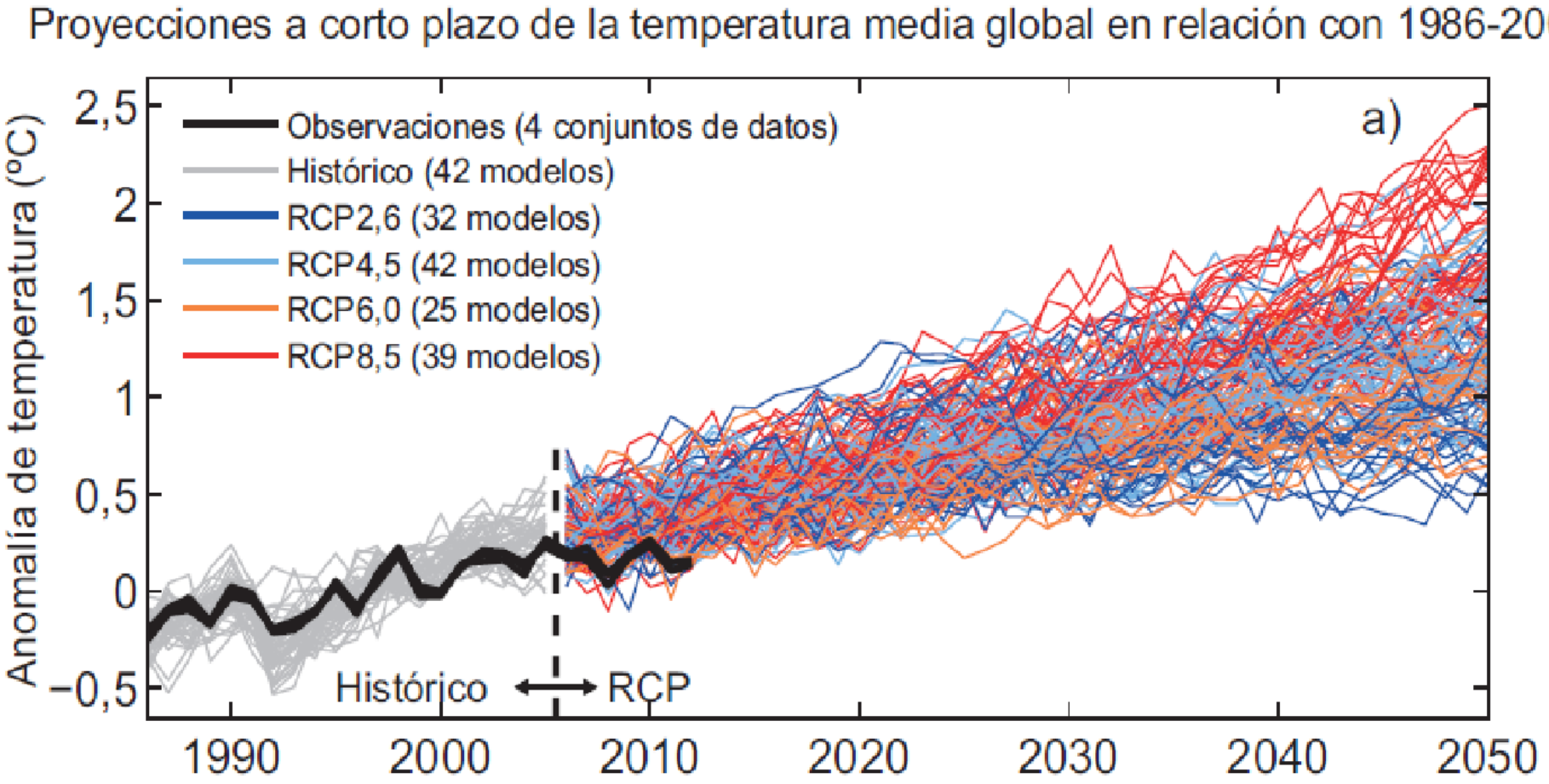
Edward Norton Lorenz (1963)



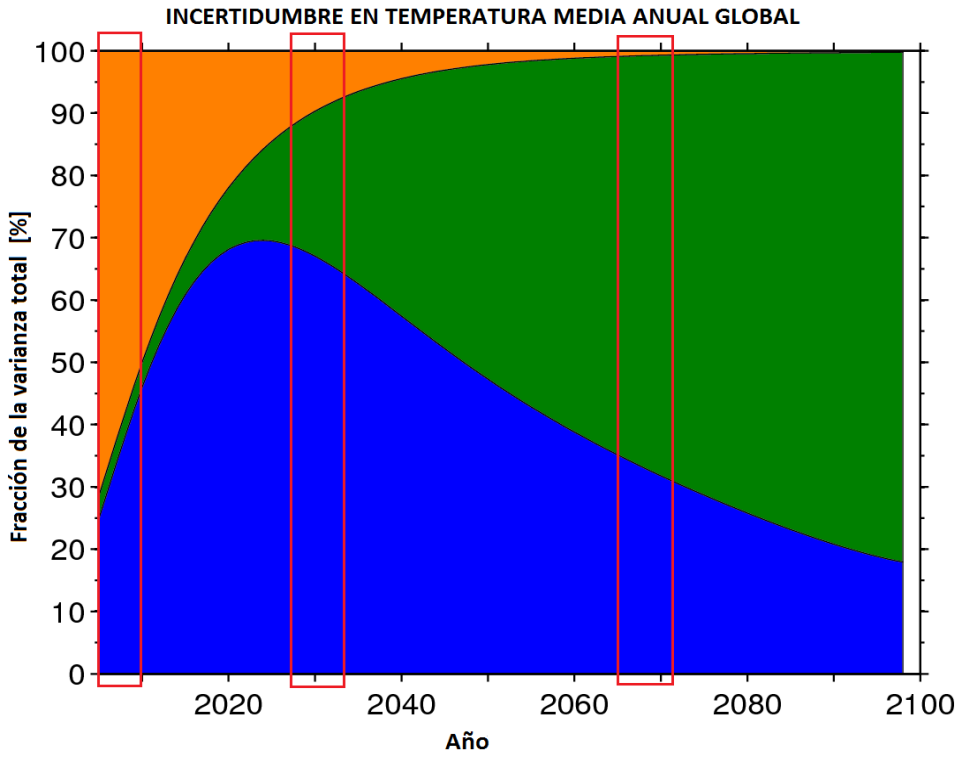
Predicciones con expresión de su incertidumbre en el corto/medio plazo

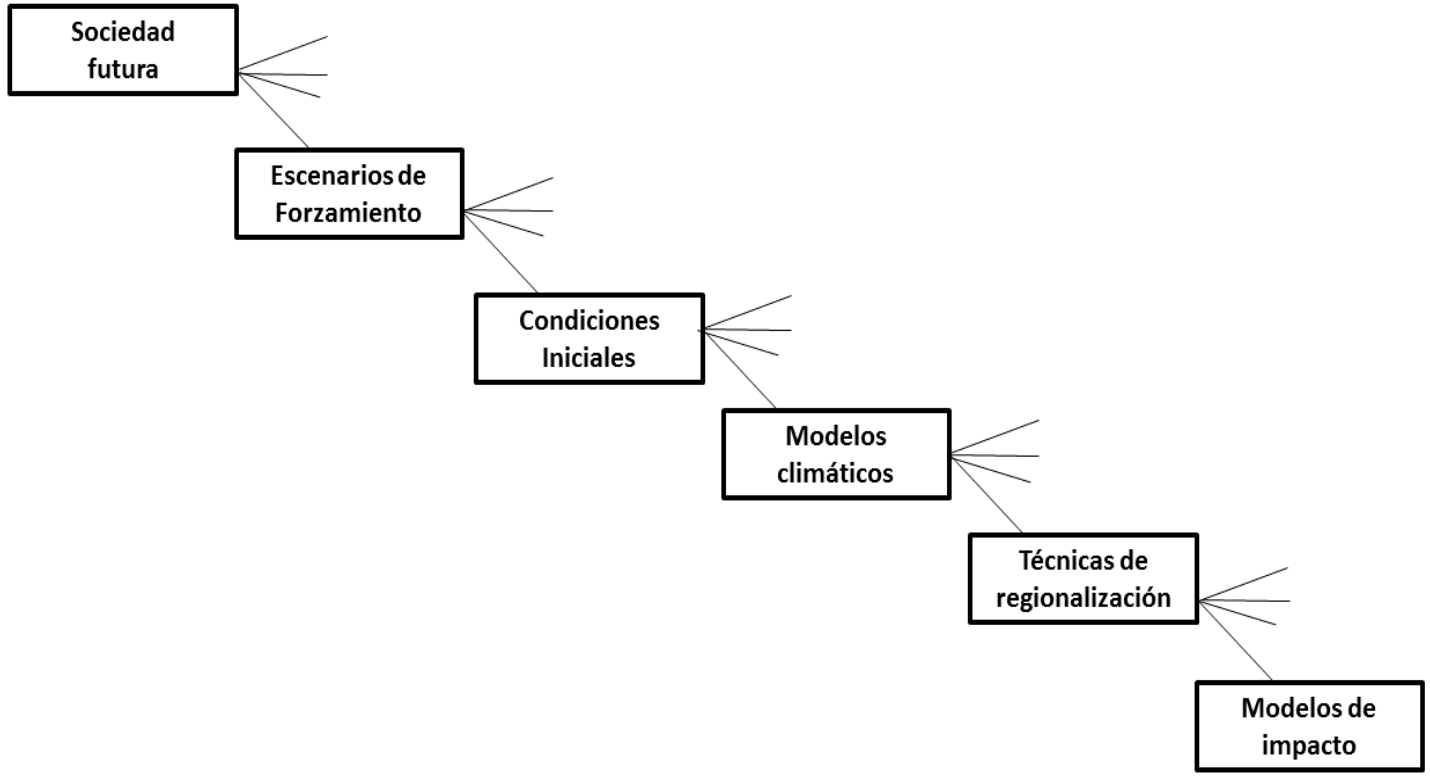


Proyecciones con expresión de su incertidumbre en clima

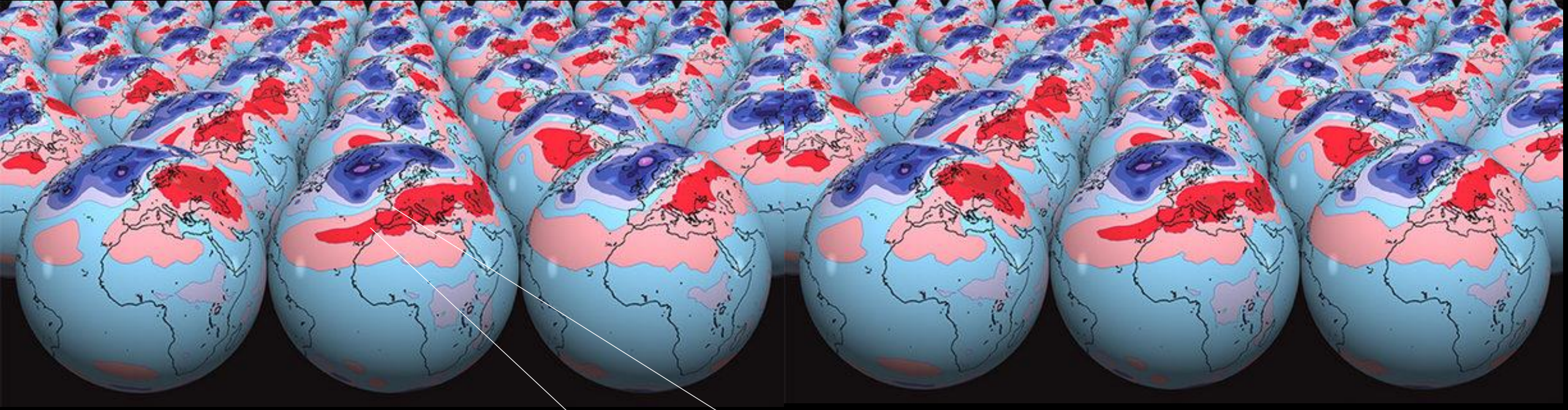


Incertidumbres que afectan a las proyecciones de cambio climático en forma jerárquica

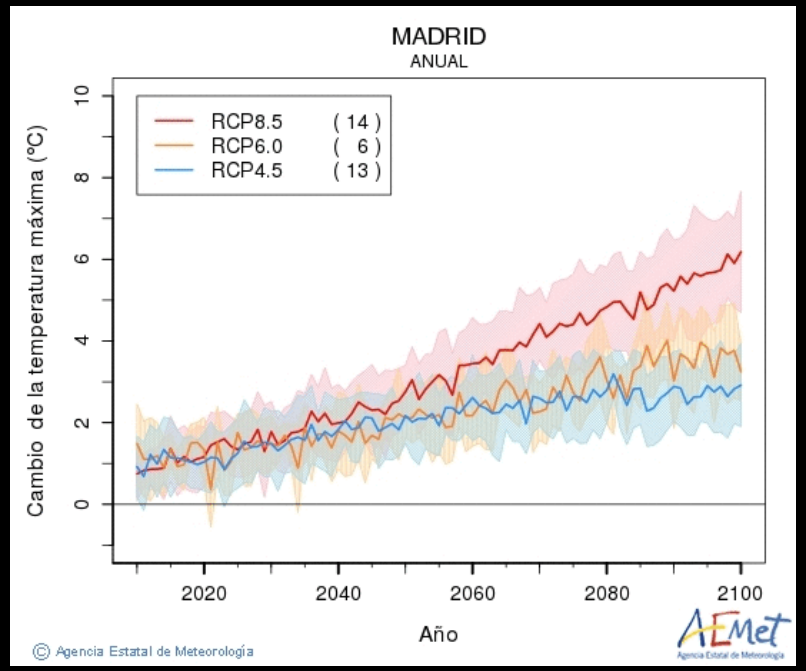




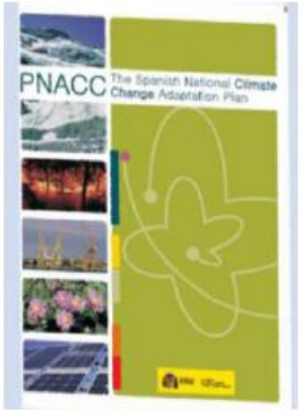
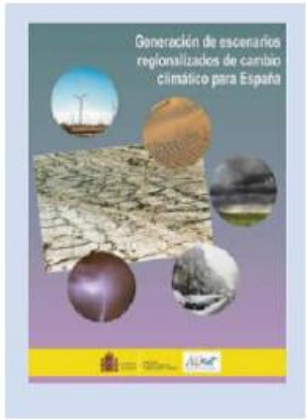
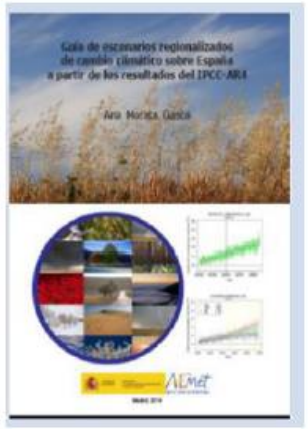
Contribuciones relativas de tres fuentes de incertidumbre: condiciones iniciales (naranja), modelos climáticos (azul), escenarios de emisión (verde). (Fuente: Kirtman et al. 2013, modificado).

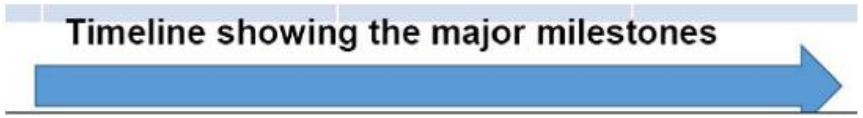


Regionalización de muchos modelos globales con diferentes técnicas (dinámicas y estadísticas) para estimar las incertidumbres asociadas



Timeline showing the major milestones in the AEMET strategy

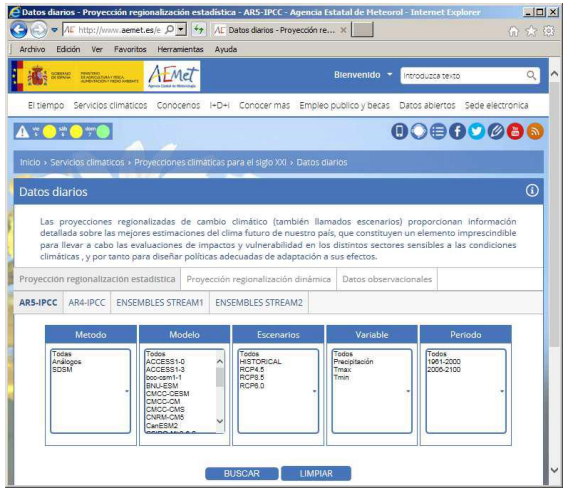
2006	2008	2014	2017
Spanish National Climate Change Adaptation Plan (PNACC) mandated AEMET to develop production and update of downscaled climate change projections in coordination with the academic and research community.	First delivery of periodical revision of regional projections with the best and current data available from GCMs, observations and regionalization techniques (TAR, PRUDENCE)	Second delivery of regional projections (aemet webpage published graphical results and daily and monthly aggregated data. A4 data & ESCENA and ESTCENA data, projects financed by the Spanish Ministery of Environment).	Third delivery of Regional projections by AEMET. Statistical methods of regionalisation (AR5) & dynamical regionalized projections from CORDEX Projects.
	1st Document Brunet et al. (2008)	2nd Document Morata-Gasca (2014)	3rd Document Amblar-Francés et al. (2017)
			



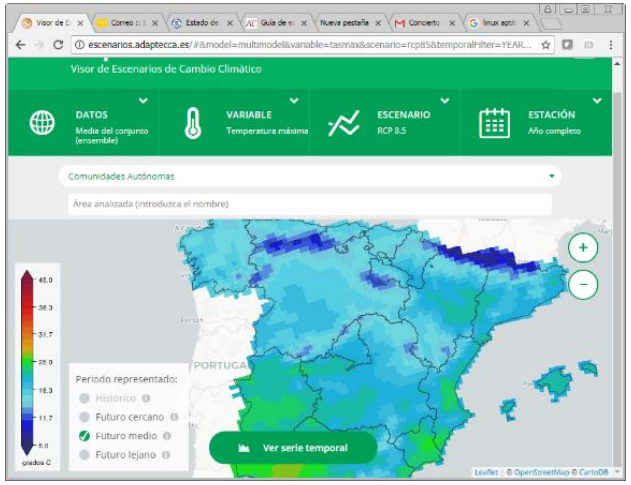
AEMET tiene el mandato por parte del PNACC de generar y coordinar el esfuerzo en la producción de escenarios regionalizados de cambio climático

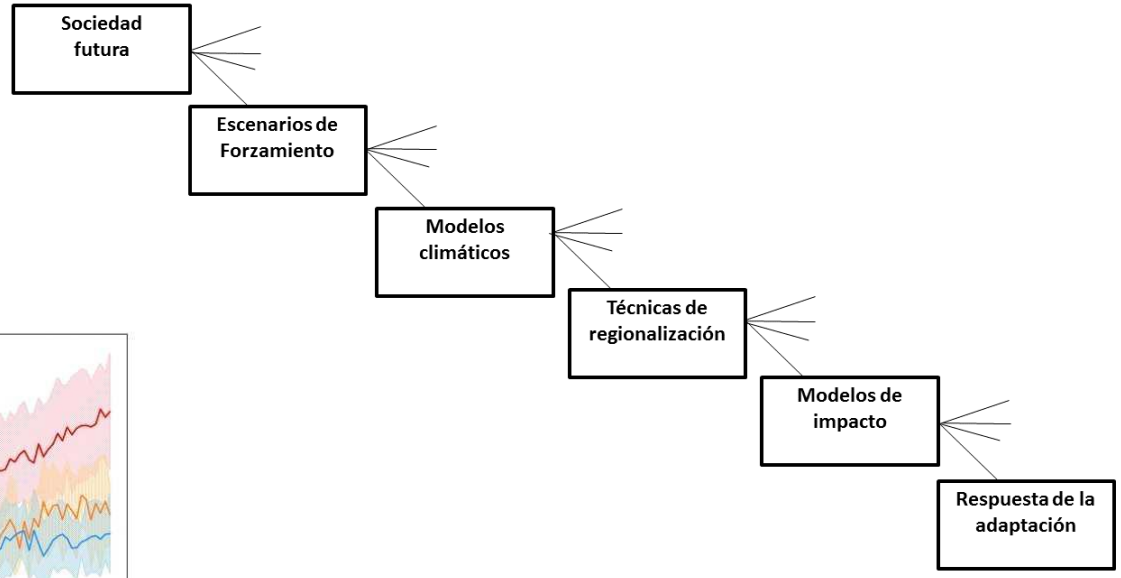
PNACC
Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático

Portal de datos

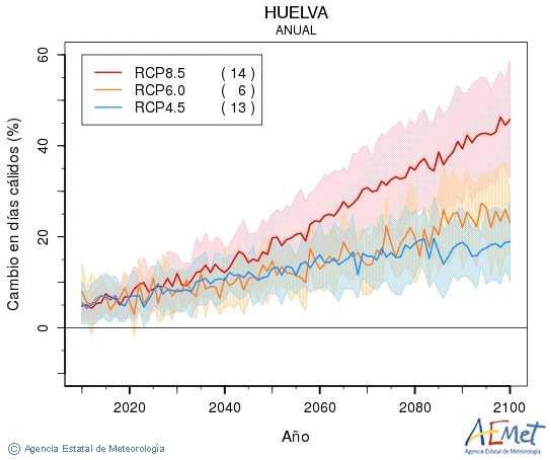


Visor





Especial énfasis en la cuantificación de las incertidumbres asociadas a las diferentes fuentes: escenarios de emisión, modelos globales, técnicas de regionalización, etc.



- Explotación de proyecciones regionalizadas dinámicamente (CORDEX)
- Generación de proyecciones regionalizadas estadísticamente

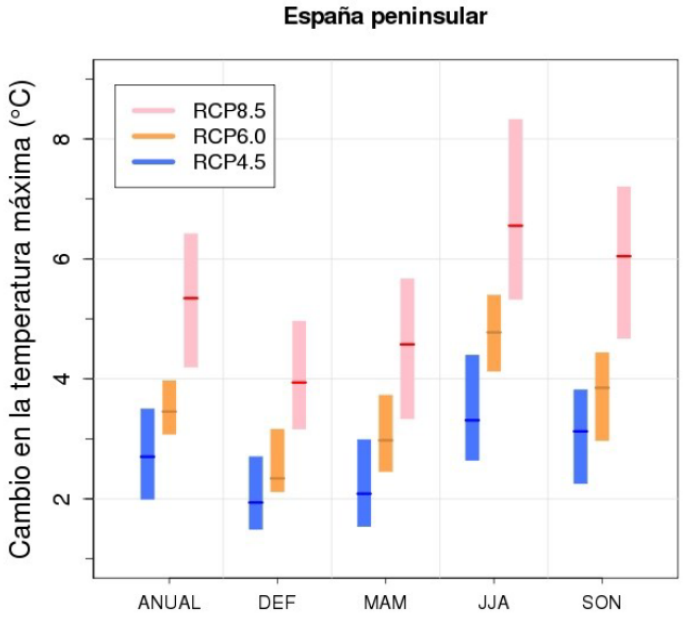


Figura 3.2. Cambios en los valores medios anuales y estacionales de la temperatura máxima de la España peninsular obtenido a partir de todas las proyecciones generadas (por los dos métodos estadísticos: análogos y regresión y por la técnica dinámica) bajo tres escenarios de emisiones (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) y para los últimos veinte años del siglo XXI (2081-2100). La línea central indica la mediana de las proyecciones y la barra el rango entre los percentiles 17 y 83.

Escenario	TEMPERATURA				PRECIPITACIÓN			
	Análogos	Regresión	CORDEX	Total	Análogos	Regresión	CORDEX	Total
RCP8.5	14	19	10	43	17	19	10	46
RCP6.0	6	7		13	7	7		14
RCP4.5	13	15	10	38	18	15	10	43
Total	33	41	20	94	42	41	20	103

Tabla 2.4. Proyecciones regionalizadas de temperatura (máxima y mínima) y precipitación obtenidas por métodos de regionalización estadística (análogos y regresión) y regionalización dinámica (CORDEX).

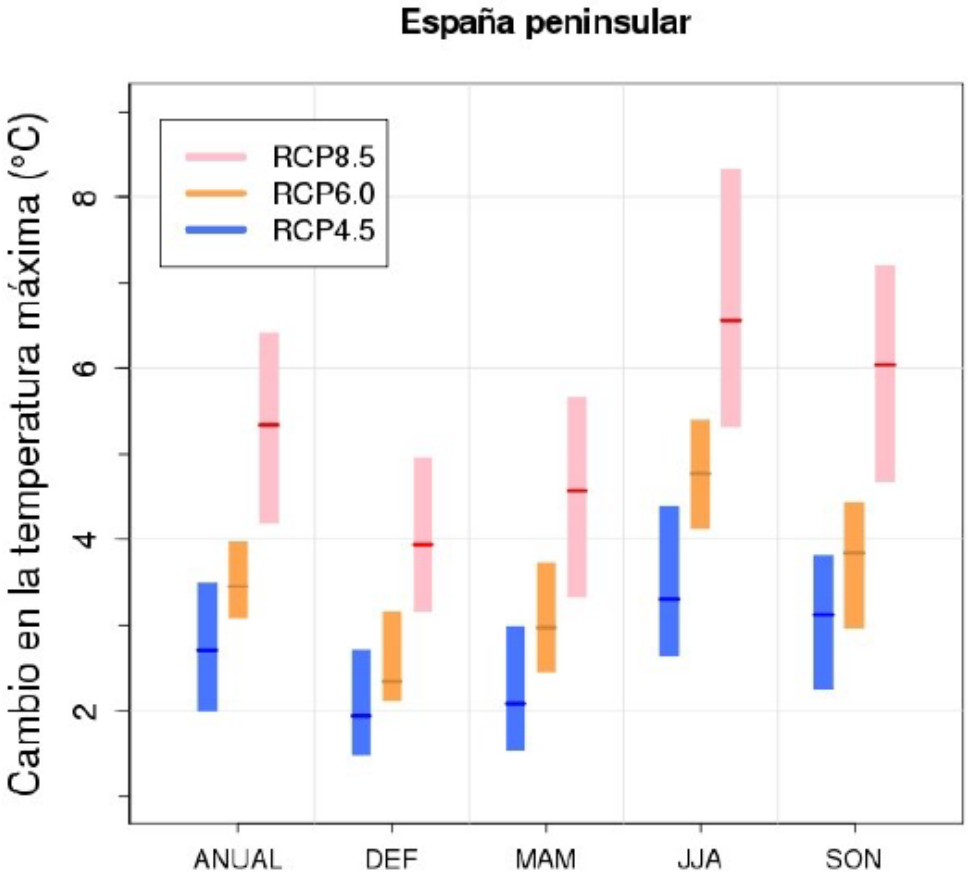
Algunos resultados para España peninsular e Illes Balears

(agregando resultados de diferentes modelos globales y métodos de regionalización)

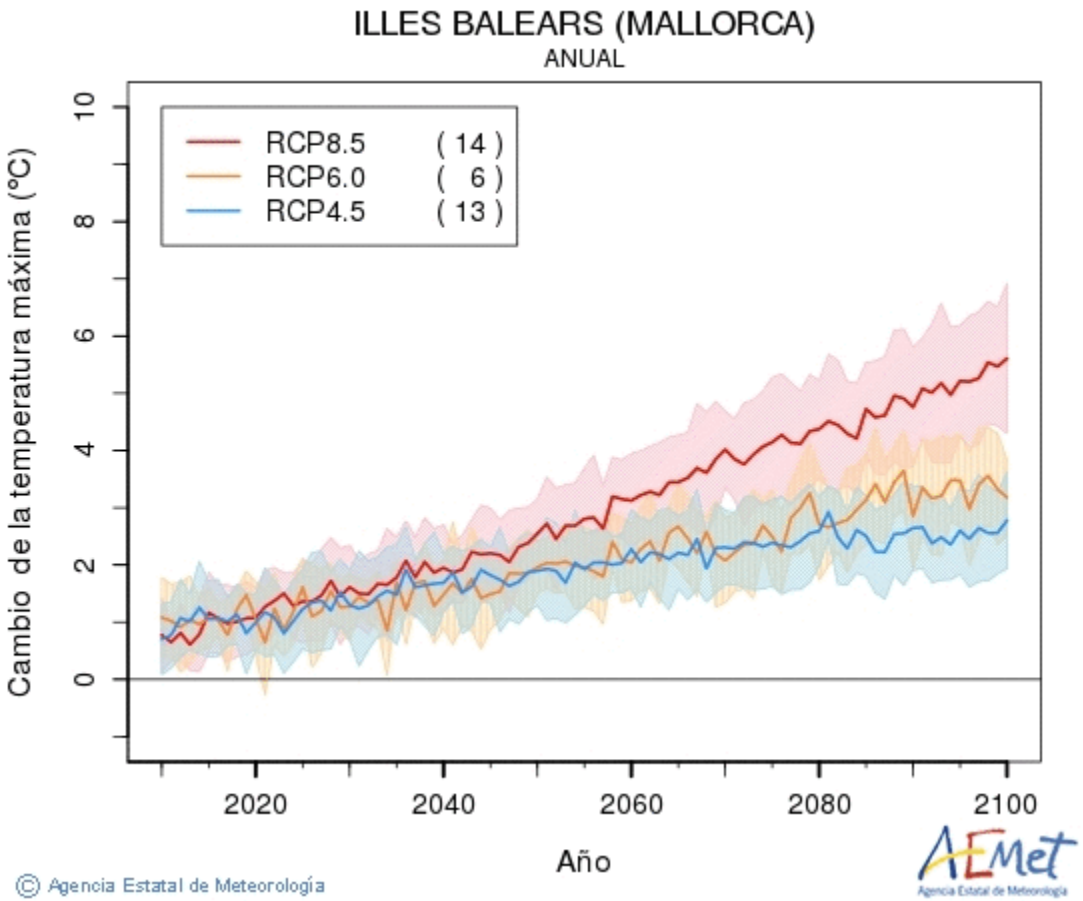
Más resultados en:

repositorio de AEMET: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/
y
visor de Adaptecca: http://escenarios.adaptecca.es/

Cambio en la temperatura máxima (I)

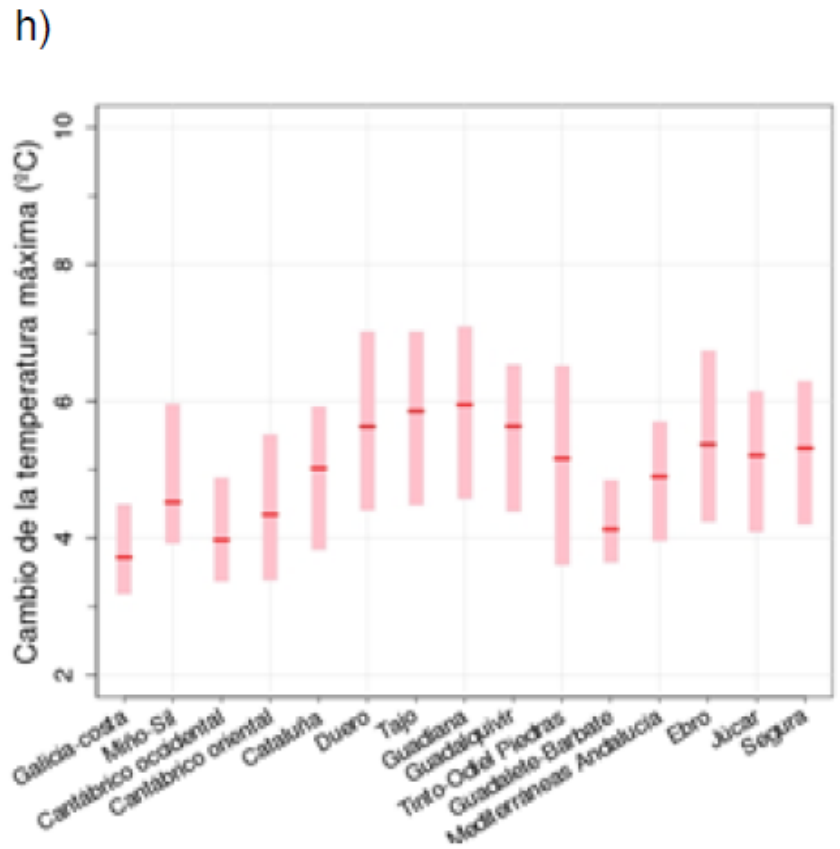


(Agregación de todas las regionalizaciones estadísticas y dinámicas)



(Regionalización estadística basada en análogos)

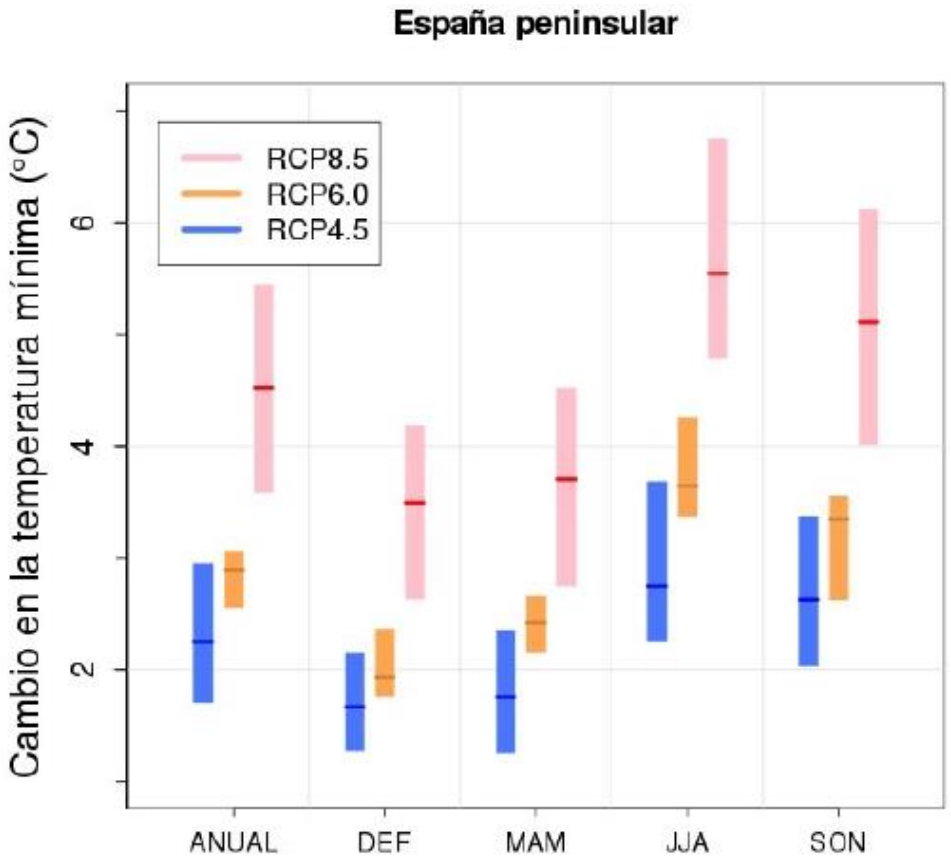
Cambio en la temperatura máxima (II)



- Para la España peninsular y para el periodo (2081-2100) en la escala anual:
  - **4.2 ºC - 6.4 ºC bajo RCP8.5**
  - **3.0 ºC y 4.0 ºC bajo RCP6.0**
  - **2.0 ºC y 3.4 ºC bajo RCP4.5.**
- Los cambios esperados **en verano son superiores** al resto de las estaciones, con promedios **superiores a los 5 ºC**, apreciándose mayor incertidumbre tanto debida a los modelos como a las técnicas de regionalización.
- Atendiendo a la distribución espacial del cambio medio de esta variable para finales de siglo, se observa que los **aumentos pueden ser mayores en el interior y menores en el norte y noroeste peninsular**. En consonancia, se tendrían incrementos mayores en las grandes cuencas y menores en las cuencas de Galicia costa y del Cantábrico occidental.

(Agregación de todas las regionalizaciones estadísticas y dinámicas)

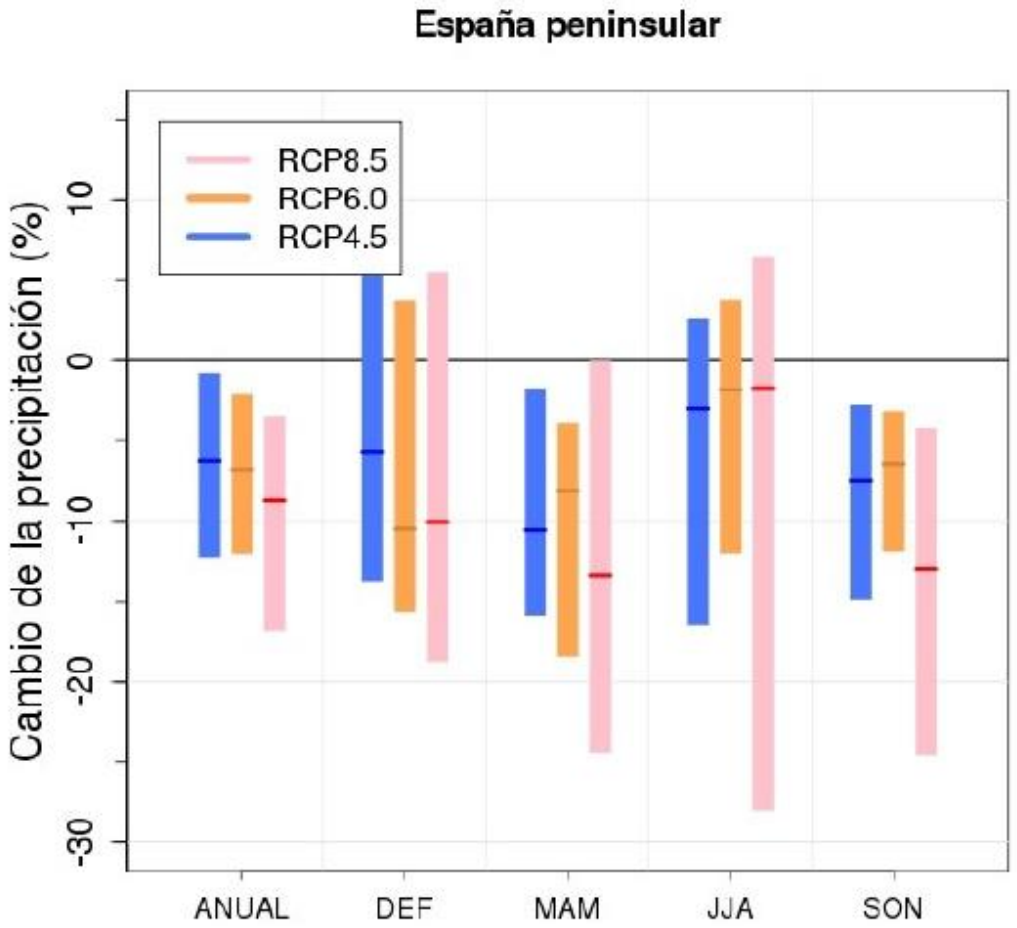
Cambio en la temperatura mínima (I)



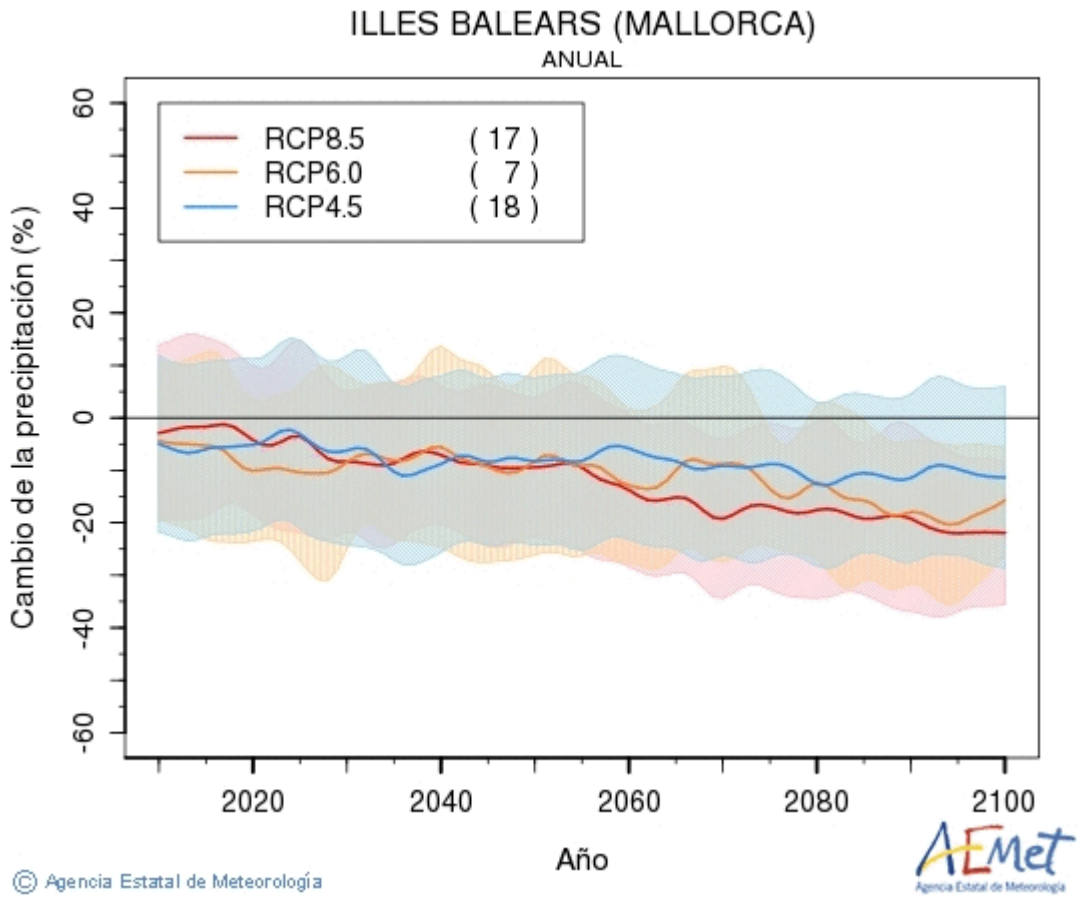
(Agregación de todas las regionalizaciones estadísticas y dinámicas)

- Para la España peninsular para el periodo (2081-2100), las variaciones tenderían a estar comprendidas para la escala anual entre:
  - **3.7 ºC y 5.5 ºC bajo RCP8.5**
  - **2.7 ºC y 3.1 ºC bajo RCP6.0**
  - **1.7 ºC y 2.9 ºC bajo RCP4.5**
- **Aumento mayor para verano y otoño** y para los escenarios más emisivos. Para finales de siglo y bajo RCP8.5 estaría entre 4.8 ºC y 6.8 ºC en el verano.
- Atendiendo a la distribución espacial tanto en la escala anual como estacional, se tendría **incremento de temperaturas mayores en el interior y en el este peninsular** y menores en el norte; siendo también más acusado el aumento en el interior que en las costas. Se observa un aumento de la incertidumbre con el alcance de la proyección. La cuenca hidrográfica que muestra calentamiento menor es Galicia costa y los mayores son las que se sitúan en la parte Oriental.

Cambio en la precipitación (I)



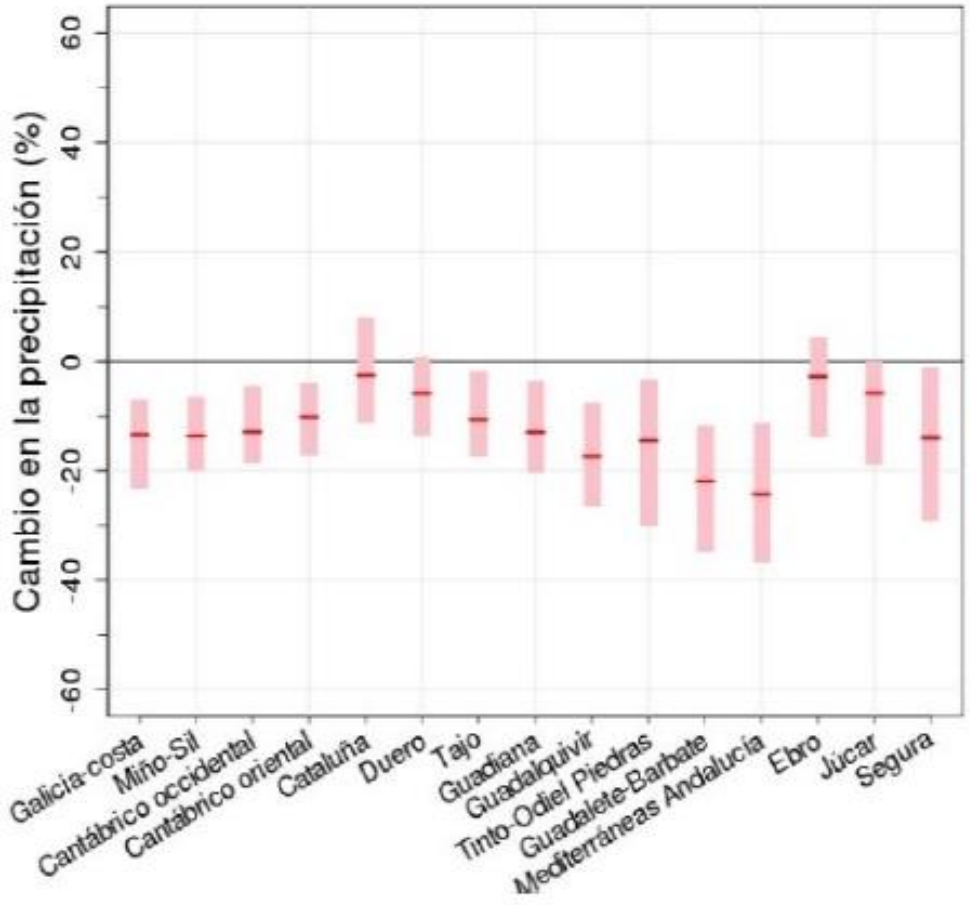
(Agregación de todas las regionalizaciones estadísticas y dinámicas)



(Regionalización estadística basada en análogos)

Cambio en la precipitación (II)

España peninsular

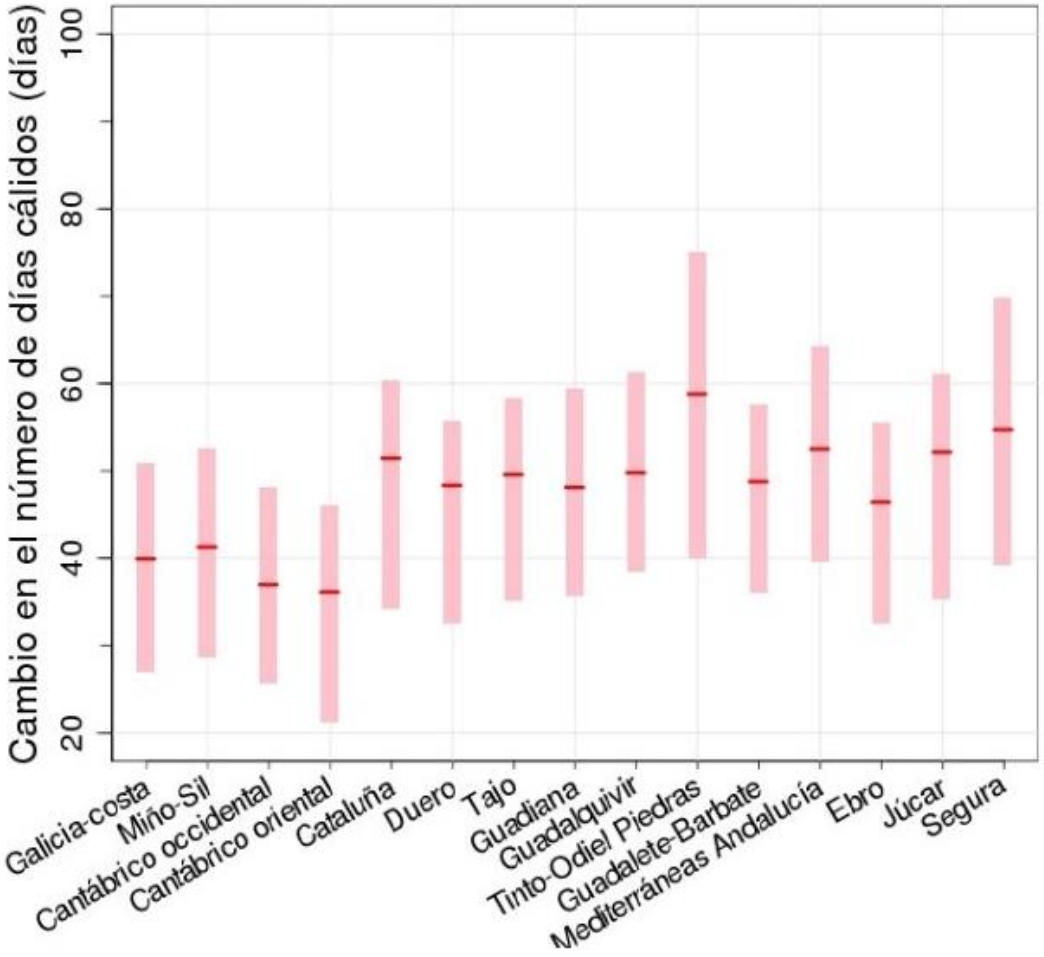


- **Menor concordancia en el sentido** que se produciría el cambio. Las incertidumbres asociadas a los modelos y técnicas de regionalización predominan.
- **Reducción de las precipitaciones medias** en la España peninsular para los últimos veinte años del siglo XXI, con valores relativos a los del periodo de referencia (1961-1990) entre un **16 % y un 4 %.** En la primavera esta reducción estaría entre el 24 % y el 0 % mientras que en el otoño la horquilla iría del –4 % al 4 %.
- En **invierno, mayor concordancia** en el sentido del cambio en el **sur y el Levante**, junto con los dos archipiélagos con las reducciones relativas más importantes (p.e., Med. Andalucia entre -18% y –38% para finales de siglo (RCP8.5)).
- En el **verano**, mayor concordancia con reducción de las mismas en Galicia **(- 6 % y -42 %** para el final del siglo y para RCP8.5).

(Agregación de todas las regionalizaciones estadísticas y dinámicas)

Cambio en el número de días cálidos

España peninsular

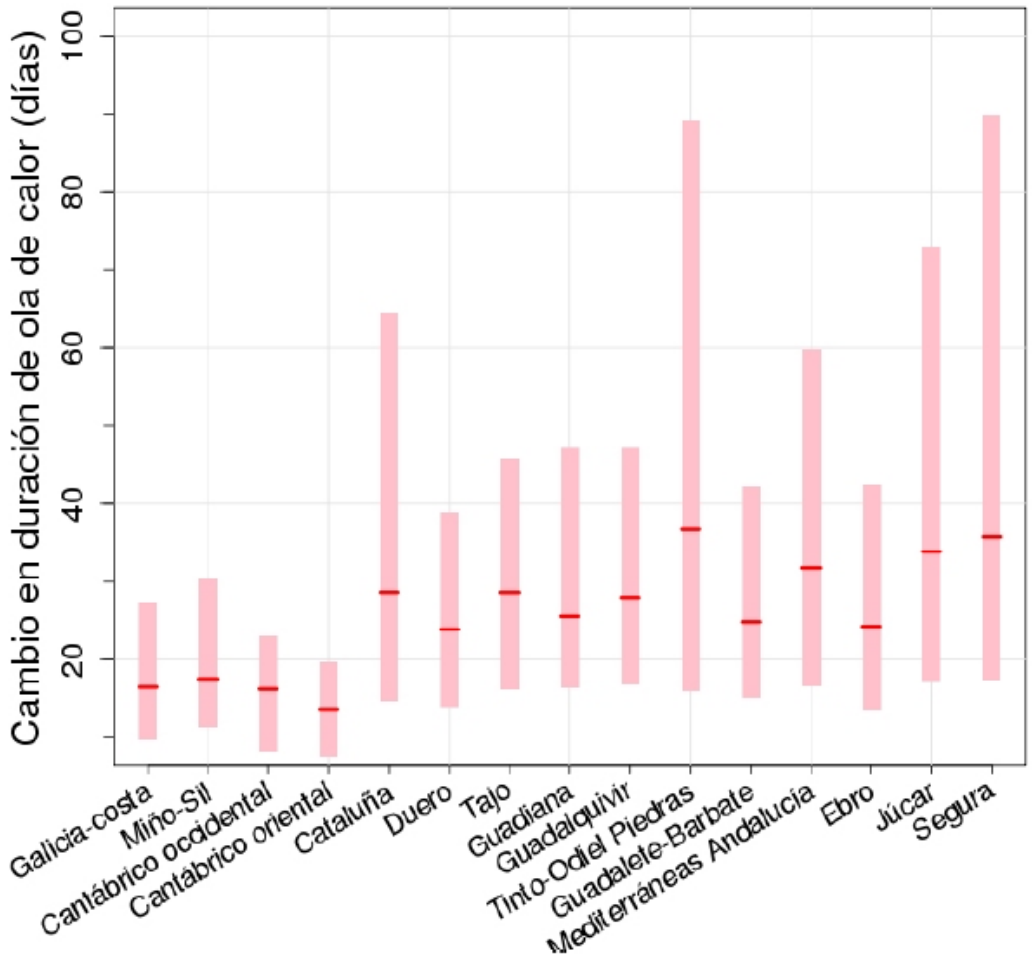


(Agregación de todas las regionalizaciones estadísticas y dinámicas)

- El número de días cálidos muestra un aumento progresivo a lo largo del siglo XXI para los tres escenarios analizados tanto en la España peninsular como en Baleares y Canarias. Para finales del siglo XXI, a nivel de España peninsular, el incremento de la proporción de días cálidos se podría situar entre **37 % y 60 %** para el escenario más emisivo (**RCP8.5**).

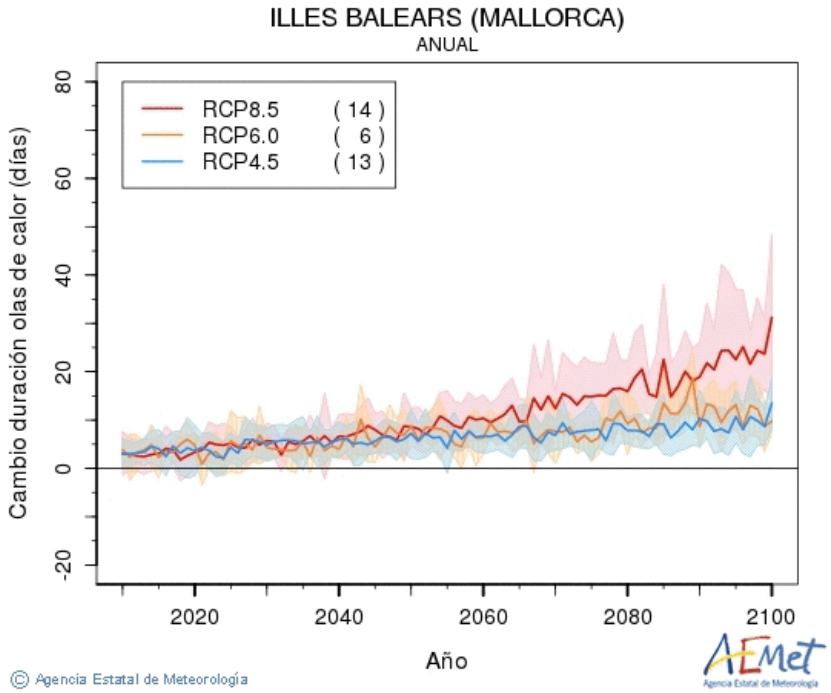
Cambio en la duración de olas de calor

España peninsular



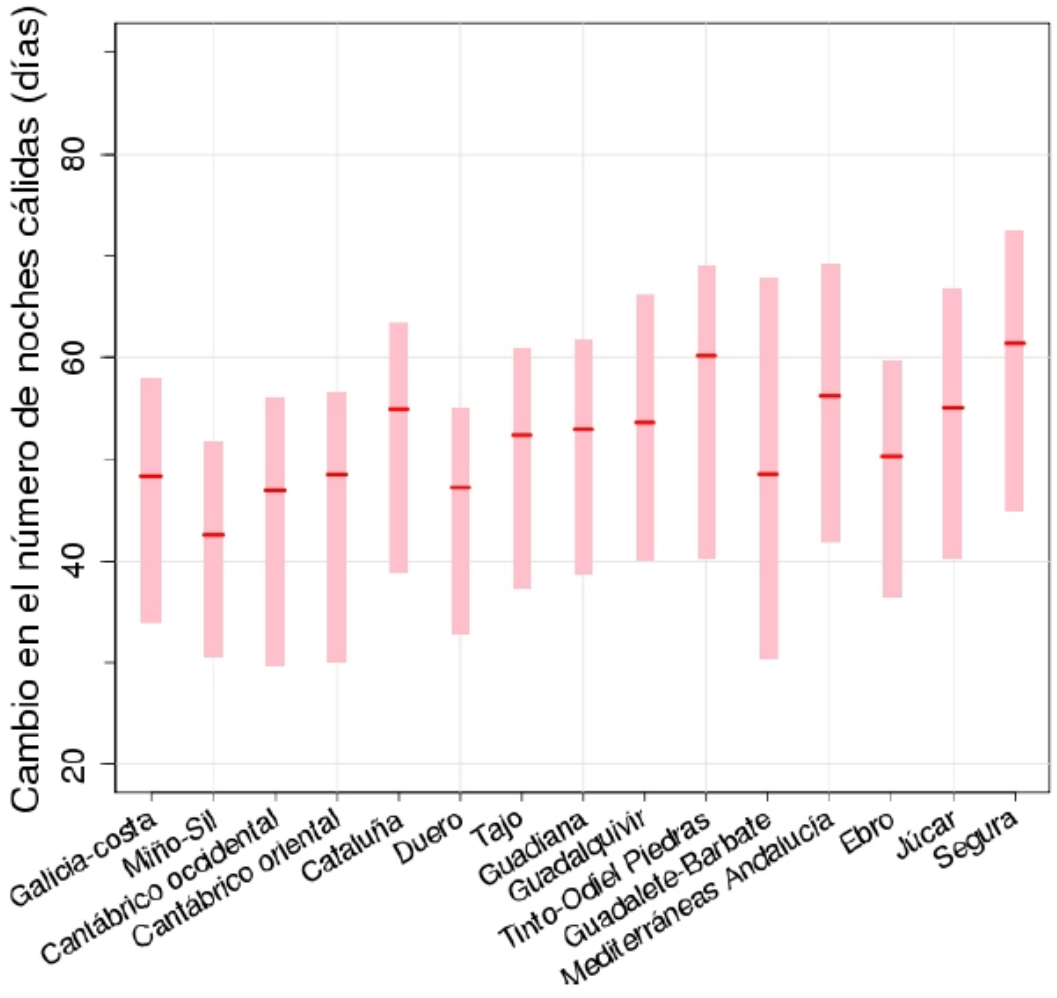
(Agregación de todas las regionalizaciones estadísticas y dinámicas)

- La duración máxima de las olas de calor va **aumentando a lo largo del siglo XXI**, existiendo una concordancia entre todas las proyecciones generadas en que las olas de calor serán más largas, siendo este **incremento más acusado en el escenario más emisivo (RCP8.5)** y a finales del siglo XXI, pero con algunas **diferencias en la magnitud del mismo de unos modelos a otros y de una técnica de regionalización a otra**.

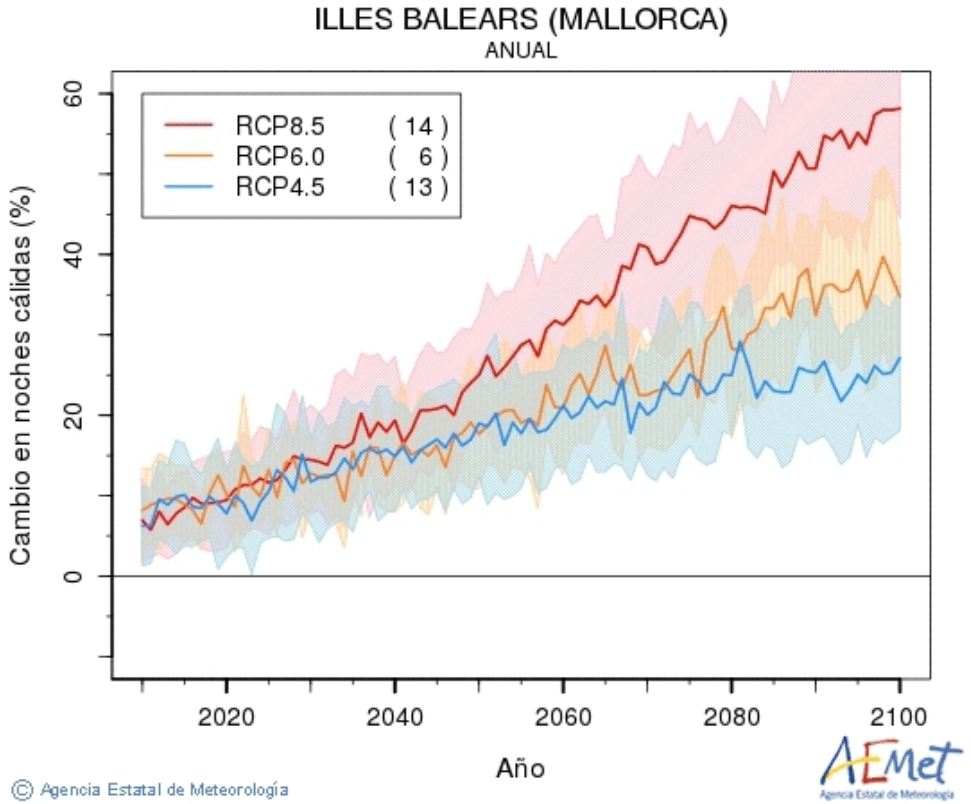


Cambio en el número de noches cálidas

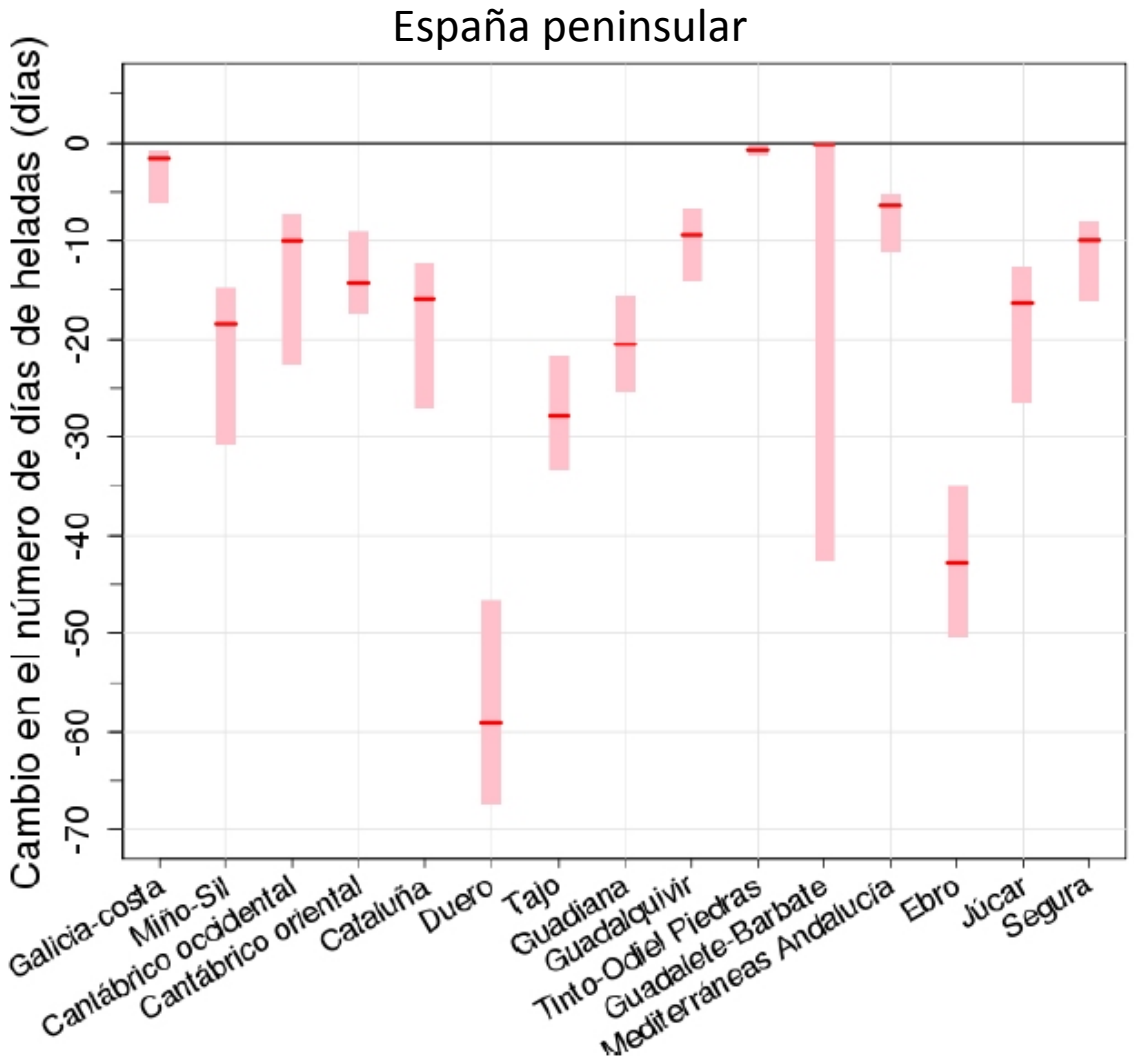
España peninsular



- El cambio en el número de noches cálidas en la España peninsular muestra, en líneas generales, un **aumento progresivo a lo largo del siglo XXI**, siendo más rápido bajo el escenario más emisivo (RCP8.5).



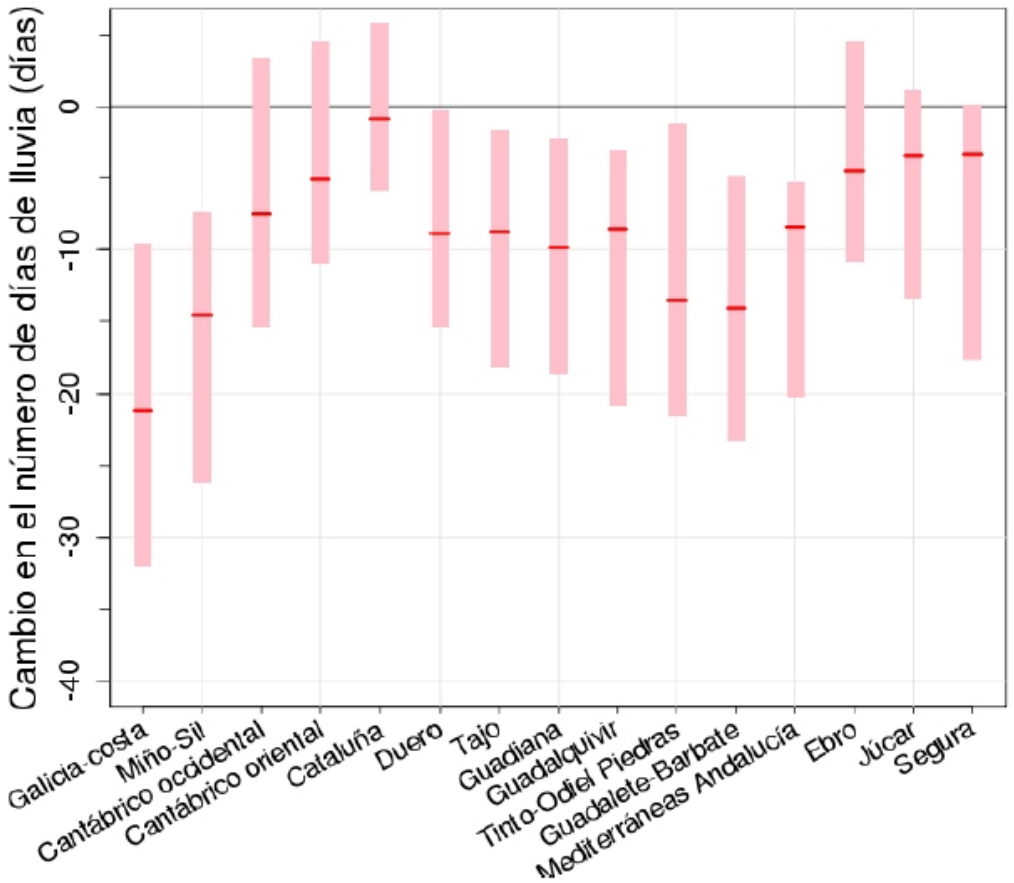
Cambio en el número de días de helada

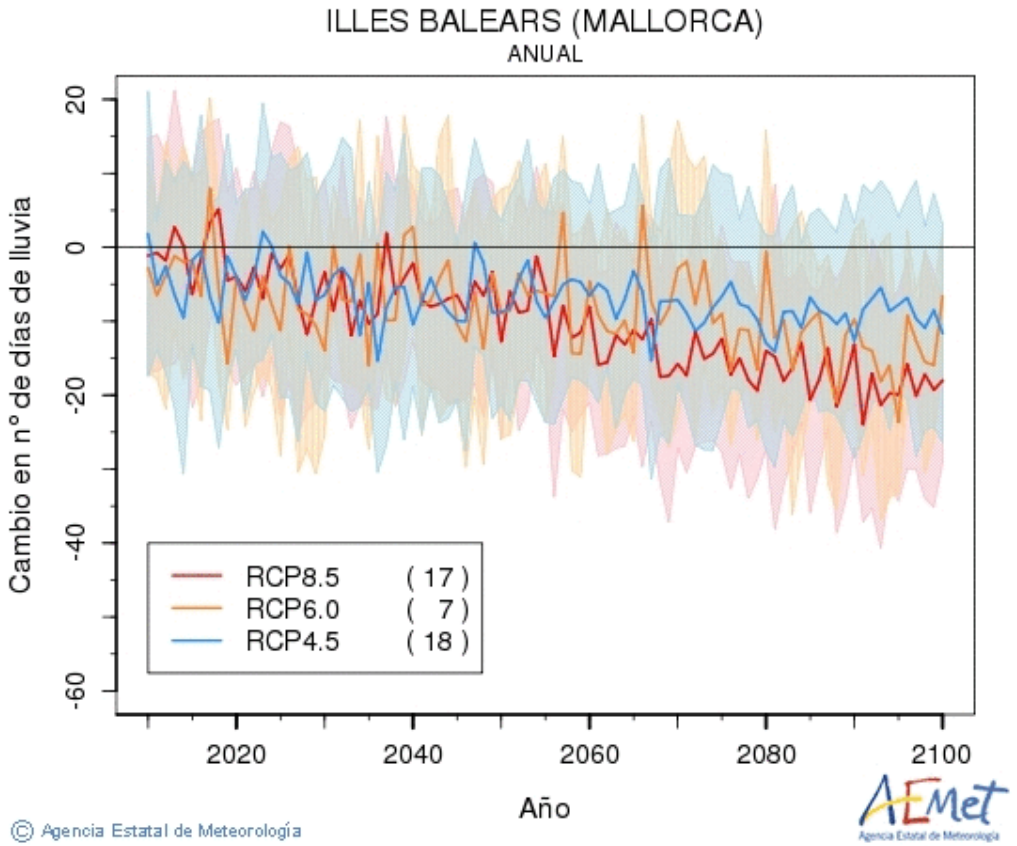


- Para la España peninsular, se observa una disminución en el número de días de helada en la escala anual, con una evolución muy similar entre los escenarios hasta 2050 y un **descenso más pronunciado para el escenario más emisivo (en torno a los 20 días** para ambos métodos de regionalización).

Cambio en el número de días de precipitación

España peninsular

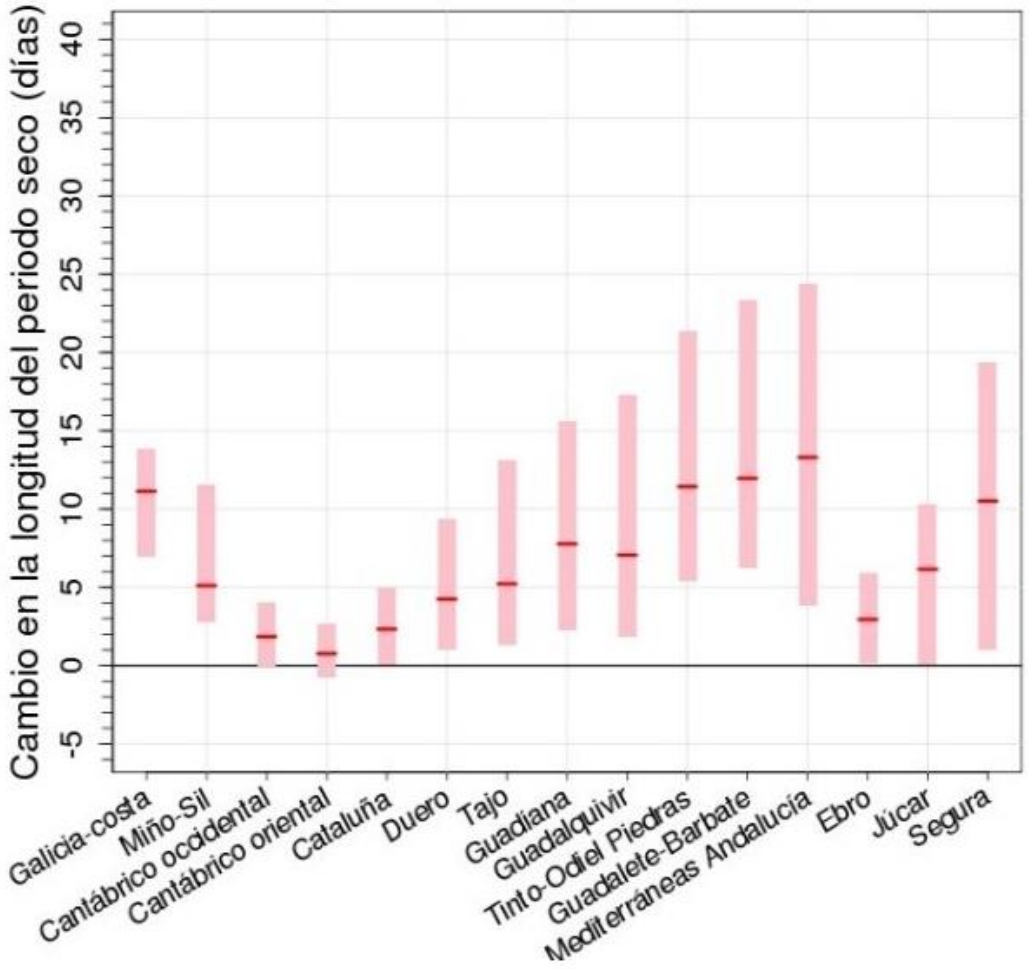




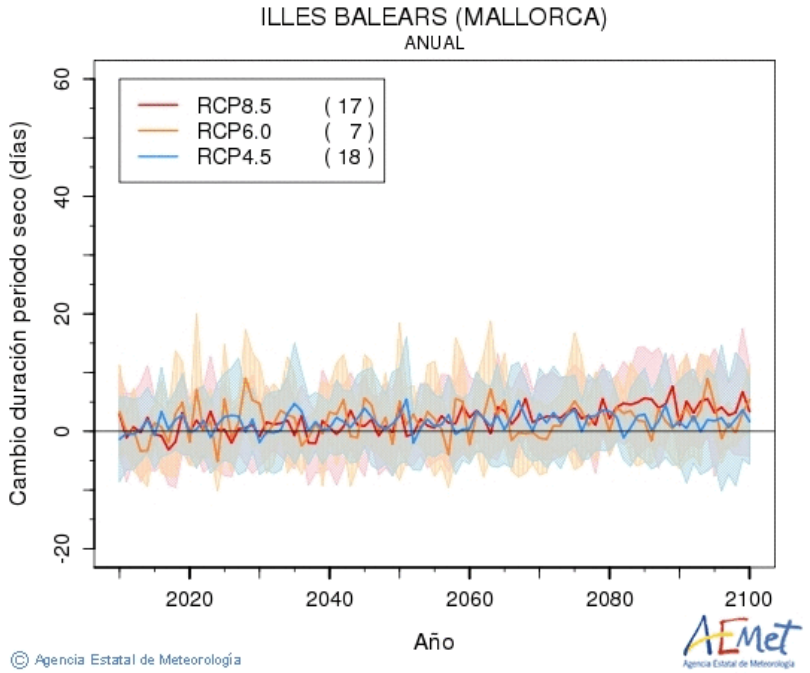
- La variación anual del número de días de precipitación respecto al periodo de referencia muestra un comportamiento independiente de los escenarios, con un **predominio de la disminución.**

Cambio en el periodo seco más largo del año

España peninsular

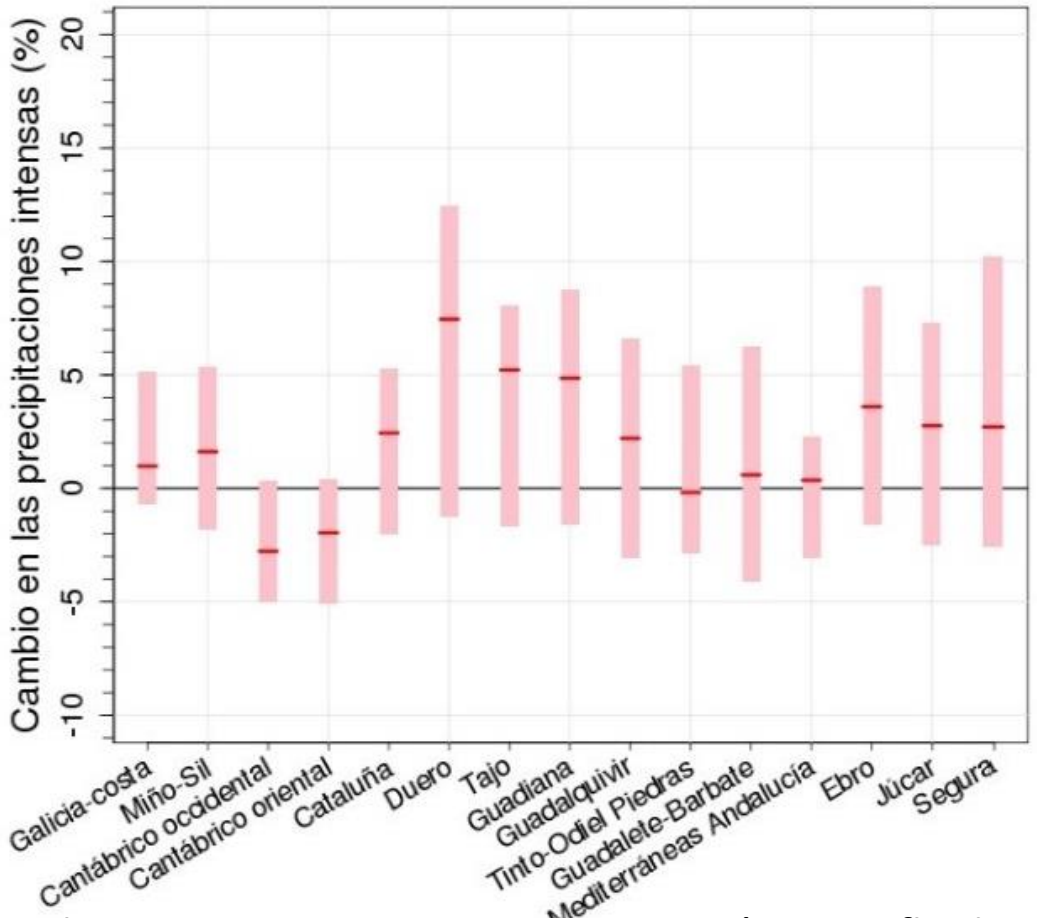


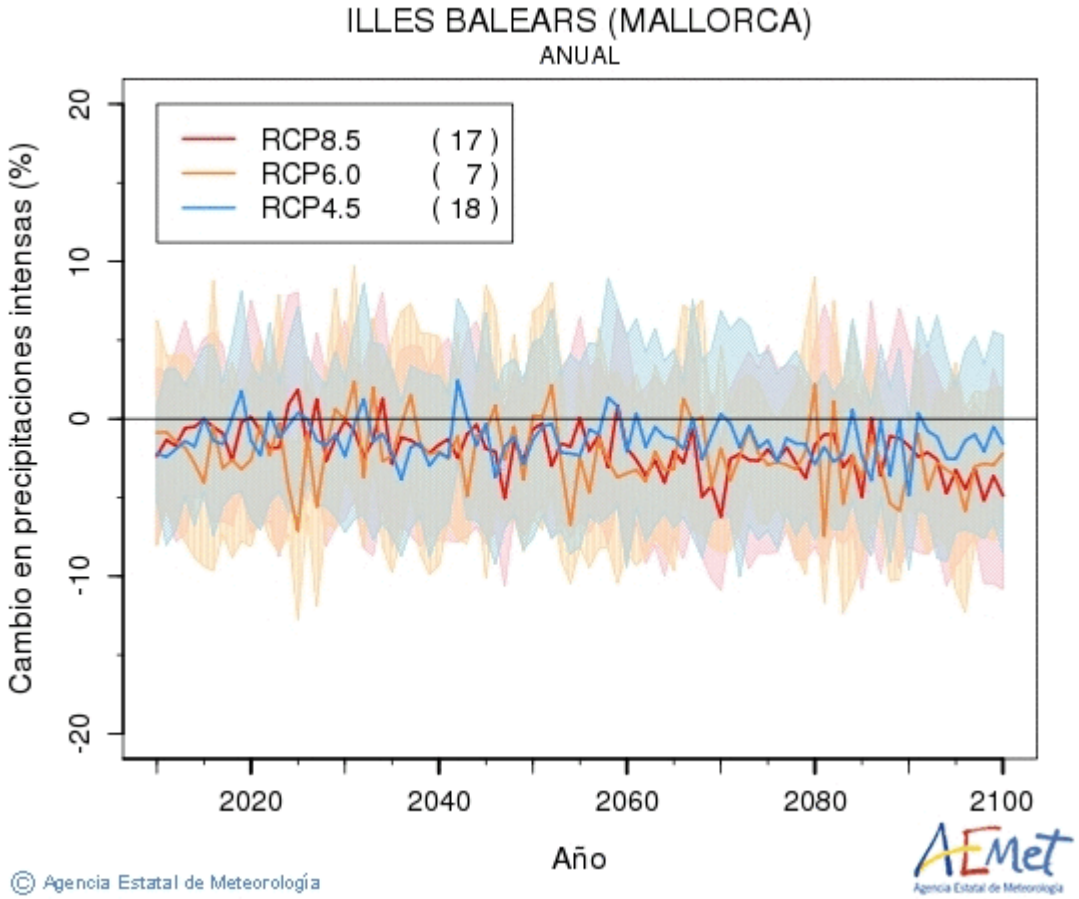
- En la duración del periodo seco, para finales de siglo (2081-2100) y bajo el escenario RCP8.5, todos los métodos y modelos dan valores superiores a los registrados en el periodo de referencia 1961-1990, pudiendo ocurrir **que el periodo seco más largo del año se incremente, en promedio, entre 3 y 10 días** respecto de dicho periodo.



Cambio en precipitaciones intensas

España peninsular





El cambio en precipitaciones intensas está muy influido por los métodos de regionalización, obteniéndose **resultados poco sólidos.**

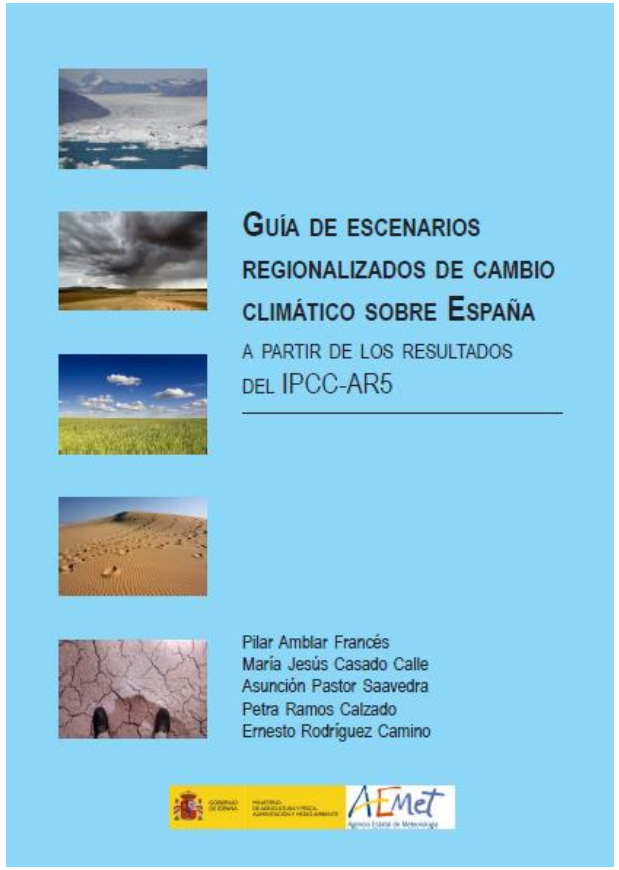
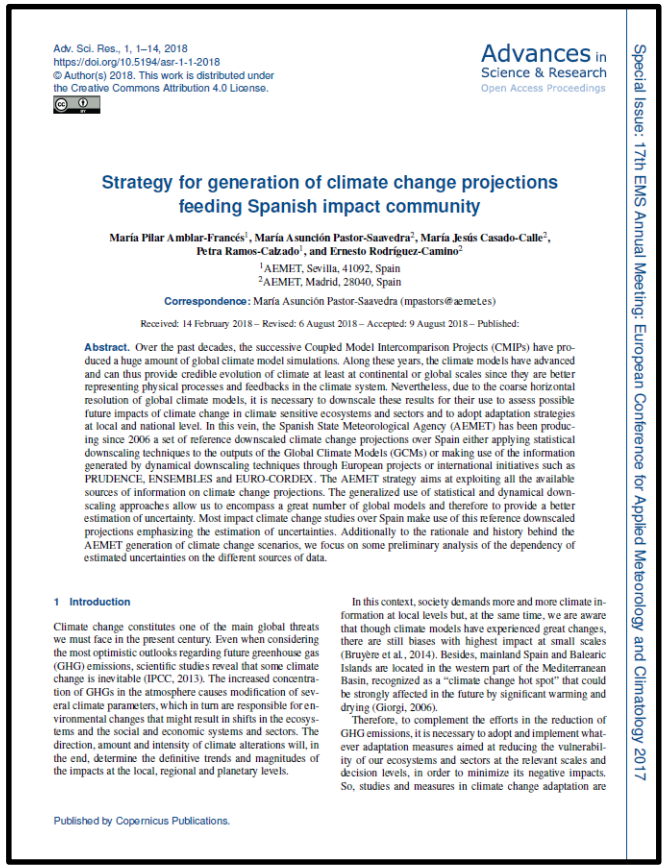
Toda la información de escenarios regionalizados en un portal/visor único que permite explorar por zonas, escenarios de emisión, modelos, métodos de regionalización, etc

Resumen

- Con **matizaciones regionales y dependiendo del escenario de emisión** se espera:
    - aumento de Tmax y Tmin,
    - olas de calor mas larga e intensas,
    - reducción de la precipitación acumulada
    - mayor duración de los periodos secos,
    - aumento de precipitaciones intensas,
    - reducción de evapotranspiración y escorrentía.
- En términos generales se estima que según la clasificación de Köppen–Trewartha para España que **aumente** el área del tipo **Cs (subtropical summer-dry) y Cr (subtropical humid)** y se **reduzca** notablemente el área del tipo **DC (temperate continental).** El tipo **BS (dry semiarid)** avanza en el **SE**

Comentarios finales

- Desde **2006 AEMET ha producido y coordinado** rutinariamente escenarios de cambio climático para el PNACC
- Énfasis especial en la **estimación de las incertidumbres** utilizando toda la información disponible tanto generada por AEMET como procedente de proyectos e iniciativas externos
- En el futuro se intentará **complementar a Copernicus Climate Change Service (C3S)** en términos de resolución, expresión de incertidumbre, visualización, adaptación a las necesidades de los usuarios, y refuerzo de las relaciones con los principales usuarios nacionales.

¡Muchas gracias por su atención!

Más información: