

Una mirada al problema del Cambio Climático desde la Estadística

Carlos M. Madrid Casado

DPTO. MATEMÁTICAS
IES DIEGO VELÁZQUEZ DE TORRELODONES

DPTO. ESTADÍSTICA E INVESTIGACIÓN OPERATIVA II
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID



Meteorología y Climatología

- El tiempo es el estado de la atmósfera en un momento dado.
- El clima es el estado *normal* o *medio* de la atmósfera a lo largo de un periodo de tiempo suficientemente largo (aprox. 30 años).
- Climatología:
 - Sinóptica u observacional
 - Dinámica → ¡¡caos!! → Analítica-Estadística

Utilidad de los métodos estadísticos

Los procesos climáticos presentan una variabilidad espacial (regionalización, clusters) y temporal (no tanto estacional como interanual, p. ej. NIÑO +/-), que es fuente de **incertidumbre**.

La estadística permite el diagnóstico y el pronóstico:

- describir los datos climáticos;
- cuantificar la incertidumbre;
- realizar predicciones.

Además, el análisis estadístico puede sugerir la existencia de relaciones entre variables... ¡¡no necesariamente de causa-efecto!!

Métodos Estadísticos I

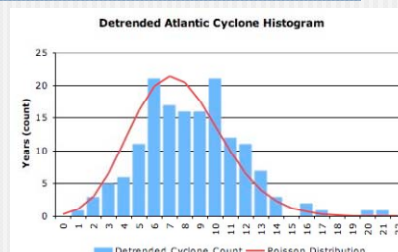
- Estadística descriptiva (análisis exploratorio de datos, estadísticos)
- Estadística inferencial (estimación paramétrica y no-paramétrica):
 - Inferencia frecuentista (intervalos de confianza, contraste de hipótesis)
 - Inferencia bayesiana
- Análisis Multivariante (correlación, regresión lineal y no lineal, predicción por ensembles...)

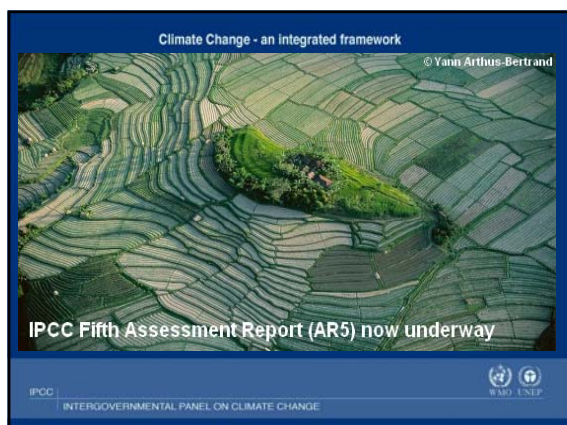
Métodos Estadísticos II

- Series Temporales: aislar componentes (tendencia, ciclo, estacional, ruido) mediante esquemas (aditivo, multiplicativo, mixto), medias móviles
- Toma de Decisiones: decisiones en ambiente de conflicto (teoría de juegos)

En concreto, estos métodos se emplean para detectar el Cambio Climático (sobre todo en cuanto a eventos extremos) y para generar escenarios climáticos futuros.

Daniel S. Wilks (2011): "Statistical Methods in the Atmospheric Sciences", Academic Press, Elsevier, 3ª edición.





Las tres hipótesis del Cambio Climático:

- Existe un *calentamiento global* de la Tierra.
- La causa principal del calentamiento global es el *efecto invernadero*.
- Y la causa principal del efecto invernadero son las emisiones de CO₂ de *origen humano*.

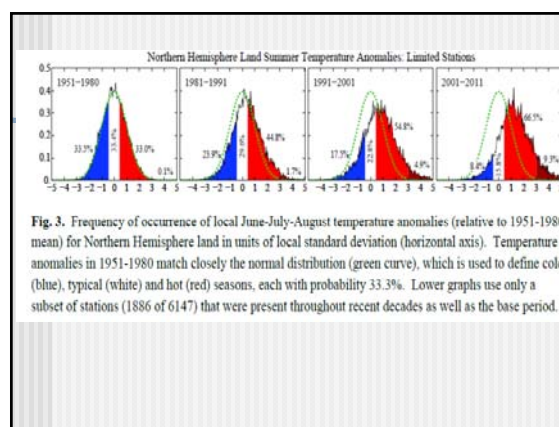
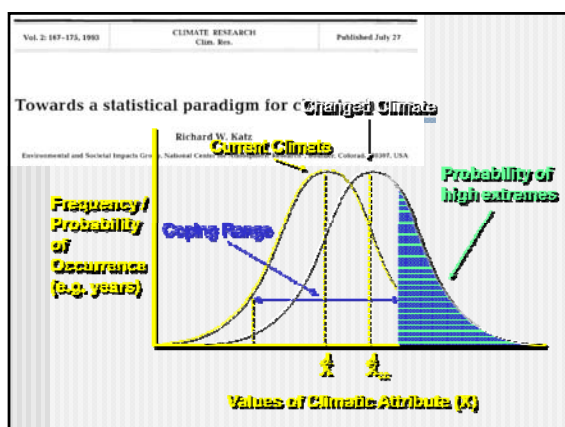
Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (ONU)

- "Es **probable** que haya habido un calentamiento antropogénico significativo durante los últimos 50 años como promedio en todos los continentes excepto en la Antártida."
- "Es **probable** que el calentamiento medio global en 2100 se encuentre en el intervalo de 2°C a 4,5°C, siendo la mejor estimación unos 3°C, y es **muy improbable** que sea menor de 1,5°C."

DEFINICIÓN DE LOS EXPERTOS DEL IPCC

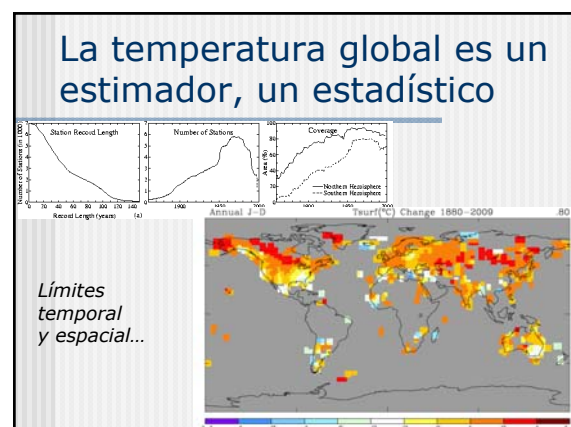
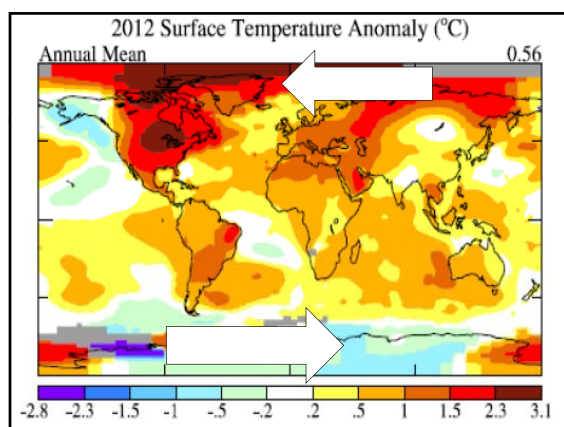
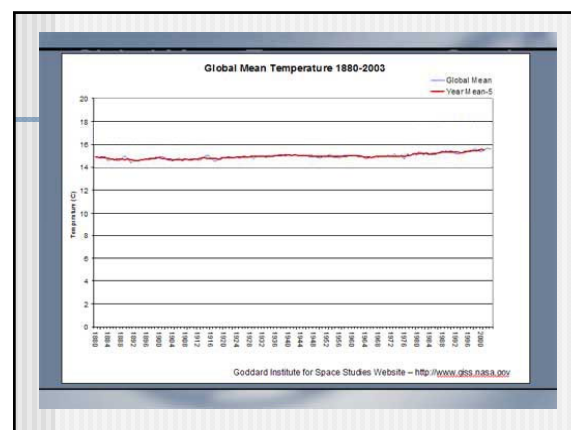
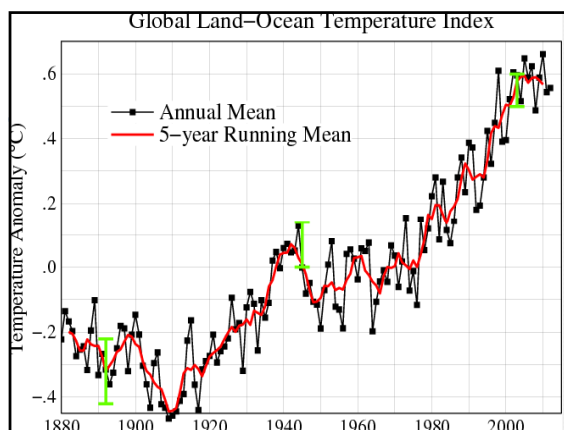
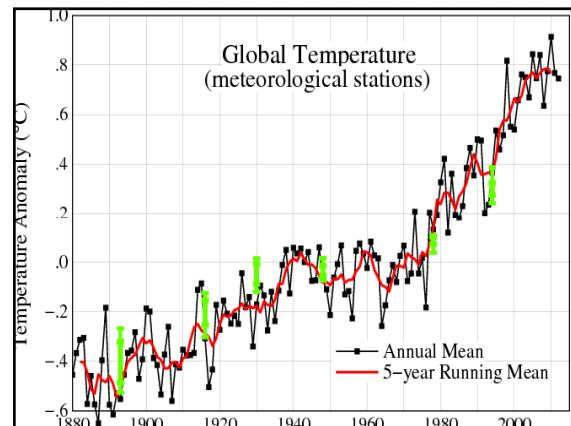
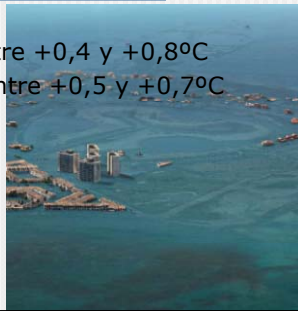
Probable significa que la probabilidad de ocurrencia es mayor de 0.66 (es decir, >66 %).

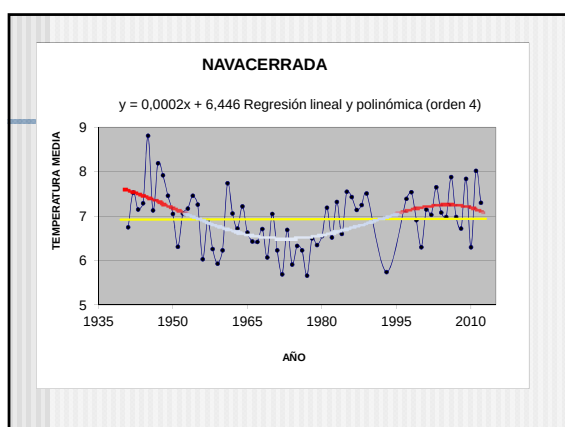
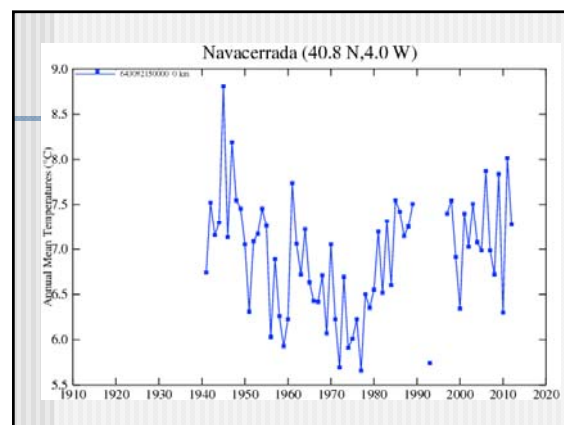
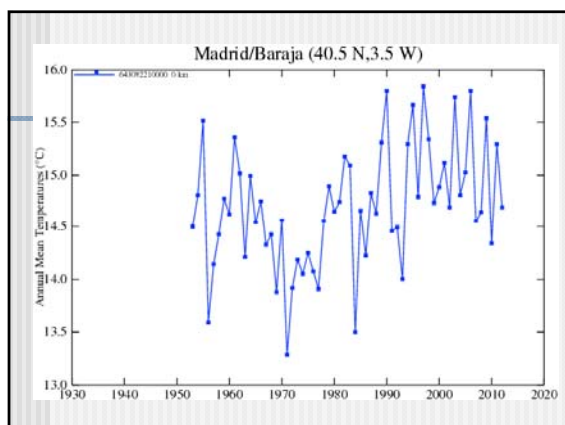
Muy improbable significa que la probabilidad de ocurrencia es menor de 0.10 (es decir, <10 %).



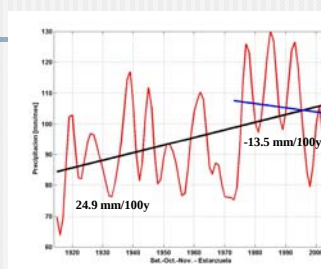
El clima presente: ¿qué es la temperatura global?

- IPCC (ONU): entre $+0,4$ y $+0,8^{\circ}\text{C}$
- GISS (NASA): entre $+0,5$ y $+0,7^{\circ}\text{C}$





¿OSCILACIONES o TENDENCIAS?



En general, las tendencias lineales no describen bien la variabilidad climática (ni la pasada ni la futura)

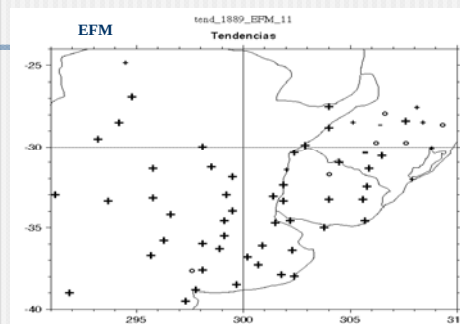
Test de Tendencia de Mann(1945) - Kendall(1975)

- El contraste tiene como objetivo detectar una tendencia positiva o negativa en la serie temporal (H_0 =no hay tal).
- Cada par de valores y_i, y_j ($i < j$) es comparado para encontrar si $y_i > y_j$ ó $y_i < y_j$. Si el número de pares positivos es P y el número de pares negativos es N , se define el estadístico $S = P - N$.
- $-n(n+1)/2 \leq S \leq +n(n+1)/2 \rightarrow \tau = 2S/n(n-1) \in [-1, +1]$.
- Para $n > 10$, S sigue una distribución normal de media 0 y varianza:

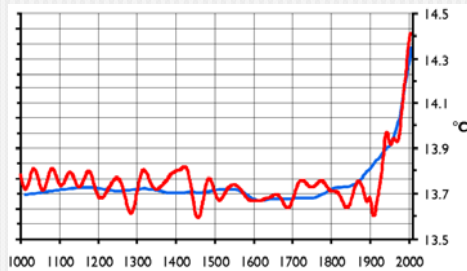
$$V = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^g t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}$$

V es función del nº total de datos (n) y del nº de grupos con medida idéntica (g), siendo t_i el nº de observaciones iguales en cada grupo.

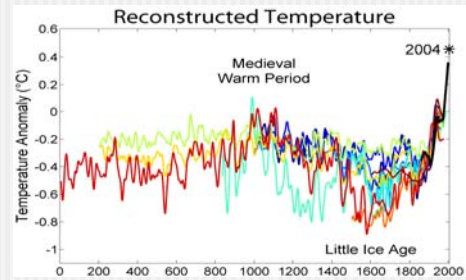
Gráficamente...



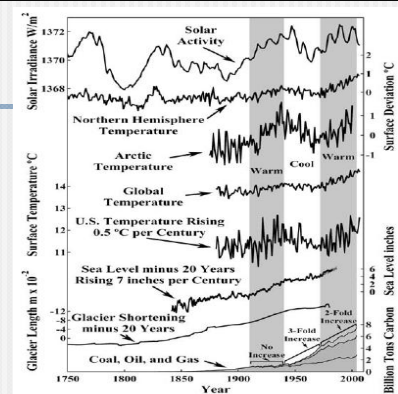
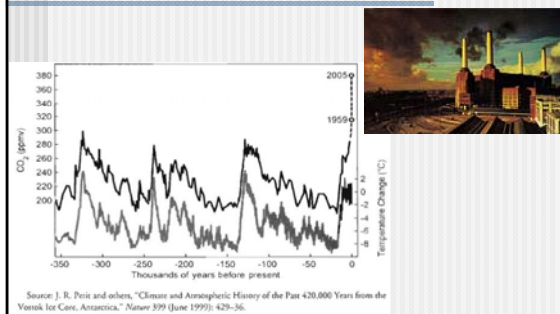
El clima del pasado: *El palo de hockey*



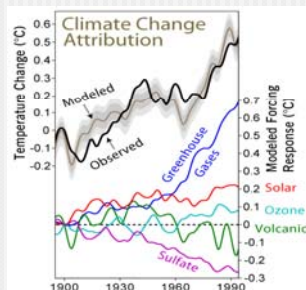
La Academia de CC. Estadísticas y *el palo de hockey corregido*



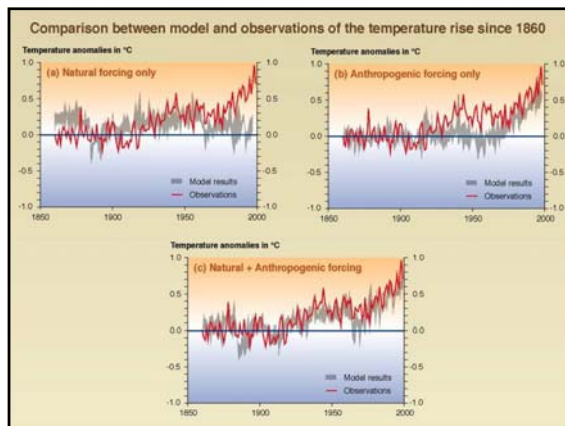
Buscando correlaciones...



Correlaciones positivas y negativas...



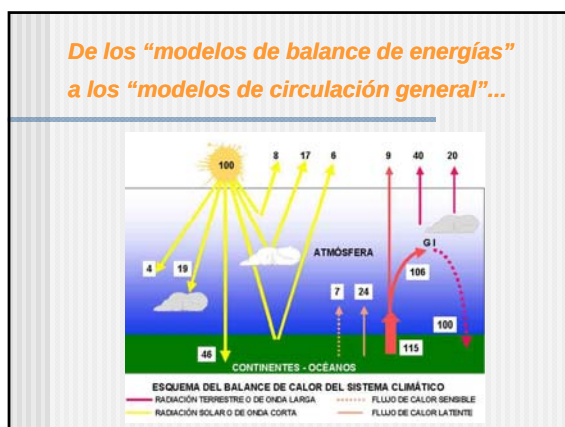
COMPONENTES DEL FORZAMIENTO RADIAIVO					
Terminos de FR		Valores de FR (W m ⁻²)		Escala espacial	LOSU
Antropogeno	Gases de efecto invernadero de larga duracion	CO ₂	1.66 [1.49 a 1.83]	Mundial	Alto
		CH ₄	0.48 [0.43 a 0.53]	Mundial	Alto
		Halocarbonos	0.16 [0.14 a 0.18]	Mundial	Alto
	Ozono	Estratosferico	-0.05 [-0.15 a 0.05]	Continental a mundial	Mediano
		Troposferico	0.39 [0.25 a 0.65]	Mundial	Alto
	Vapor de agua estratosferico de CH ₄		0.07 [0.02 a 0.12]	Mundial	Bajo
	Albedo de superficie	Land use	-0.2 [-0.4 a 0.0]	Local a continental	Mediano
		Carbon negro en la nieve	-0.1 [-0.2 a 0.0]	Continental a mundial	Bajo
	Total de aerosoles		-0.5 [-0.9 a -0.1]	Continental a mundial	Bajo
	Efecto del albedo de las nubes		-0.7 [-1.3 a -0.3]	Continental a mundial	Bajo
Procesos naturales	Estelas de condensacion lineal		0.01 [0.003 a 0.03]	Continental	Bajo
	Irradiacion solar		0.12 [0.06 a 0.30]	Mundial	Bajo
	Antropogeno neto total		1.6 [0.6 a 2.4]		



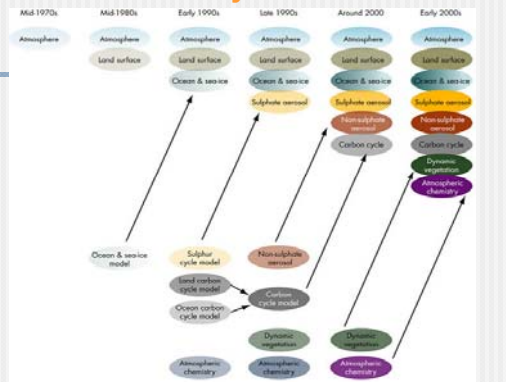
El clima del futuro: la predicción por *ensembles*

Model

"En la investigación y creación de modelos climáticos debemos reconocer que nos enfrentamos con un sistema caótico no lineal y, por tanto, las predicciones a largo plazo no son posibles." (IPCC)



2000s: Earth System Models



1963: La atmósfera como sistema caótico (Lorenz)

"Deterministic Non-Periodic Flow"

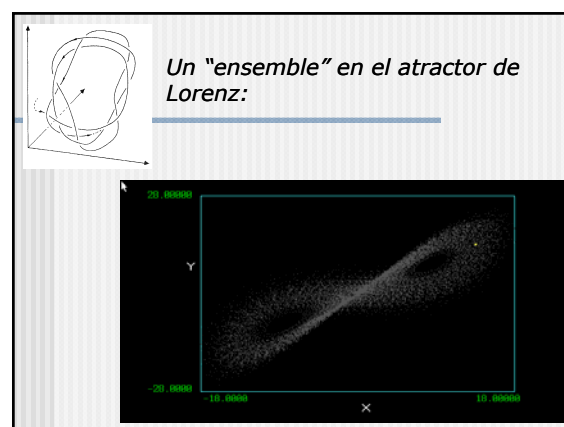
Sistema de Lorenz

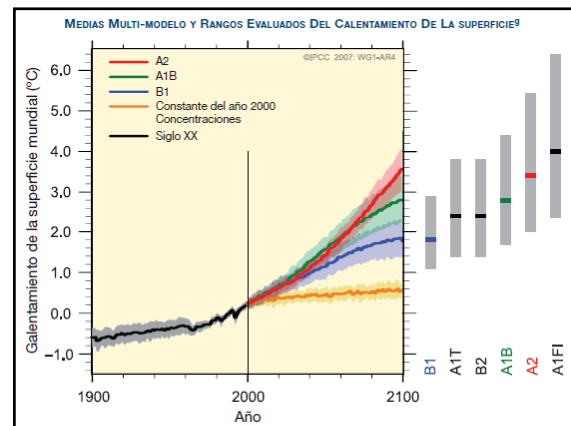
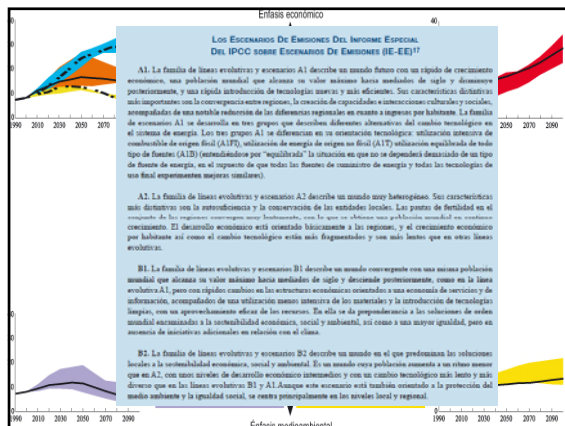
$$\begin{aligned}\frac{dx(t)}{dt} &= \sigma(y(t) - x(t)) \\ \frac{dy(t)}{dt} &= rx(t) - y(t) - x(t)z(t) \\ \frac{dz(t)}{dt} &= x(t)y(t) - bz(t)\end{aligned}$$

Modelo simplificado de convección

temperature
time

Sensibilidad a las condiciones iniciales – Efecto Mariposa



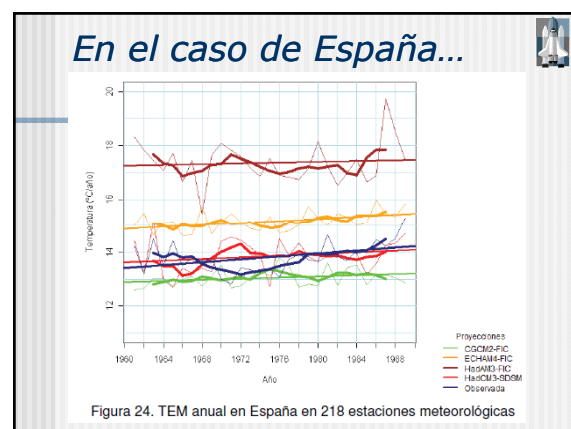
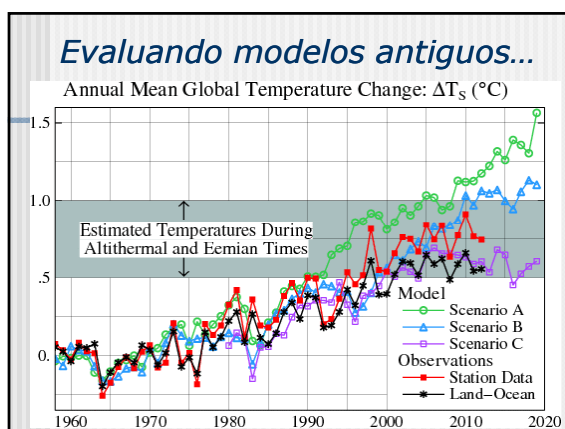


Caso	Cambio de Temperatura (°C en 2090-2099 respecto a 1980-1999) ^a		Aumento del Nivel del Mar (m en 2090-2099 respecto a 1980-1999)	
	Mejor estimación	Rango de probabilidad	Rango basado en modelos excluyendo futuros cambios dinámicos rápidos en la circulación del hielo	
Concentraciones constantes del año 2000 ^b	0.6	0.3 - 0.9	NA	
Escenario B1	1.8	1.1 - 2.9	0.18 - 0.38	
Escenario A1T	2.4	1.4 - 3.8	0.20 - 0.45	
Escenario B2	2.4	1.4 - 3.8	0.20 - 0.43	
Escenario A1B	2.8	1.7 - 4.4	0.21 - 0.48	
Escenario A2	3.4	2.0 - 5.4	0.23 - 0.51	
Escenario A1F1	4.0	2.4 - 6.4	0.26 - 0.59	

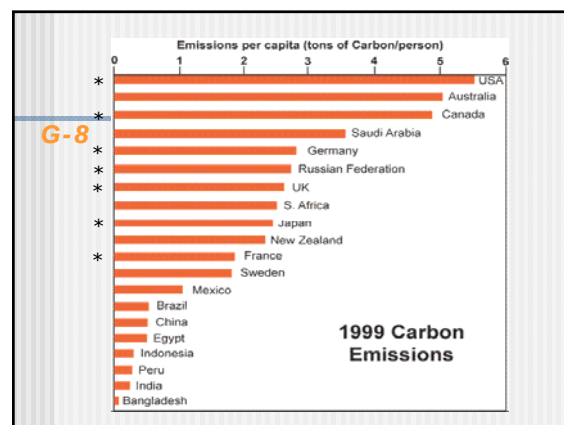
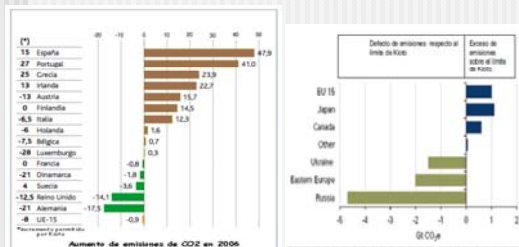
Notas de la Tabla:
^a Estas estimaciones se evalúan partiendo de una jerarquía de modelos incluye un modelo de clima simple, varios Modelos del Sistema Terrestre de Complejidad Intermedia y un gran número de Modelos de Circulación General Atmosfera-Océano (MCGAO).

■ Realismo y simulación de escenarios económicos:

Los dos escenarios más dramáticos son los menos probables desde el punto de vista económico: A2 supone que la renta de los países pobres crecerá hasta el nivel actual de los ricos y que, pese a ello, la población mundial aumentará (cuando la natalidad tiende a disminuir con la renta); y A1F1 proyecta que la renta per cápita crecerá mucho y, sin embargo, seguiremos usando las mismas tecnologías sucias...



De la cara científica a la cara económica: *Kioto*



El Protocolo de Kioto y la Teoría de Juegos



El dilema del prisionero



Dilema del prisionero
Matriz de Pagos
(años de cárcel)

		Preso Y	
		lealtad	traición
Preso X	lealtad	2 \ 2	10 \ 1
	traición	1 \ 10	5 \ 5



	Tú encubres	Tú traicionas
Él encubre	Máximo beneficio común	Tú ganas, él pierde
Él traiciona	Él gana, tú pierdes	Máximo perjuicio común

El dilema de colaborar / no colaborar

CUADRO N.º 1

ACUERDO PLURAL SOBRE EMISIONES

		EL RESTO DE PAÍSES	
		Pocos reducen	Muchos reducen
País A	Reduce	-10	10
	No reduce	0	-20

Fuente: Elaboración propia.

Multas contra los *free riders* y los equilibrios de Nash ineficientes

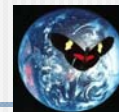
CUADRO N.º 4

ACUERDO PLURAL SOBRE EMISIONES CON MULTAS DE GRANDES CUANTÍAS (MULTA = -15)

		EL RESTO DE PAÍSES	
		Pocos reducen	Muchos reducen
País A	Reduce	-10	10
	No reduce	-15	5

Fuente: Elaboración propia.

iMuchas gracias!



- FERNÁNDEZ, Yolanda *et al.* (2009): "Estrategias ante Kioto: una visión de teoría de juegos", *Papeles de Economía Española*, 121, 2009, pp. 36-44.
- LOMBORG, Bjorn (2008): *En frío. La guía del ecologista escéptico para el cambio climático*, Espasa.
- MADRID, Carlos (2011): *La mariposa y el tornado. Teoría del Caos y Cambio Climático*, RBA.
- VV. AA. (2006): *Mitos y Realidades del Cambio Climático*, Revista del Instituto de Estudios Económicos, Vols. 3 y 4.
- WILK, Daniel S. (2011): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Elsevier.

GISS (NASA): www.giss.nasa.gov

IPCC (ONU): www.ipcc.ch