

# **TÉCNICAS DE DOWNSCALING UTILIZANDO DATOS OBSERVADOS A ESCALA DIARIA. DOS APLICACIONES**

**J. Abaurrea, J. Asín**  
Dpto. Métodos Estadísticos  
Universidad de Zaragoza

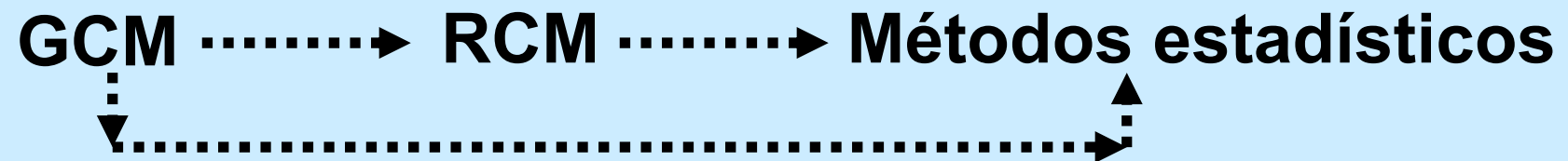
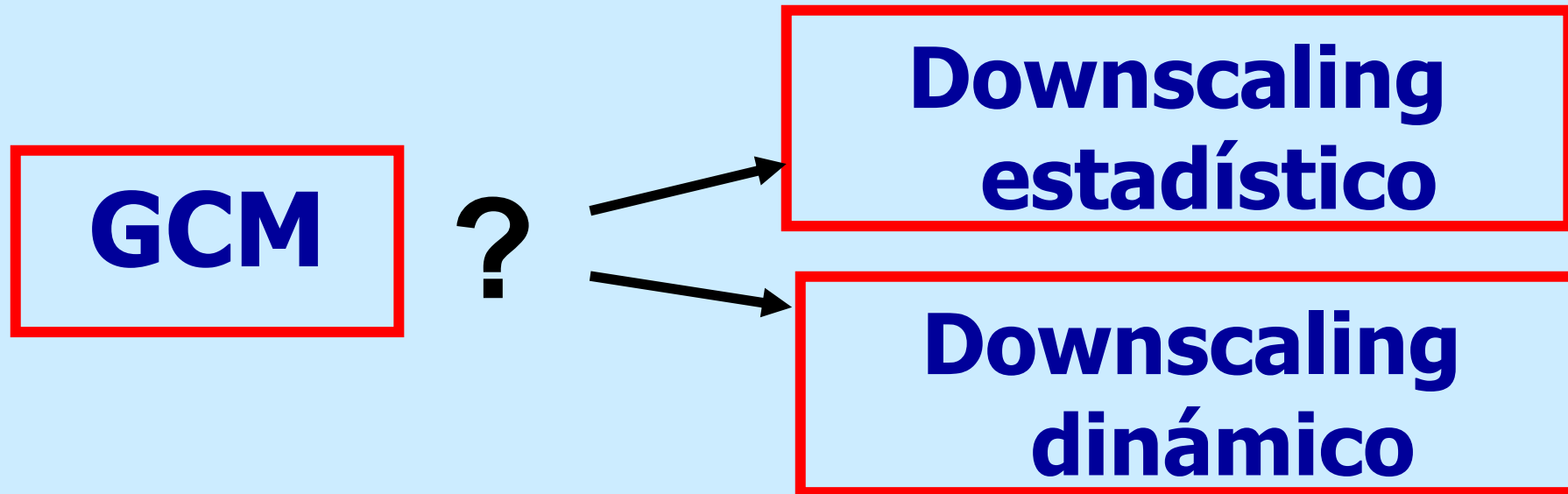


## ESQUEMA DE LA PRESENTACIÓN

- Introducción: Papel y necesidad del downscaling estadístico
- Simulación del clima observado por parte de AOGCMs y RCMs
- Dos modelos estadísticos basados en datos de escala diaria útiles para un posible downscaling
  - Proceso de olas de calor
  - Proceso de precipitación diaria local

Ejemplos desarrollados en el observatorio de Zaragoza, en el centro de la Cuenca del Ebro





## INTRODUCCIÓN

### ¿Está condenado a desaparecer el downscaling estadístico?

- R. Huth, Workshop Oslo 2005  
<http://regclim.met.no/workshop-2005-10/index.html>
- El D. estadístico no lo hace peor que el D. dinámico
- Sin embargo, tiene un papel secundario frente a éste (proyecto ENSEMBLES)
- ¿Desaparecerá? Paralelismo con el estado de la predicción numérica en los años 50



## INTRODUCCIÓN

### Evolución de los AOGCMs

- AOGCMs para el IPCC AR4 (2007)
- Mejora de la resolución espacial

	IPCC TAR (2001)		IPCC AR4 (2007)	
NCAR	CSM 1.3	2.8°x2.8°	CCSM3	1.4°x1.4°
CSIRO	CSIRO Mk2	3.2°x5.6°	CSIRO Mk3	1.88°x1.88°
DKRZ	ECHAM4/OPYC3	2.8°x2.8°	ECHAM5/MPI-OM	1.88°x1.88°
UKMO	HadCM3	2.5°x3.75°	HadGEM1	1.25°x1.875°
GFDL	GFDL_R30_c	2.25°x3.75°	GFDL-CM2.1	2°x2.5°
MRI	MRI2	2.8°x2.8°	MIROC3.2-hires	1.125°x1.125°

[http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about\\_ipcc.php](http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php)



## **SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS AOGCMs**

A. Dai (2006), J. Climate

- Reproducción de la precipitación en todo el globo
  - mensual y diaria, 1950-1999
  - de 3 horas, 1991-2000
- Resultados de 18 AOGCMs, versiones para el IPCC AR4 (2007)
- Datos observados
  - CMAPA y GPCG v2, GPCP pentad y TRMM



## SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS AOGCMs

A. Dai (2006), J. Climate

Conclusiones:

- Reproducen el patrón espacial, a gran escala, y el ciclo anual. En general, también la variabilidad anual
- La mayoría de los modelos producen demasiada precipitación convectiva y poca estratiforme en áreas subtropicales
- Inadecuada simulación de la intensidad: aceptable la contribución de episodios medios (10-20 mm/día), sobreestiman los pequeños y subestiman los intensos

Mejoras notables en muchos aspectos respecto a las versiones de hace unos pocos años

Sesgos del mismo tipo que en las versiones anteriores

Sería necesaria una resolución del orden de 30-60 Km



## SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS AOGCMs

Van Ulden y van Oldenborgh (2006), Atmos. Chem. Phys.

Resultados de 23 AOGCMs, entre ellos 17 de los usados por Dai  
Analizan su capacidad para reproducir los patrones del campo de presión en superficie a escala global

Seleccionan los 5 modelos que mejor representan estos patrones y analizan su reproducción del clima en Centro Europa, en 1960-2000

ECHAM5

HadGEM

MIROChi

GFDL2.1

CGCM3.1T63

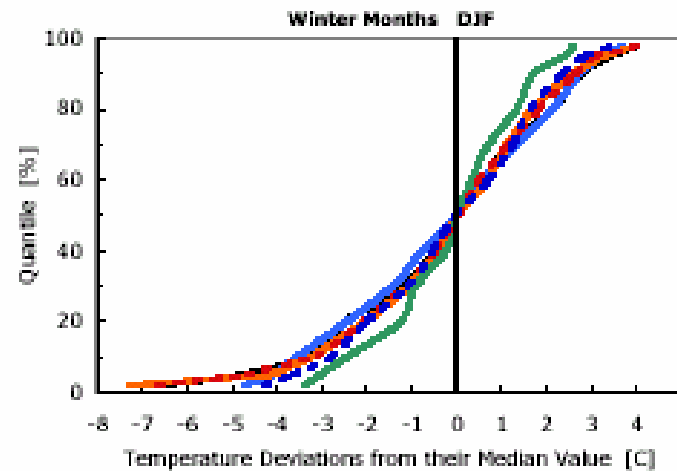
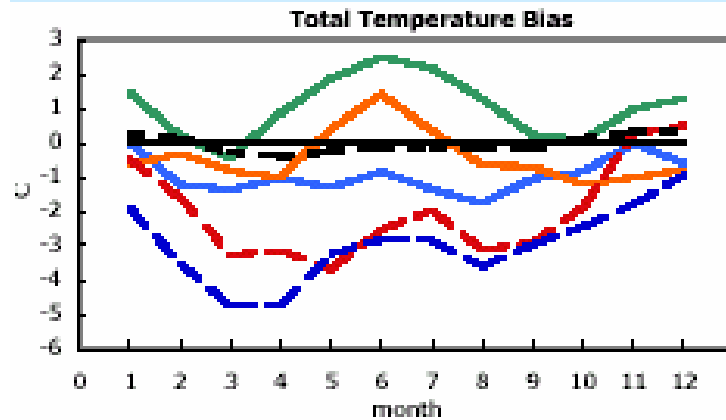
Datos observados:

- ERA-40 y ADVICE para las presiones
- CRU para precipitación y temperatura



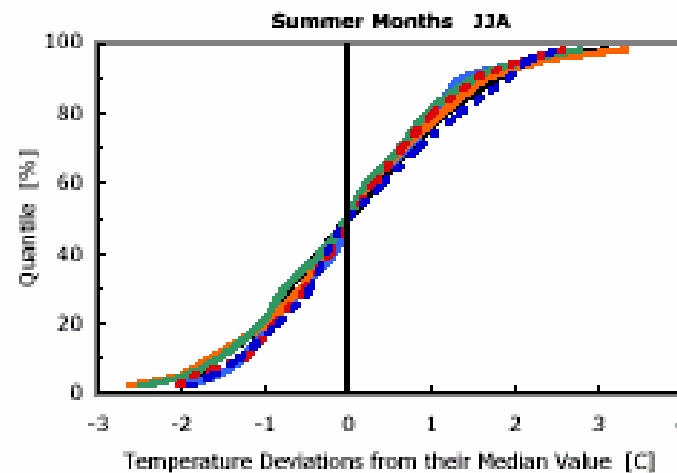
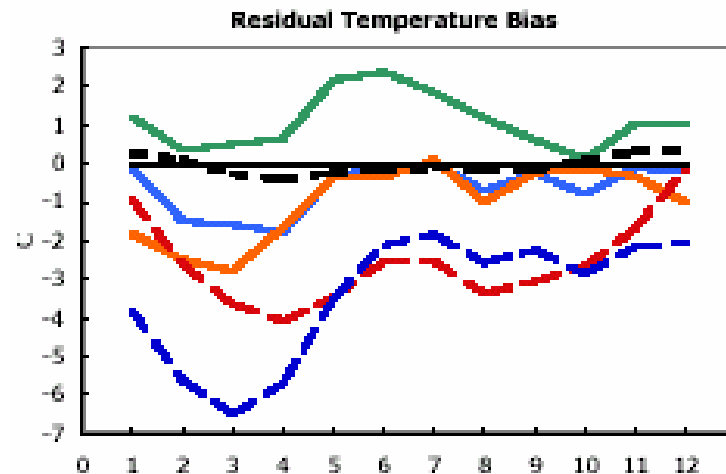
# SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS AOGCMs

Van Ulden y van Oldenborgh (2006): Análisis de **temperatura**



3 modelos con sesgos entre  $-2.5$  y  $2.5^{\circ}\text{C}$

2 con importante sesgo negativo entre Enero y Abril

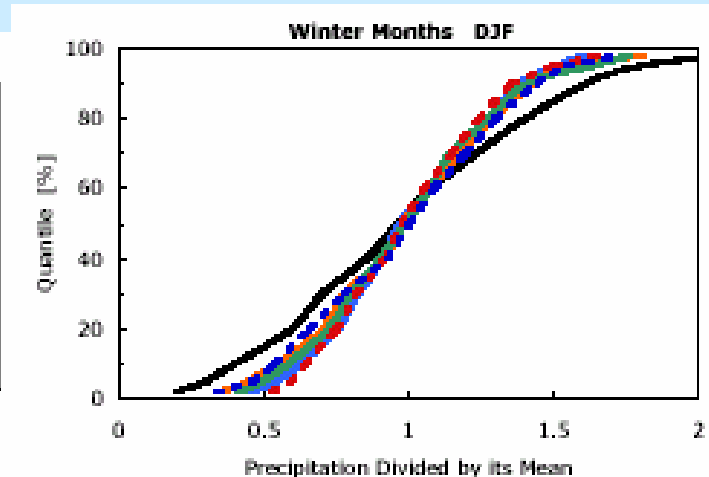
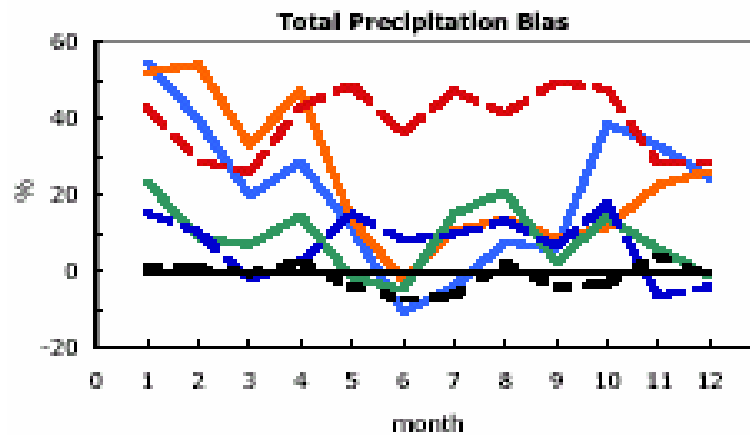


Correcta representación de la distribución, salvo MIROC en Invierno



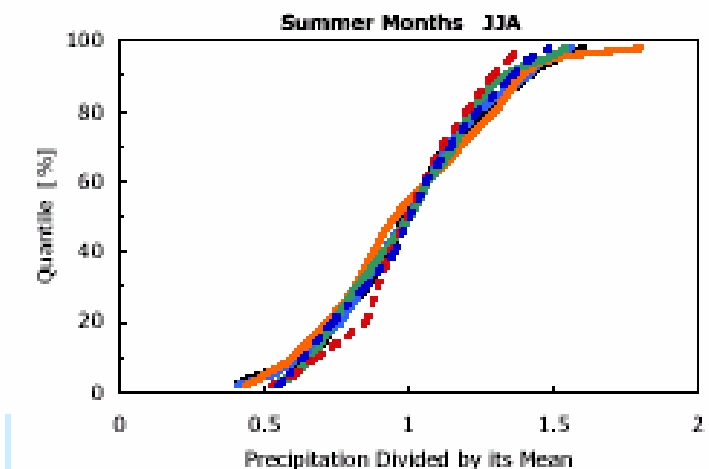
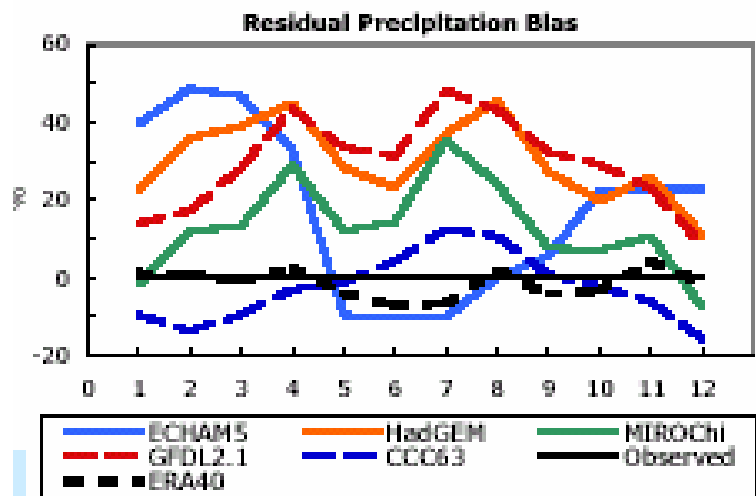
# SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS AOGCMs

Van Ulden y van Oldenborgh (2006): Análisis de **precipitación**



Sesgo importante,  
habitualmente  
positivo

Mejor CGCM3



Variabilidad  
inferior a la  
observada en  
Invierno



## **SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS RCMs**

Proyecto PRUDENCE (UE, V programa marco)

10 modelos regionales

- 28 simulaciones
- Dirigidos por 3 GCMs, HadAM3H
- SRES A2 y B2

Escasa información sobre su reproducción del clima observado en Europa

Próximo número monográfico en Climatic Change



## **SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS RCMs**

Frei et al (2003), J. Geophysical Research

Área de los Alpes

RCMs: ARPEGE, CHRM, HadRM, HIRHAM, REMO, resolución 50 Km

Dirigidos por ERA15, resolución 2.5°, 1979-1993

Datos observados en 6400 pluviómetros, 10 a 50 observatorios por cada celda de 50x50 Km

Análisis mensual y estacional de:

- Precipitación media
- Frecuencia media
- Intensidad media
- Percentil 90 de la distribución de cantidades en un día húmedo



## SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS RCMs

Frei et al (2003), J. Geophysical Research

Statistic	Model	DJF		MAM		JJA		SON	
		Bias (%)	Corr	Bias (%)	Corr	Bias (%)	Corr	Bias (%)	Corr
MEA	ARPEGE	1	0.62	0	0.43	-5	0.78	-17	0.40
	CHRM	-23	0.62	-18	0.67	-26	0.80	-29	0.63
	HadRM	3	0.65	-2	0.63	-27	0.75	-14	0.53
	HIRHAM	-8	0.62	-5	0.58	-10	0.80	-14	0.42
	REMO	-20	0.56	-15	0.47	-23	0.81	-27	0.40
FRE	ARPEGE	27	0.88	35	0.72	58	0.85	28	0.68
	CHRM	-5	0.84	-2	0.70	-11	0.91	-8	0.73
	HadRM	0	0.72	4	0.69	-11	0.85	-3	0.68
	HIRHAM	20	0.79	39	0.65	39	0.86	36	0.66
	REMO	5	0.80	13	0.64	-4	0.89	3	0.68
INT	ARPEGE	-22	0.62	-28	0.44	-42	0.40	-36	0.66
	CHRM	-18	0.63	-15	0.75	-16	0.62	-23	0.72
	HadRM	-4	0.64	-12	0.66	-27	0.26	-19	0.62
	HIRHAM	-26	0.47	-33	0.67	-37	0.48	-39	0.63
	REMO	-24	0.63	-25	0.73	-25	0.46	-29	0.74
Q90	ARPEGE	-25	0.71	-31	0.48	-46	0.31	-36	0.63
	CHRM	-16	0.65	-17	0.74	-18	0.63	-21	0.69
	HadRM	0	0.69	-9	0.68	-26	0.29	-17	0.67
	HIRHAM	-26	0.52	-35	0.67	-42	0.28	-39	0.62
	REMO	-25	0.66	-28	0.73	-25	0.43	-29	0.73

Frecuencia:

- 3 RCMs correctos, sesgos inferiores al 10%
- Correlación  $\geq 0.65$

Intensidad:

- Importantes sesgos negativos
- La correlación baja especialmente en Verano

Q90: como intensidad

Precipitación media:

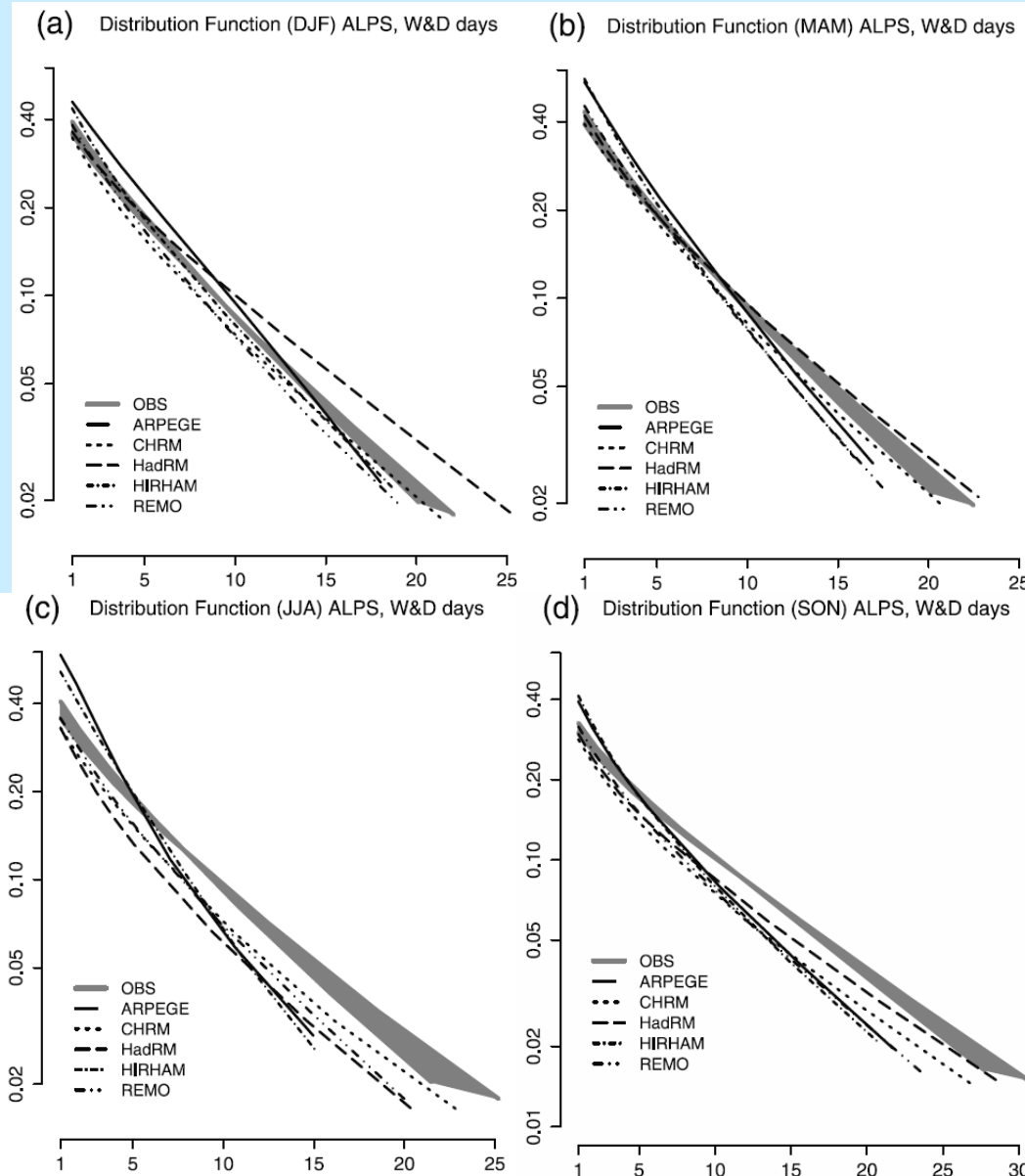
- Se reduce la correlación en Otoño

# SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS RCMs

Frei et al (2003),  
J. Geophysical Research

Distribución:  
Mejor en Invierno

En Otoño y Verano  
infraestiman la frecuencia de  
episodios que superan 10 mm



## **SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS RCMs**

Frei et al (2006), J. Geophysical Research

Área de los Alpes

RCMs: CHRM, REMO, GKSS, HIRHAM, SMHI, HadRM3H/P

Dirigidos por HadAM3H/P, 1961-1990

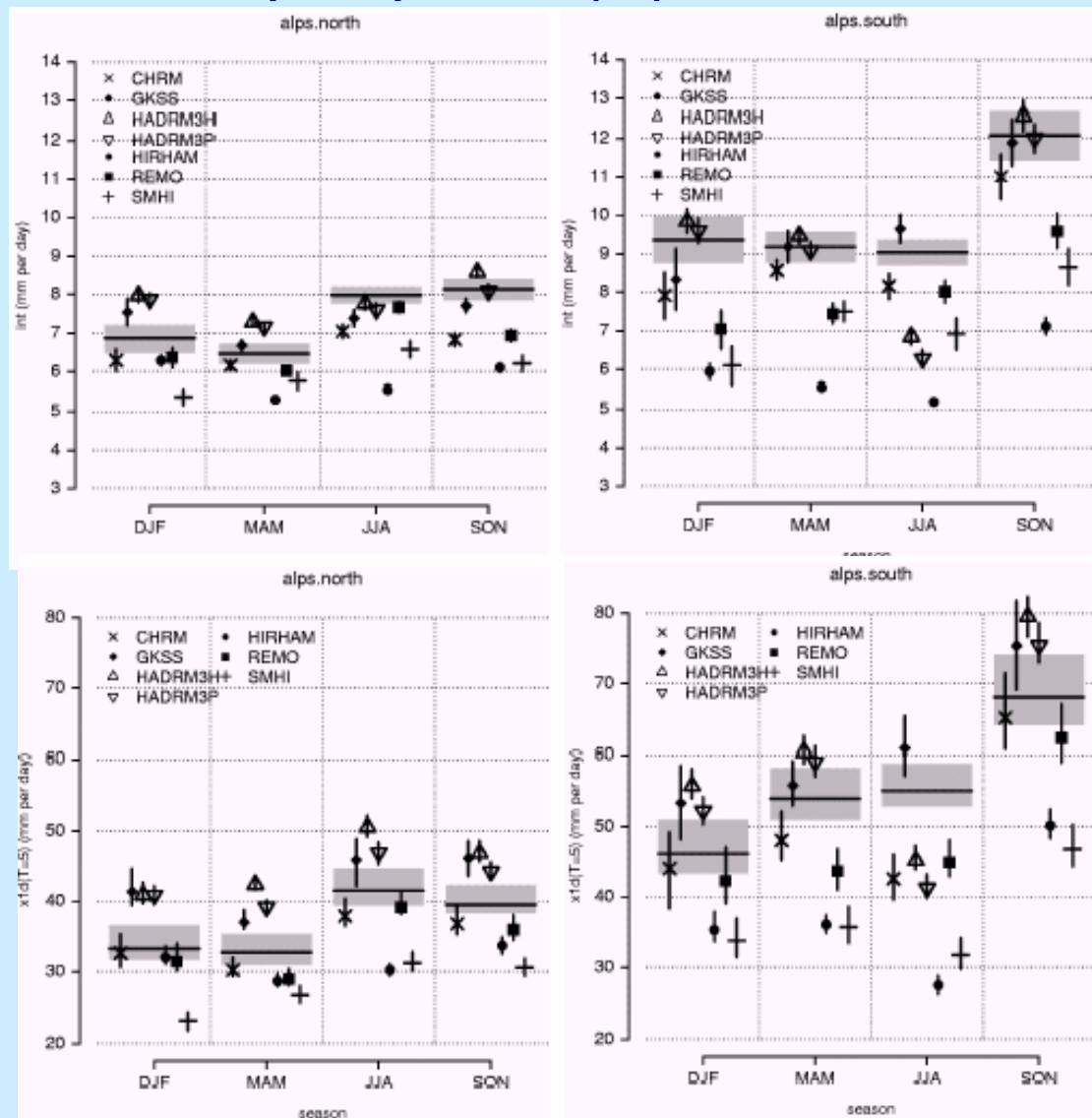
Análisis de:

- Frecuencia media
- Intensidad media
- Valor de retorno de 5 años de la precipitación diaria



# SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS RCMs

Frei et al (2006), J. Geophysical Research



**Intensidad media y  
valor de retorno de  
5 años**

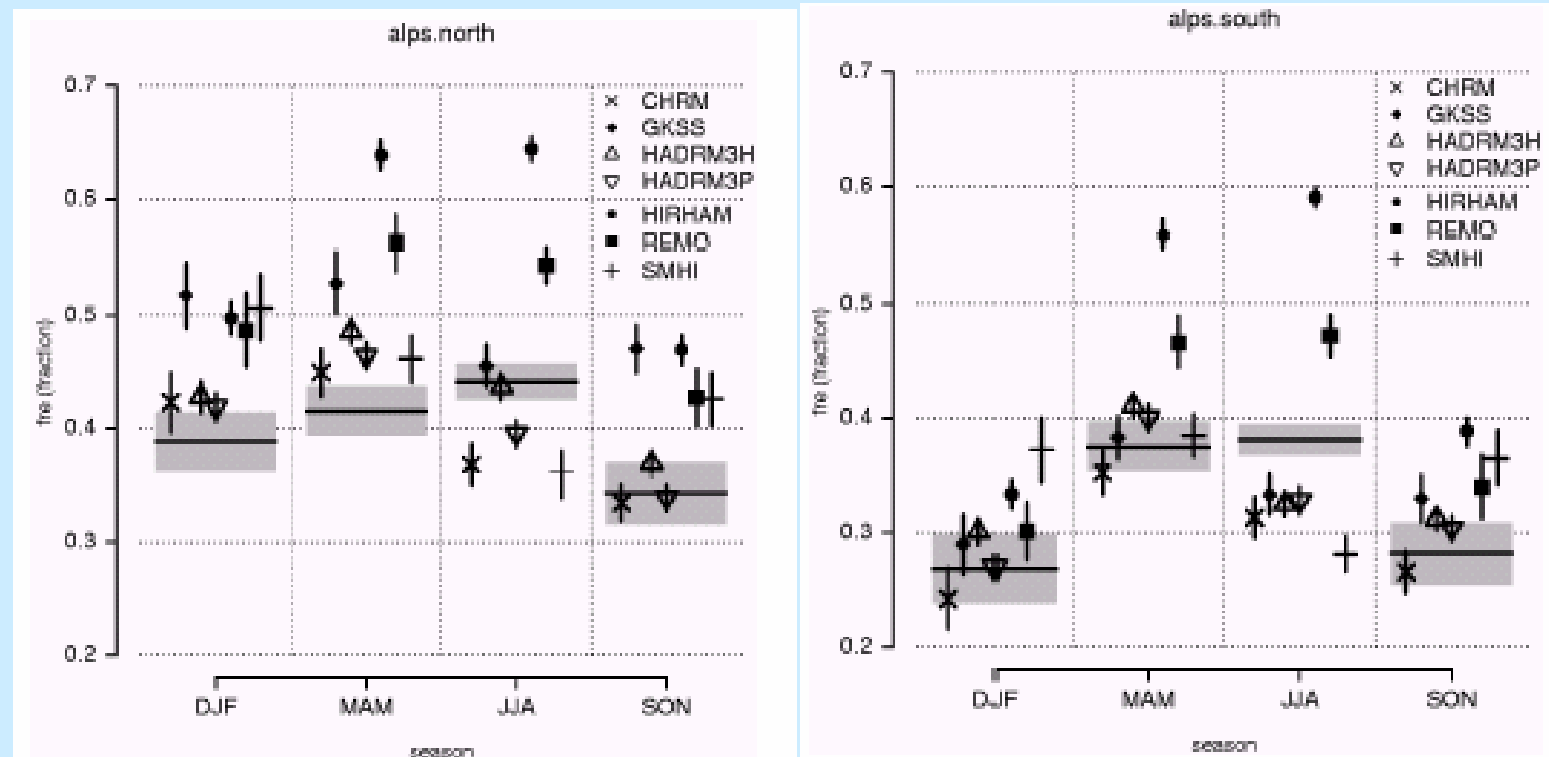
El sesgo en las  
cantidades extremas no  
es sensiblemente mayor  
que en la intensidad  
media

## SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS RCMs

Frei et al (2006), J. Geophysical Research

### Frecuencia

Desviaciones que no se corresponden con las identificadas en el trabajo anterior y que se asocian a problemas del GCM



## **SIMULACIÓN DEL CLIMA ACTUAL POR PARTE DE LOS RCMs**

Giorgi, Bi, Pal (2004), Climate Dynamics

RegCM, anidado en HadAMH

Análisis sobre Europa, dividida en 13 regiones, 1961-1990

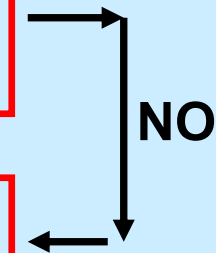


## EN CONCLUSIÓN

¿Cuál es la variable de interés?  
¿Qué escala temporal y espacial se requiere?

¿Existe algún AOGCM o RCM que ofrezca una respuesta satisfactoria al problema?

Oportunidad para el downscaling estadístico



El impacto del cambio climático en los recursos hídricos, escorrentía, evapotranspiración, requiere escenarios para la precipitación a escala diaria, lo que en este momento parece requerir downscaling estadístico

**GCM** .....→ **RCM** .....→ **Métodos estadísticos**



## PROCESO DE OLAS DE CALOR

### Esquema de la presentación

Abaurrea, Asín, Cebrián, Centelles (2006), Global and Planetary Change (por aparecer)

- **Objetivo:**
  - Modelar el comportamiento (ocurrencia, duración e intensidad) de los episodios de ola de calor mediante un modelo estadístico que represente su evolución temporal y estacionalidad
  - Este modelo en combinación con la salida de un GCM (RCM) generará proyecciones del comportamiento de esos sucesos extremos
- **Defecto:**
  - No se ha investigado la calidad del proceso de generación de olas de calor del GCM



## PROCESO DE OLAS DE CALOR

### Esquema de la presentación

- Fases del trabajo
  - Análisis del cambio observado
    - temperatura máxima diaria (Tx), JJA, en 1951-2004
    - evolución de las características de los episodios de calor en dicho periodo
  - Ajuste de un modelo estadístico para la ocurrencia y severidad de estos episodios extremos
  - Uso del modelo estadístico alimentado con 3 trayectorias de HadCM3 para obtener proyecciones sobre el comportamiento de dichos episodios hasta 2050
- Ventajas e inconvenientes de la metodología



## **PROCESO DE OLAS DE CALOR**

### **Cambio observado en Tx en Zaragoza, 1951-2004**

#### **Características del cambio observado en los valores medios de temperatura en el NE de Península Ibérica (Zaragoza, Huesca, Barcelona, Madrid)**

- Distinta evolución en cada estación, estabilidad en Otoño e incrementos de distinta intensidad en las otras estaciones
- Evolución heterogénea dentro de los periodos estacionales habituales, DEF, MAM, JJA, SON



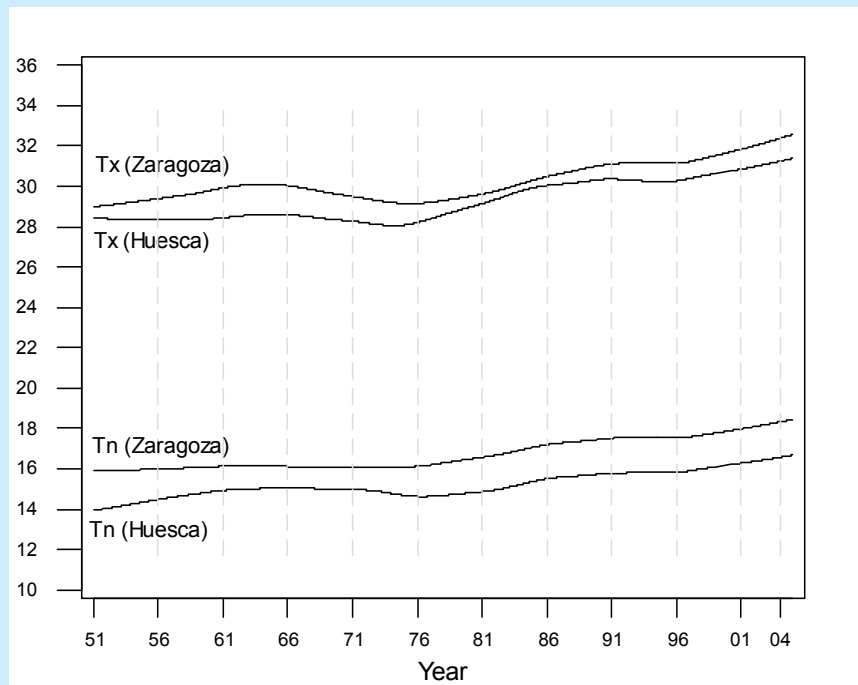
## PROCESO DE OLAS DE CALOR

### Cambio observado en Tx en Zaragoza, 1951-2004

#### Datos

Temperatura máxima y mínima diaria en 1951-2004, en Zaragoza y Huesca

#### Evolución del valor medio de Tx y Tn en Verano



- Estabilidad en 1951-75
- Incremento hasta 1990
- Corto periodo estable 1991-96
- Fase final creciente

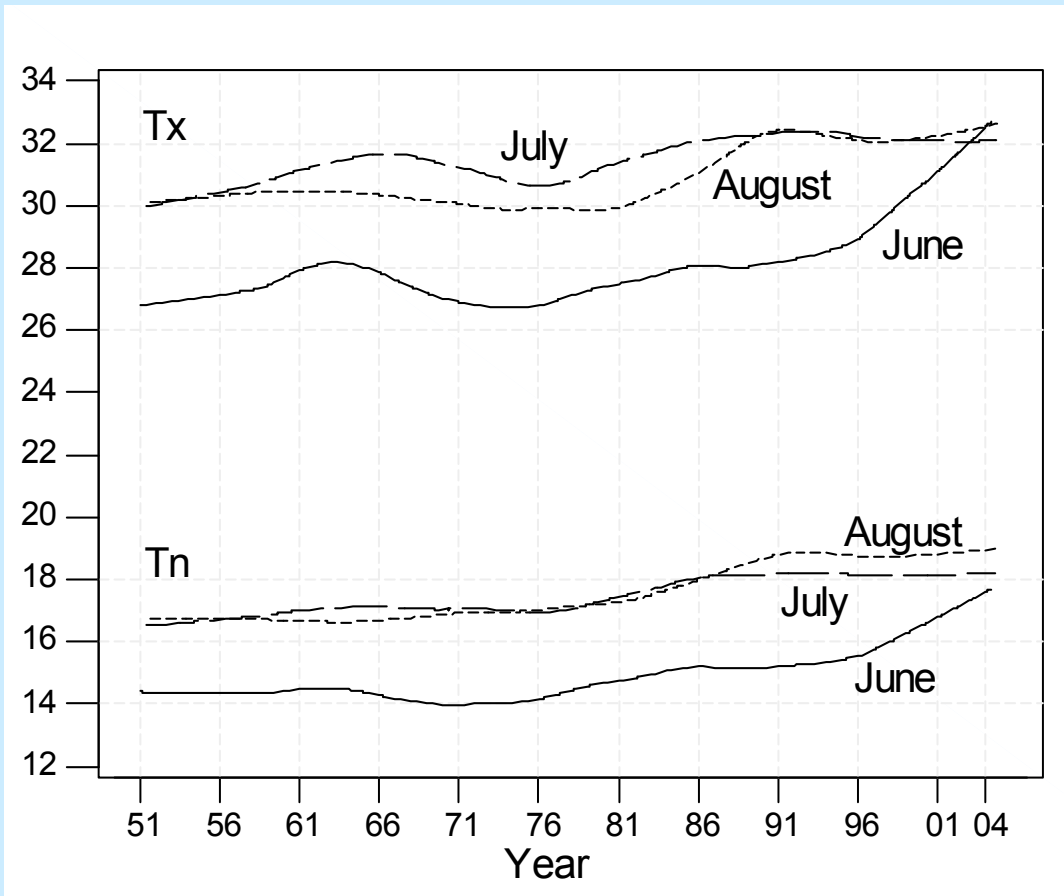


## PROCESO DE OLAS DE CALOR

### Cambio observado en Tx en Zaragoza, 1951-2004

#### Evolución del valor medio de Tx y Tn en cada mes

Evolución heterogénea



#### Evolución 1975-2004

- Mayor incremento en Junio, del orden de 5°C
- Incremento en Julio y Agosto de alrededor de 2°C, se produce en los años 70-80
- El Verano es actualmente más cálido y más homogéneo



## **PROCESO DE OLAS DE CALOR**

### **Definición y características de una ola de calor**

#### **Definición (simple) de ola de calor**

Es una racha de días consecutivos, de longitud arbitraria, cuyo valor de  $T_x$  supera un umbral extremo

Umbral = percentil 95 de los datos de  $T_x$  diaria en Junio-Julio-Agosto de 1971-2000

37°C en Zaragoza y 35.8°C en Huesca

#### **Características**

Longitud,  $L$

Intensidad máxima,  $I_x$ , máximo valor del exceso sobre el umbral

Intensidad media,  $I_m$ , exceso medio



## PROCESO DE OLAS DE CALOR

### Olas de calor observadas en Zaragoza, 1951-2004

Zaragoza	Mean frequency			p50								
				L			Ix			Im		
	Jn	Jl	Ag	Jn	Jl	Ag	Jn	Jl	Ag	Jn	Jl	Ag
51-60	0.1	0.9	0.2	1.0	1.0	1.5	1.9	0.7	1.8	1.9	0.7	1.3
61-70	0.5	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.6	0.8	0.4	1.4	0.6	0.4
71-80	0.0	1.3	0.8	--	1.0	1.0	--	0.5	0.3	--	0.5	0.3
81-90	0.2	1.5	0.8	1.5	2.0	1.0	0.7	1.2	0.6	0.5	0.8	0.6
91-00	0.2	2.3	1.4	1.5	1.0	2.0	0.6	1.2	1.1	0.5	1.2	0.9
01-04	2.0	2.0	1.3	1.5	2.0	2.0	1.8	0.8	0.9	1.4	0.5	0.7

Tasa de ocurrencia anual:

- Incremento de la tasa a lo largo del tiempo
- Perfil estacional en 1951-2000: mayor frecuencia en Julio, seguido de Agosto y menor en Junio
- En la última década este patrón estacional desaparece



## PROCESO DE OLAS DE CALOR

### Olas de calor observadas en Zaragoza, 1951-2004

Zaragoza	Mean frequency			p50								
				L			Ix			Im		
	Jn	Jl	Ag	Jn	Jl	Ag	Jn	Jl	Ag	Jn	Jl	Ag
51-60	0.1	0.9	0.2	1.0	1.0	1.5	1.9	0.7	1.8	1.9	0.7	1.3
61-70	0.5	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.6	0.8	0.4	1.4	0.6	0.4
71-80	0.0	1.3	0.8	--	1.0	1.0	--	0.5	0.3	--	0.5	0.3
81-90	0.2	1.5	0.8	1.5	2.0	1.0	0.7	1.2	0.6	0.5	0.8	0.6
91-00	0.2	2.3	1.4	1.5	1.0	2.0	0.6	1.2	1.1	0.5	1.2	0.9
01-04	2.0	2.0	1.3	1.5	2.0	2.0	1.8	0.8	0.9	1.4	0.5	0.7

#### Longitud

- Incremento en el tiempo
- Sin perfil estacional definido

#### Intensidades

- No se observa incremento en el tiempo ni perfil estacional



## PROCESO DE OLAS DE CALOR

### Olas de calor observadas en Zaragoza, 1951-2004

#### Conclusiones:

- La evolución de Tx no es homogénea en Verano
- Desde 1996, importante incremento del nivel medio de temperatura en Junio, en Julio y Agosto permanece estable
- La ocurrencia de olas de calor tiene un patrón estacional en Verano pero este patrón podría estar cambiando, como consecuencia de la evolución de Tx

Estos hechos indican que la ocurrencia de olas de calor podría ser explicada sólo parcialmente por la evolución decadal de Tx y que será necesario considerar otros predictores



## PROCESO DE OLAS DE CALOR Modelo estadístico

### Modelo de ocurrencia

#### Proceso de Poisson no homogéneo, NHPP

Tasa,  $\lambda(t)$ , donde  $t$  denota el tiempo, función de predictores que influyen en su variación:

- La temperatura máxima a través de
  - Una señal de largo plazo,  $\Pi x$ , definida por un suavizado, parámetro de ventana 0.30, de la serie de  $Tx$
  - Una señal de corto plazo,  $Tx_{m31}$ , definida como la media móvil centrada de 31 días
- Términos armónicos (seno, coseno) para representar la estacionalidad
- Términos cuadráticos e interacciones



## PROCESO DE OLAS DE CALOR Modelo estadístico

### Modelo de ocurrencia ajustado

Proceso de Poisson no homogéneo, NHPP

$$\log[\lambda(t)] = -89.8 - 74.5 \cos(2\pi t) - 32.6 \sin(2\pi t) + \\ + 0.277 Tx_{m31} + 0.224 Tx_{m31} \cos(2\pi t) + 0.099 Tx_{m31} \sin(2\pi t)$$

- Debido a los términos de interacción, la influencia de  $Tx_{m31}$  cambia a lo largo de Verano
- $TTx$  no tiene un efecto significativo; su influencia es captada por  $Tx_{m31}$



## PROCESO DE OLAS DE CALOR Modelo estadístico

### Modelos para las medidas de severidad

#### Longitud

Distribución **binomial negativa**

Valor medio dependiente de covariables

#### Intensidad máxima y media

Distribución **Pareto generalizada**

Parámetro de forma ajustado en cada mes

Parámetro de escala dependiente de covariables



## PROCESO DE OLAS DE CALOR Modelo estadístico

### Modelos ajustados para las medidas de severidad

#### Longitud:

Efecto significativo de  $Tx_{m31}$

No requiere armónicos

#### Intensidad máxima y media:

Parámetros constantes

Severity variables	Distribution	Parameters
Length	Negative binomial	$\mu(t) = \exp(-8.5 + 0.025 Tx_{m31})$ $N = 2$
Mean intensity	Generalized Pareto	Shape $\sigma = -0.127$ Scale $\xi = 13.981$
Maximum intensity	Generalized Pareto	Shape $\sigma = -0.280$ Scale $\xi = 12.357$

### Conclusiones de la modelización

El incremento de temperatura observado tiene asociado un aumento significativo de la frecuencia y longitud de las olas de calor pero no de su intensidad



## PROCESO DE OLAS DE CALOR Proyección

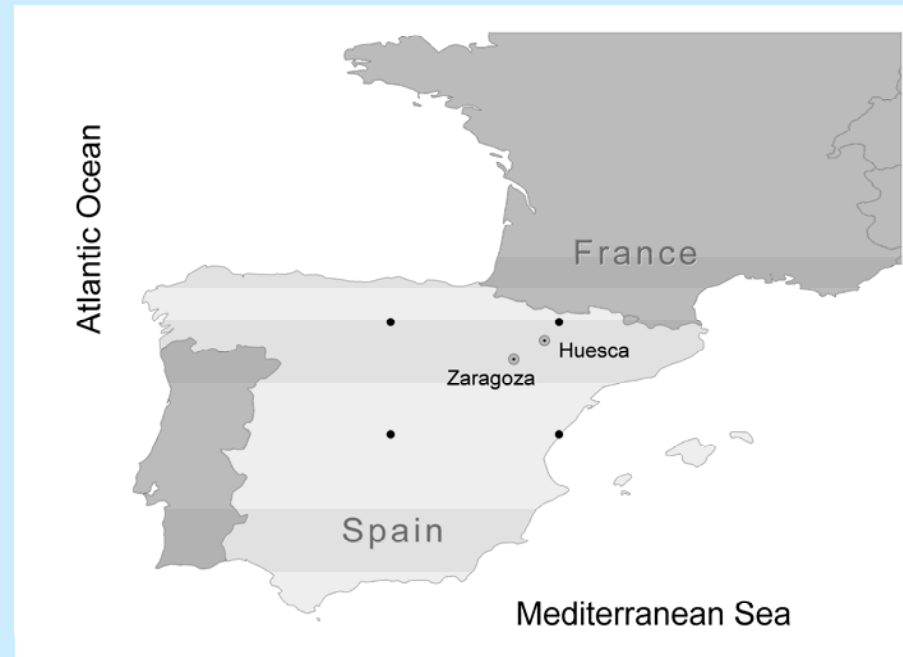
### Datos de HadCM3

Punto de la red más próximo al observatorio de Zaragoza

Datos mensuales del valor medio de la temperatura máxima diaria

Periodo 1951-2050, escenario SRES-A2

3 trayectorias

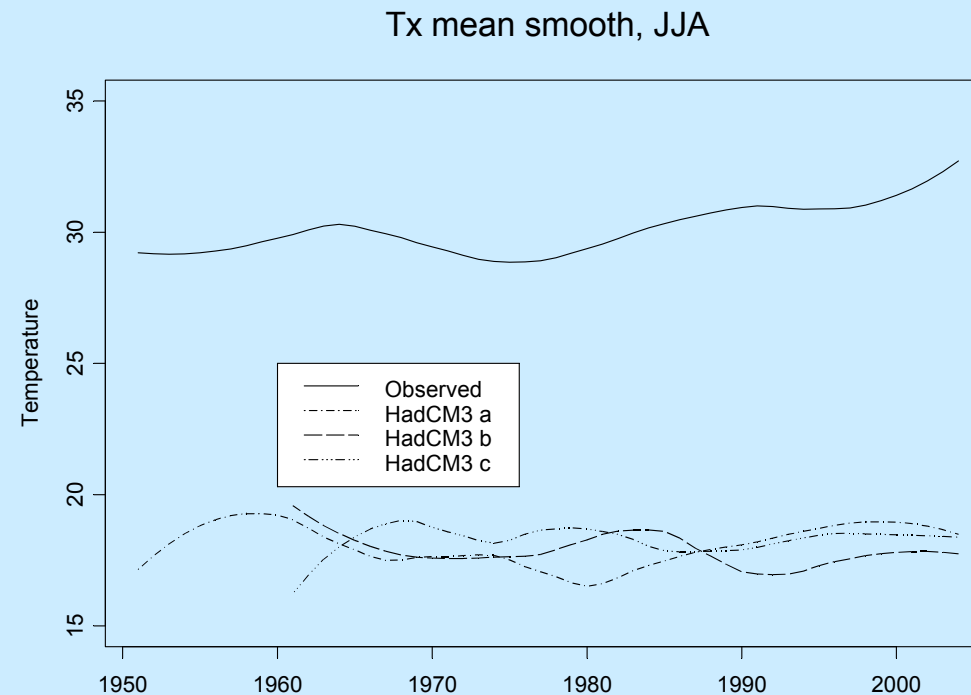


## PROCESO DE OLAS DE CALOR Proyección

### Pasos previos

- a) Comparación de las temperaturas observadas con las series generadas por el modelo numérico para estimar su sesgo respecto a los datos de Zaragoza

Resolución de HadCM3:  $3.75^\circ$  long. x  $2.5^\circ$  lat.



## PROCESO DE OLAS DE CALOR Proyección

### Pasos previos

	June		July		August	
	Mean	Stdev	Mean	Stdev	Mean	Stdev
Observed	27.61	1.67	31.38	1.54	30.40	1.51
HadCM3a	16.53	1.97	18.78	2.19	17.71	2.48
HadCM3b	16.79	2.00	19.31	2.07	18.22	1.96
HadCM3c	17.36	2.09	19.32	1.96	17.99	2.32

- b) Las series del GCM son reescaladas para obtener el nivel medio y desviación típica observados para cada mes en 1961-90
- Test KS para comparar mensualmente la distribución del valor medio mensual de Tx en la serie de datos observados 1961-90 y en las series escaladas procedentes de HadCM3: p-valor superior a 0.83 en todos los casos
- c) A partir de la serie de valores medios mensuales (reescalados) de HadCM3 se construye una serie de  $Tx_{m31}$  asignando a cada día el valor medio mensual correspondiente



## PROCESO DE OLAS DE CALOR Proyección

### Validación del modelo con datos de HadCM3 para el clima actual

	Mean observed frequency				Fitted occurrence rate HadCM3											
					A2a				A2b				A2c			
	Jn	Jl	Ag	JJA	Jn	Jl	Ag	JJA	Jn	Jl	Ag	JJA	Jn	Jl	Ag	JJA
1951-80	0.20	1.13	0.70	2.03	0.13	1.42	0.91	2.46								
1961-90	0.23	1.33	0.90	2.47	0.12	1.22	0.67	2.01	0.11	1.21	0.63	1.96	0.11	1.23	0.69	2.03
1971-00	0.13	1.70	1.00	2.83	0.11	1.29	0.81	2.20	0.09	1.13	0.54	1.76	0.10	1.18	0.59	1.87

#### Comparación de las **tasas medias de ocurrencia**

- En 1951-80 y 1961-90 existe una buena correspondencia de valores observados y simulados
- En 1971-00, las tasas obtenidas con el modelo son inferiores a las observadas en Julio y Agosto



## PROCESO DE OLAS DE CALOR Proyección

### Validación del modelo con datos de HadCM3 para el clima actual

	1951-1980	1961-1990	1971-2000
Observed	1.50	1.64	1.76
HadCM3 A2a	2.10	1.73	1.93
HadCM3 A2b		1.70	1.66
HadCM3 A2c		1.87	1.64

Se estiman los valores ajustados de **longitud** de ola, uno por mes, usando como entrada en el modelo el valor máximo de  $T_{x_{m31}}$  en dicho mes

Cada valor en esta tabla es una media ponderada de esas longitudes ajustadas, con pesos iguales a las frecuencias ajustadas por el modelo de ocurrencia

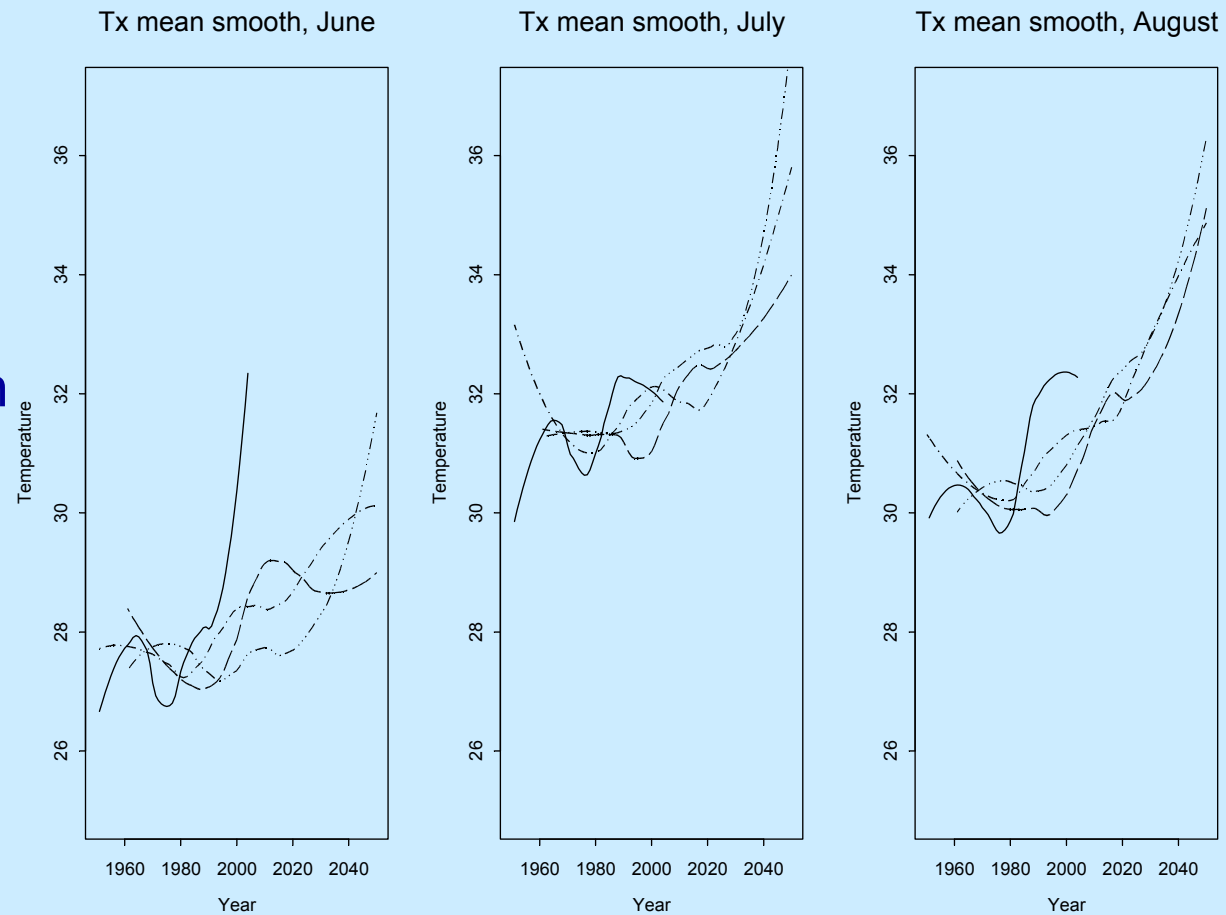
Los resultados para los periodos 1961-90 y 1971-2000 son similares a los observados



# PROCESO DE OLAS DE CALOR Proyección

## Trayectorias HadCM3 SRES-A2 de Tx, escalada, hasta 2050

Las trayectorias del GCM no reflejan el calentamiento reciente observado en Junio



## PROCESO DE OLAS DE CALOR Proyección

### Proyección del modelo estadístico con datos HadCM3 SRES-A2

El número de olas podría incrementar hasta un factor 3, para 2040,  
 y un factor mayor que 4.5 para 2050, en la peor trayectoria

La proyección para la longitud muestra, en 2 de las trayectorias,  
 que éstas podrían doblarse en 50 años

	Mean observed frequency				Fitted occurrence rate HadCM3											
	Jn	Jl	Ag	JJA	A2a				A2b				A2c			
Jn					Jl	Ag	JJA	Jn	Jl	Ag	JJA	Jn	Jl	Ag	JJA	
1951-80	0.20	1.13	0.70	2.03	0.13	1.42	0.91	2.46								
1961-90	0.23	1.33	0.90	2.47	0.12	1.22	0.67	2.01	0.11	1.21	0.63	1.96	0.11	1.23	0.69	2.03
1971-00	0.13	1.70	1.00	2.83	0.11	1.29	0.81	2.20	0.09	1.13	0.54	1.76	0.10	1.18	0.59	1.87
1981-10					0.15	1.41	0.87	2.42	0.15	1.23	0.68	2.05	0.10	1.31	0.70	2.11
1991-20					0.16	1.49	1.05	2.70	0.36	2.61	1.75	4.72	0.28	2.89	1.86	5.03
2001-30					0.17	1.45	1.25	2.87	0.42	2.86	2.36	5.65	0.34	3.46	2.27	6.07
2011-40					0.46	3.02	2.87	6.35	0.43	3.71	4.16	8.30	0.43	4.04	2.98	7.45
2021-50					0.87	4.87	3.84	9.58	0.36	3.35	13.6	17.3	1.11	5.38	4.15	10.6



## PROCESO DE OLAS DE CALOR

### Propiedades de la metodología

- Permite obtener proyecciones para sucesos extremos; podría plantearse aplicarlo a heladas u otro tipo de extremos similar (¿sequías?)
- No requiere un gran esfuerzo de modelización



## **PROCESO DE OLAS DE CALOR**

### **Inconvenientes y defectos de aplicación**

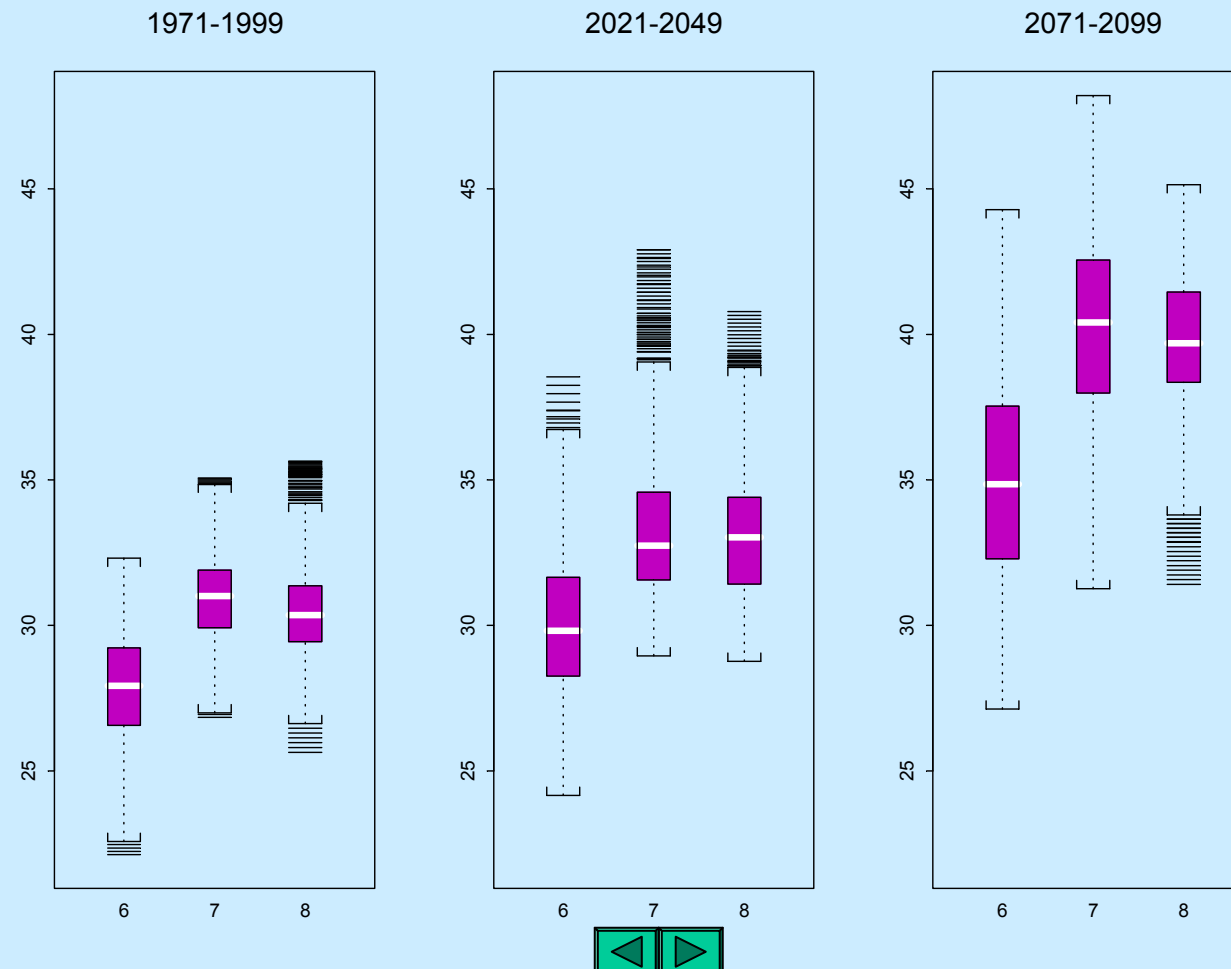
- No se ha analizado la capacidad del GCM para generar series diarias de Tx verosímiles
- Por comodidad, se usa información agregada a escala mensual
- Sólo utiliza información de temperatura en superficie (Tx)
  - No incluye otras variables climáticas estables y bien representadas, como presión o campos geopotenciales
  - Plantea problemas de extrapolación al aplicarlo con un horizonte alejado, debido al fuerte incremento proyectado para la temperatura



## PROCESO DE OLAS DE CALOR

### Ventajas e inconvenientes de la metodología

El incremento proyectado en Tx para 2071-2099 aconseja no usar el modelo para hacer proyecciones con ese horizonte



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Esquema de la presentación

Abaurrea y Asín, Climate Research (2005)

- **Objetivo:** Desarrollar un procedimiento para obtener proyecciones de la precipitación diaria a escala local
- Pasos del procedimiento
- Ventajas e inconvenientes del método



## **PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL**

### **Pasos del procedimiento de downscaling**

#### 1) Selección de los predictores potenciales

Análisis de las variables climáticas para seleccionar las que son reproducidas correctamente: comparación de las distribuciones en la trayectoria observada y en la simulada por el GCM

#### 2) Ajuste del modelo estadístico de precipitación diaria

3) Análisis del grado de reproducción del régimen de precipitación, a escala diaria y agregada, que se obtiene con el modelo, cuando se utiliza con los datos simulados por el GCM en el clima actual

En su caso, replanteamiento de los pasos 1) y 2)

#### 4) Obtención de proyecciones en el escenario de cambio climático



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Modelo estadístico

El modelo estadístico pretende caracterizar las relaciones estadísticas, a escala local, entre la precipitación diaria y las variables climáticas más estables, que los AOGCMs (RCMs) reproducen adecuadamente

- Cavazos (2000), J. Climate
- Beckmann y Buishand (2002), Int. J. Climatol.
- Stehlik y Bardossy (2002), J. Hydrol.
- Sumner, Romero, Homar, Ramis, Alonso, Zorita (2003), Clim. Dyn.
- Beersma y Buishand (2003), Climate Research
- Fowler, Kilsby, O'Connell, Burton (2005), J. Hydrol.

Modelo de precipitación diaria (Stern y Coe, 1984, J. R. Statistic. Soc. A)

Se modelan separadamente

- el **proceso de ocurrencia**, serie de datos binarios
- el **proceso de cantidades** de precipitación acumuladas en los días húmedos



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Modelo estadístico

El modelo estadístico pertenece a la familia de los **Modelos lineales generalizados** (GLM), de tipo función de transferencia

- El proceso de ocurrencia:
  - Se modela la serie de datos binarios mediante una **distribución binomial**
  - La probabilidad del valor 1 (precipitación mayor o igual que el umbral) se hace depender de predictores
- El proceso de cantidad acumulada en un día con precipitación:
  - La cantidad diaria se modela con una distribución **Gamma**
  - El valor medio (y la varianza) se hace depender de predictores



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Modelo estadístico

Modelos lineales generalizados (GLM)

$Y(t)$  = precipitación acumulada en el día  $t$

$X(t)$  = vector de variables predictoras para el día  $t$ , términos armónicos, covariables climáticas, interacciones...

$\alpha$  = parámetros que expresan el efecto de los predictores en el modelo de ocurrencia

$\beta$  = parámetros del modelo de cantidad

- El proceso de ocurrencia:

$$P(Y(t) \geq \textit{umbral}) = \frac{e^{\alpha^T X(t)}}{1 + e^{\alpha^T X(t)}}$$

- El proceso de cantidades: distribución Gamma, con parámetro de forma constante y valor esperado ligado al predictor lineal con un enlace logarítmico

$$E(Y(t) | Y(t) \geq \textit{umbral}) = e^{\beta^T X(t)}$$



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Datos disponibles

**Datos:** observatorio del INM en el aeropuerto de Zaragoza

#### **Superficie:**

- Precipitación
- Temperatura máxima y mínima
- En las 4 horas tipo: temperatura, humedad, presión atmosférica, viento

En distintos **niveles geopotenciales**, radiosonda 2 veces al día

- Temperatura, humedad, viento, altura geopotencial
- Sólo disponibles desde 1990; el periodo analizado ha sido 1990-2000



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Datos seleccionados

**Datos simulados por CGCM1** en el punto de su red más próximo al aeropuerto de Zaragoza

Extraídos de la página Web del Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)

#### **Superficie:**

- Precipitación
- Temperatura máxima y mínima
- Temperatura, humedad, presión atmosférica, componentes de viento

#### **Geopotenciales 850 y 500hPa**

- Altura, temperatura, humedad, componentes de viento

#### Periodos

situación actual, 1990-2000

escenario IS92a, 2090-2100

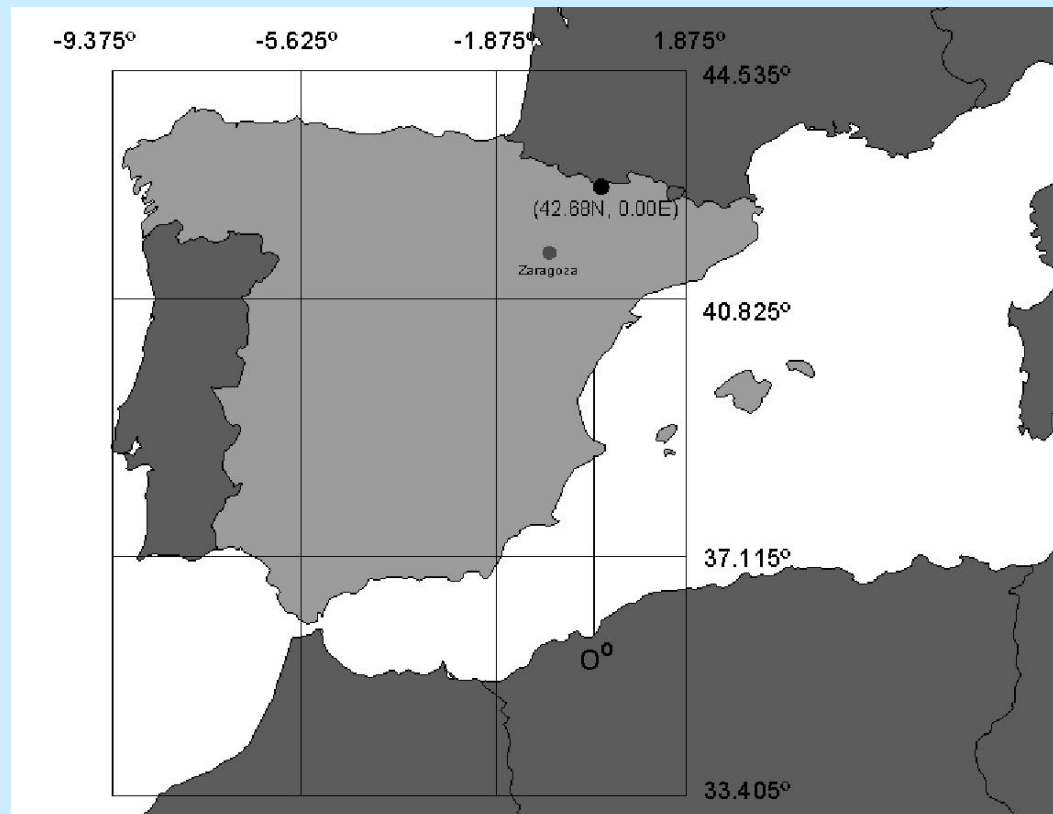


# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Restricciones para los predictores potencialmente útiles

### Celda de CGCM1

Integra un territorio muy heterogéneo, geográfica y climáticamente

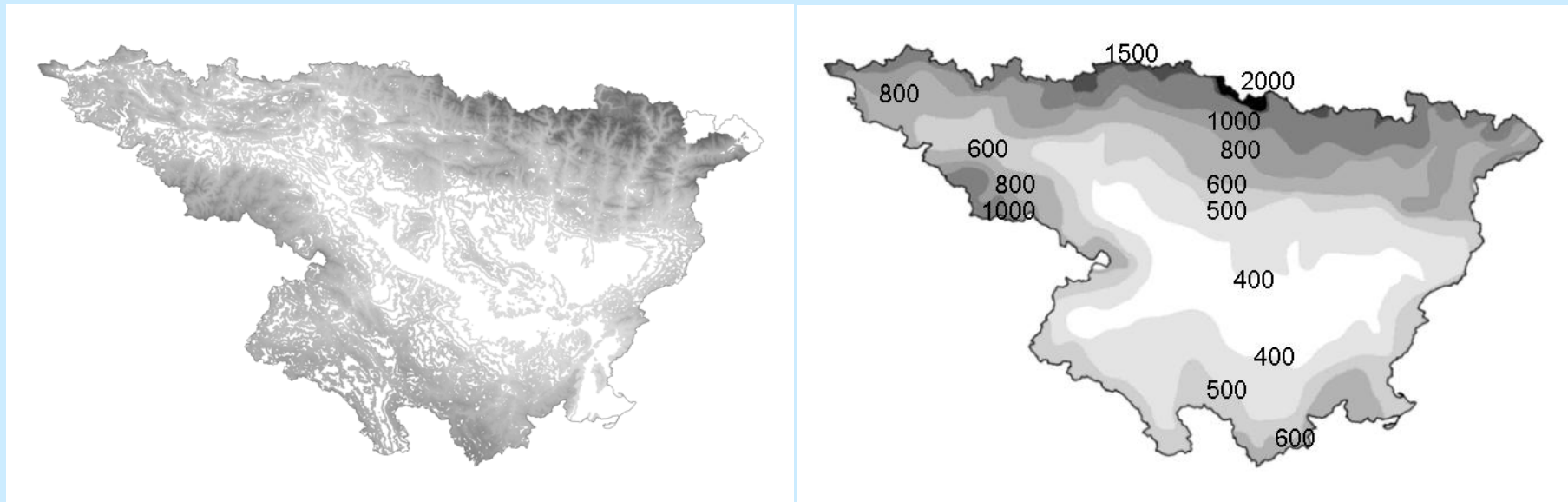


## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL Características de la Cuenca del Ebro

Complicado relieve de la Cuenca del Ebro, que provoca una diversidad de patrones de precipitación

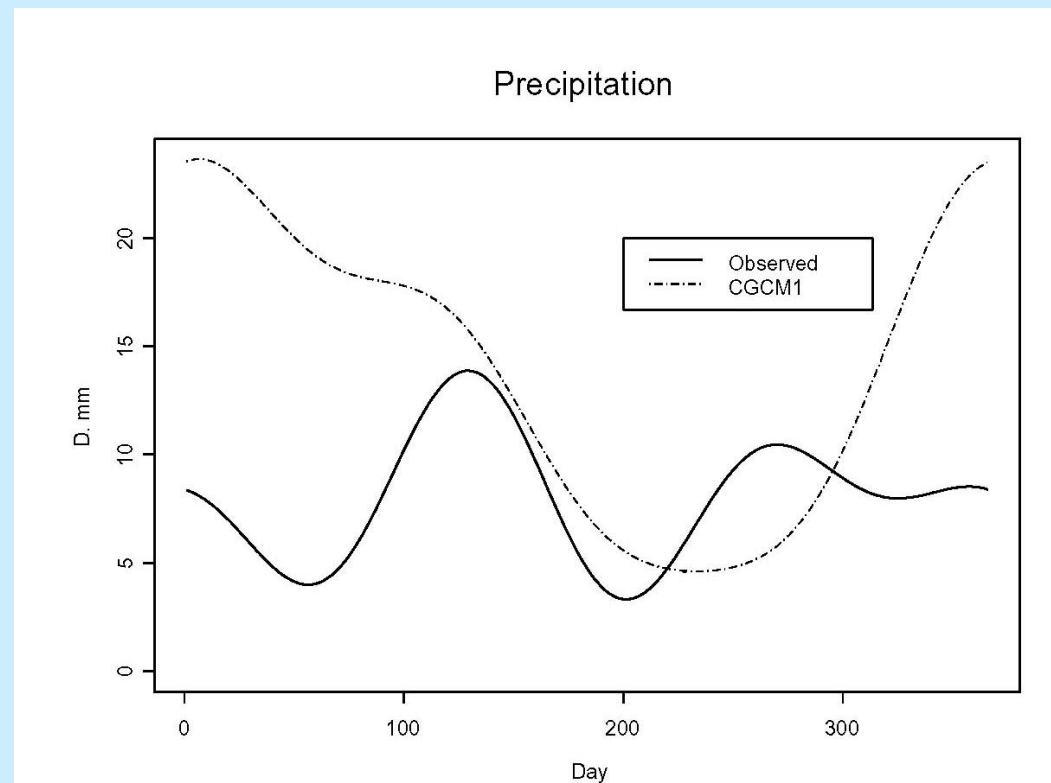
Fuerte gradiente pluviométrico desde el NW y el N hacia el centro-este de la Cuenca

Zaragoza con precipitación media anual alrededor de 300 mm



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL Comparación de la precipitación observada y simulada

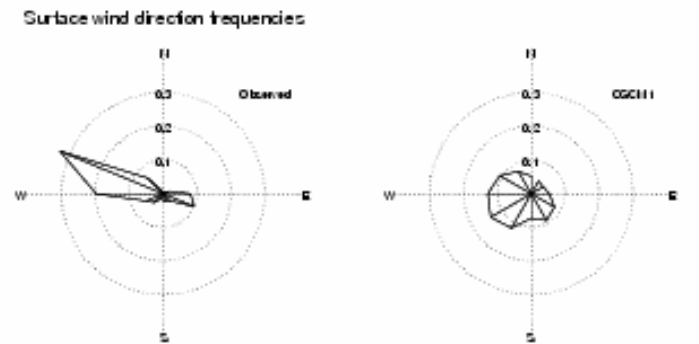
La simulación CGCM1 de la precipitación para el clima actual no se corresponde con las características observadas en Zaragoza



# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

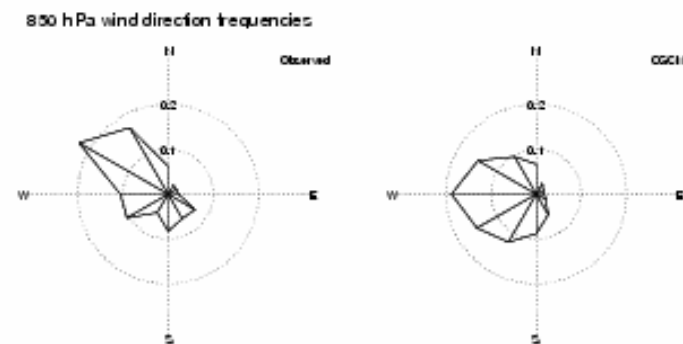
## Rosas de viento observadas y simuladas

Superficie



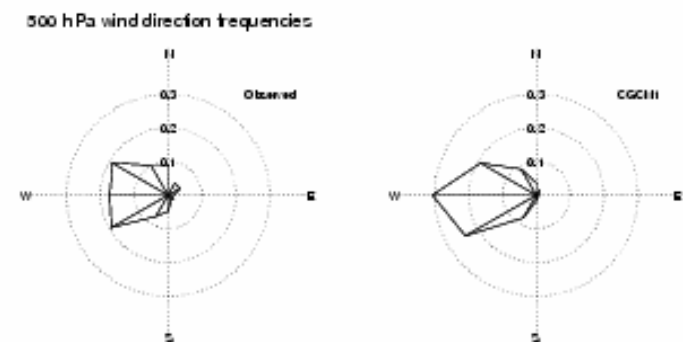
La simulación de CGCM1 para las componentes de viento no se corresponde con lo observado, predominio del NW (cierzo) en Zaragoza

850hPa



Más similitud a mayor altura

500hPa



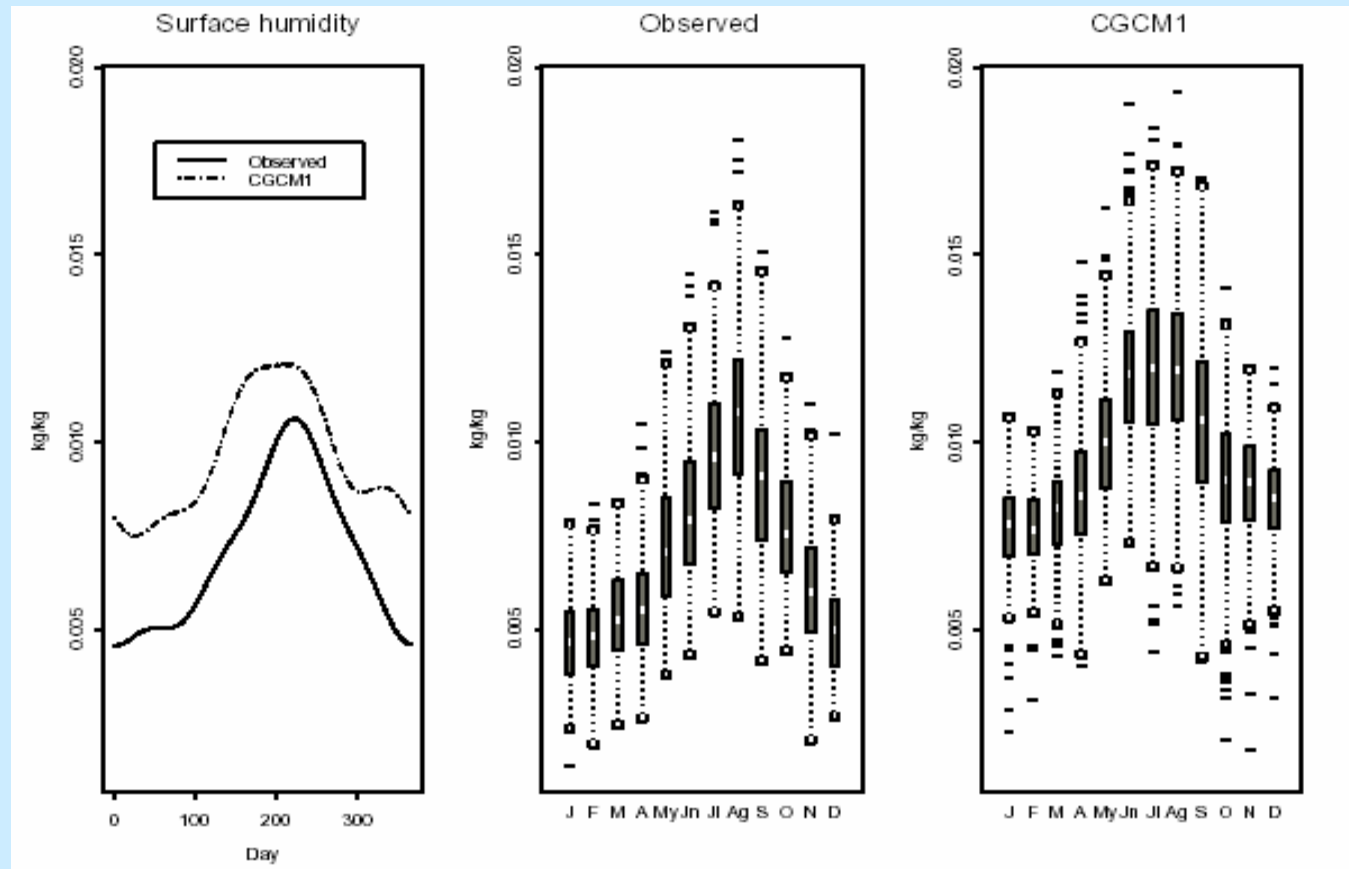
Observ.

CGCM1

# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Comparación de la humedad

Humedad en superficie: similar dispersión



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Exigencias a los predictores potenciales

Algunas discrepancias son debidas a diferencias en el valor medio, por ello, las anomalías respecto al nivel medio estacional podrían ser comparables

Se realizan **contrastes estadísticos**, paramétricos y no paramétricos, para comparar la distribución de los datos diarios, **por meses**, observados y simulados por CGCM1 para el clima actual

- posición central (test t, Wilcoxon)
- dispersión (test F, Wilcoxon sobre distancias a la media)
- distribución (test KS)



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Exigencias a los predictores potenciales

#### Conclusiones de la comparación

- Globalmente, ninguna variable puede ser seleccionada. Para la mayoría de los meses la distribución es distinta a la observada debido a diferencias en el nivel medio
  - La humedad específica en 500hPa tiene, salvo en Primavera, características estadísticas similares a la registrada en Zaragoza
- No se utiliza la información de viento
- Se acepta la hipótesis de la igualdad de distribución de algunas **anomalías**

Nivel	Anomalía		
Superficie	Temperatura mínima Rango diario de temperatura	Humedad específica	Presión
850hPa		Humedad específica	Altura geopotencial
500hPa	Temperatura	Humedad específica	Altura geopotencial
	Diferencia de temperatura entre 850hPa y 500hPa		



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL Exigencias a los predictores potenciales

### Conclusiones de la comparación

Algunas de estas anomalías no son reproducidas adecuadamente en ciertas épocas del año, sin embargo no puede prescindirse de ellas totalmente porque el modelo estadístico pierde calidad de ajuste

Ej.: temperatura mínima

**Compromiso:** se utilizan como predictores en aquellas estaciones donde su representación por parte del GCM es adecuada



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Ajuste del modelo estadístico

Procedimiento de ajuste no automático

No se realiza una reducción de la dimensión de la matriz de covariables

Proceso iterativo de introducción de potenciales predictores:

- Armónicos para representar el ciclo estacional
- Efectos cuadráticos o cúbicos de variables climáticas
- Efectos asociados a días adyacentes
- Se introducen los términos atendiendo sólo a su significación estadística



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Ajuste del modelo estadístico

Effect	Down-Oc			Down-Q ( $\nu = 1.443$ )		
	Coef.	Std. error	Coef./se.	Coef.	Std. error	Coef./se.
$\beta_0$	-1.808	0.110	-16.470	3.030	0.087	34.750
S1	-0.165	0.112	-1.475	0.046	0.089	0.512
C1	0.328	0.133	2.467	-0.097	0.112	-0.872
S2	-0.491	0.099	-4.945	-0.237	0.080	-2.944
C2	-0.207	0.116	-1.778	-0.409	0.101	-4.040
S3	0.237	0.098	2.428	4.26e-3	0.081	0.052
C3	0.306	0.100	3.052	0.260	0.083	3.139
S4	0.276	0.097	2.842	0.162	0.078	2.079
C4	-0.179	0.095	-1.892	-0.011	0.078	-0.144
$z.PSUP_t$	-0.018	2.39e-3	-7.507			
$z.PSUP_t^2$	-3.37e-5	1.13e-5	-2.978			
$z.PSUP_{t-1}$	9.47e-3	3.75e-3	2.524			
$z.A850_{t-1}$	-7.26e-3	3.37e-3	-2.154			
$z.A850_{t+1}$				-9.36e-3	1.48e-3	-6.314
$z.A850_{t+1}^2$				-2.22e-5	1.08e-5	-2.047
$z.Q850_{t+1}$	135.10	75.99	1.778			
$z.Q850_{t+1}^2$	-9.59e4	2.65e4	-3.618			
$z.Q500_t$	538.4	141.7	3.798	336.8	100.8	3.343
$z.Q500_{t+1}$	615.5	149.2	4.125			
$z.T500_{t+1}$	-0.018	2.75e-3	-6.430			
$z.T85/50_{t+1}$				-4.4e-3	2.15e-3	-2.045
$z.T85/50_{t+1}^2$				-1.43e-4	4.12e-5	-3.475
winter : $z.TMIN_t$	-0.024	7.16e-3	-3.414			
winter : $z.TDIF_t$	-0.027	5.22e-3	-5.205	-0.016	3.44e-3	-4.532
winter : $z.TDIF_t^2$	2.48e-4	1.13e-4	2.198			
winter : $z.QSUP_t$	1063.0	210.4	5.050			
spring : $z.TMIN_t$	0.027	5.81e-3	4.591			
spring : $z.A500_t$				2.76e-3	1.20e-3	2.309
spring : $z.A500_{t+1}$	-4.91e-3	1.76e-3	-2.795			
summer : $z.TDIF_t$	-0.024	6.04e-3	-3.969			
summer : $z.QSUP_t$	447.2	87.0	5.141	172.9	71.6	2.416
summer : $z.A500_{t+1}$	-0.012	2.99e-3	-4.074	-4.39e-3	1.94e-3	-2.267
autumn : $z.TDIF_t$	-0.026	4.63e-3	-5.694			
autumn : $z.QSUP_t$	489.5	89.9	5.443			

Modelos ajustados complejos:

- armónicos hasta 4º orden,
- efectos particulares en ciertas estaciones, ej. anomalía de temperatura mínima o humedad en superficie,
- Términos cuadráticos, ej. presión en superficie



## **PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL**

### **Evaluación del modelo estadístico**

- 1) Análisis del grado de ajuste alcanzado por el modelo en
  - el periodo de estimación 1990-1997
  - el periodo reservado para su validación 1998-2000
  
- 2) Evaluación para su uso en el downscaling, análisis del modelo alimentado con los datos de CGCM1 para el clima actual

Se comparan características de la precipitación agregada y diaria obtenidas mediante la simulación del modelo



## **PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL**

### **Evaluación del modelo estadístico**

#### Características en escala agregada

- Reproducción del ciclo estacional de la frecuencia y la cantidad de precipitación

#### Características en escala diaria, simulación del modelo

- Probabilidad de ocurrencia de precipitación
- Probabilidad de precipitación condicionada a ocurrencia en el día previo
- Distribución de la longitud de racha seca y húmeda
- Valor medio y desviación típica de la cantidad diaria
- Distribución de la cantidad diaria



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Evaluación del modelo estadístico

#### Grado de ajuste del modelo estadístico

Porcentaje de variabilidad explicada por el modelo, por estaciones y globalmente

	Global	Inv.	Prim.	Ver.	Oto.
Ocurrencia	39.6	40.6	36.1	38.5	40.7
Cantidad	17.4	22.7	13.6	23.3	10.8

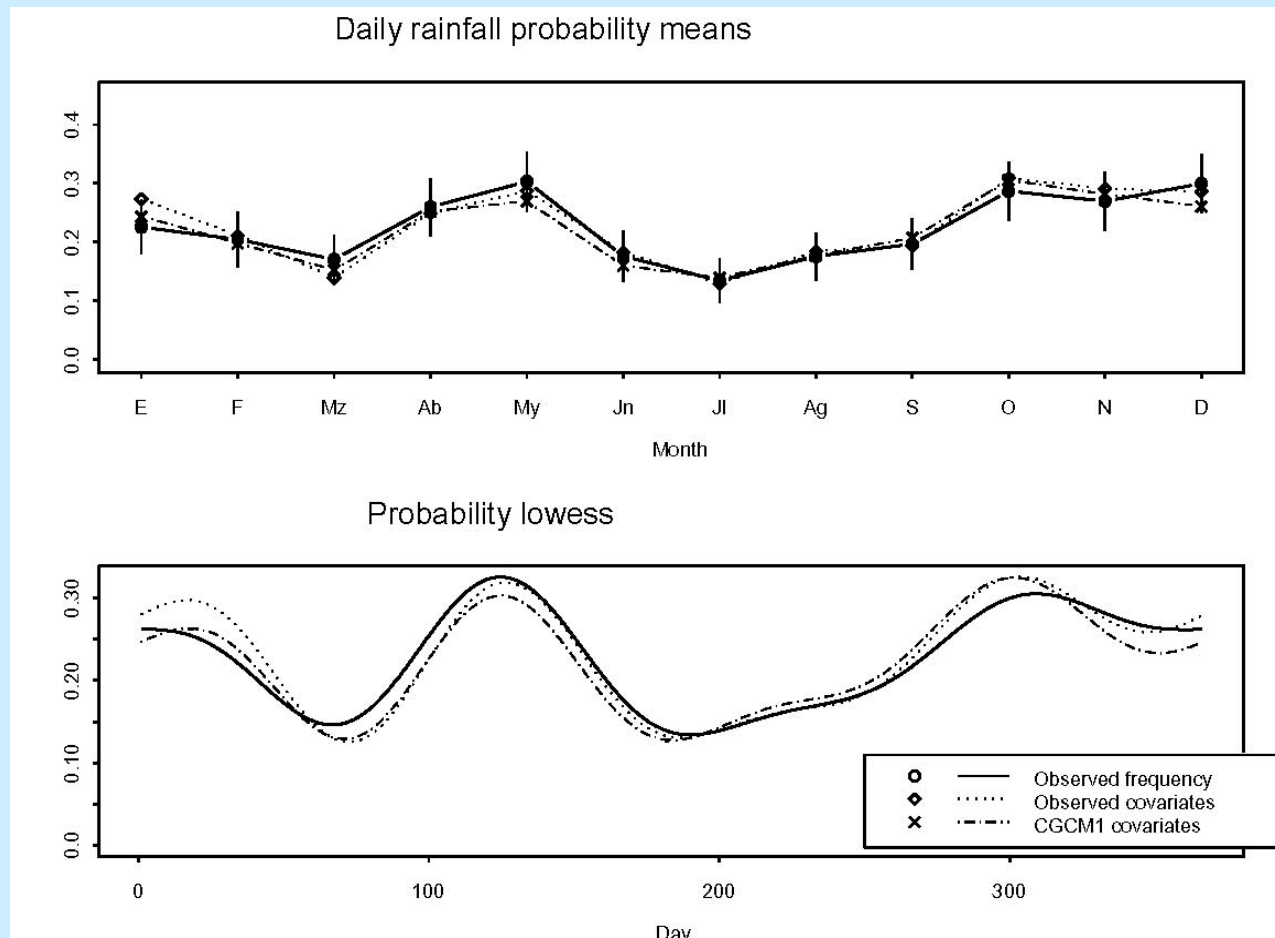
Beckmann & Buishand (2001), para un modelo de cantidades similar, alcanzan valores en torno al 20% en observatorios austriacos y suizos y un 13% como máximo en observatorios de la Península Ibérica



# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Evaluación del modelo estadístico

### Reproducción del ciclo estacional de la frecuencia

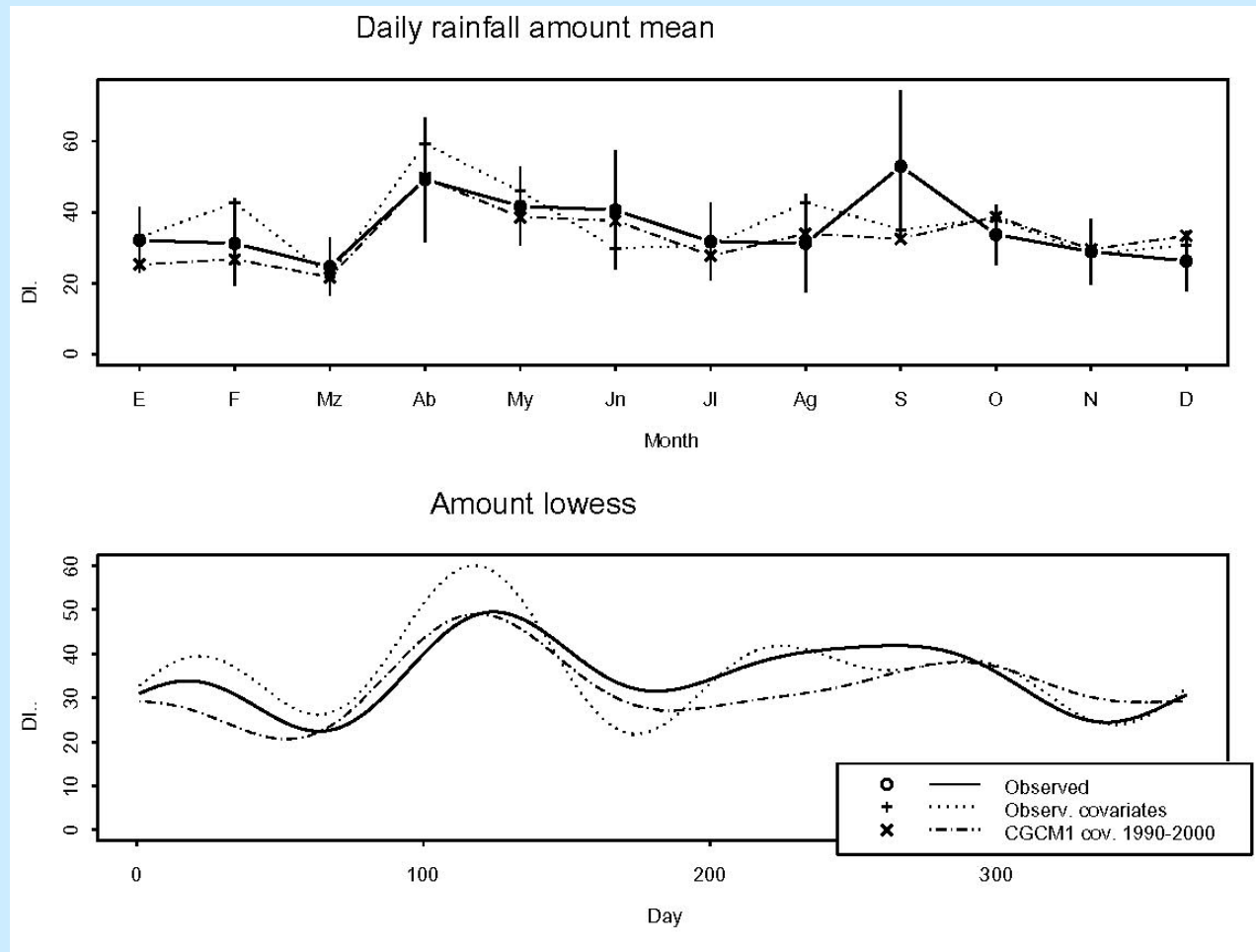


Sesgos inferiores al 8% en la frecuencia estacional, cuando se usan los datos de CGCM1

# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Evaluación del modelo estadístico

### Reproducción del ciclo estacional de la cantidad



Sesgos inferiores al 7% en la cantidad estacional, cuando se usan los datos de CGCM1



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL Evaluación del modelo estadístico

### Reproducción de las características diarias, Wilby et al (1998)

Simulación de 20 trayectorias del modelo utilizando

- Los valores observados de las covariables
- Los valores obtenidos de la simulación de CGCM1 para el clima actual

		Model simulated data	
Diagnostic statistic	Observed	Observed covar.	GCM data 1990–2000
Mean wet day amount	36.67	37.02	33.66
SD wet day amount	54.99	58.33	52.96
Median wet day amount	16.00	16.38	15.00
Maximum daily precipitation	413.0	946.4	1159.0
$p_{00} = P(Y_t = 0   Y_{t-1} = 0)$	0.826	0.826	0.833
$p_{11} = P(Y_t = 1   Y_{t-1} = 1)$	0.434	0.417	0.418
$p_w = P(Y_t = 1)$	0.235	0.230	0.223
Mean wet-spell length	1.79	1.72	1.72
Mean dry-spell length	5.88	5.73	5.60
Frequency of dry-spells > 1day	0.142	0.153	0.171

Resultados similares a los observados, salvo en la precipitación máxima



## **PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL** **Evaluación del modelo estadístico**

### **Reproducción de las características diarias, distribución de la longitud de racha**

Con las covariables observadas:

El test KS no es significativo al nivel 5%, salvo para las rachas húmedas de Febrero

Con las covariables de CGCM1 1990-2000:

El test KS no es significativo al nivel 5%, salvo para las rachas secas de Junio



## **PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL** **Evaluación del modelo estadístico**

### **Reproducción de las características diarias, distribución de la cantidad**

Con las covariables observadas:

El test KS no es significativo al nivel 5% en los meses de Verano y al 1% también en los meses de Otoño

Con las covariables de CGCM1 1990-2000:

El test KS no es significativo al nivel 1% en 6 meses y sólo en 2 al nivel 5%



# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Evaluación del modelo estadístico

### Conclusiones de la validación

1) Para la frecuencia el modelo es satisfactorio

Las series de precipitación simuladas cuando el modelo se usa con datos de CGCM1 para el periodo actual, son indistinguibles de las observadas en cuanto a la

- frecuencia,
- persistencia y
- longitud de racha

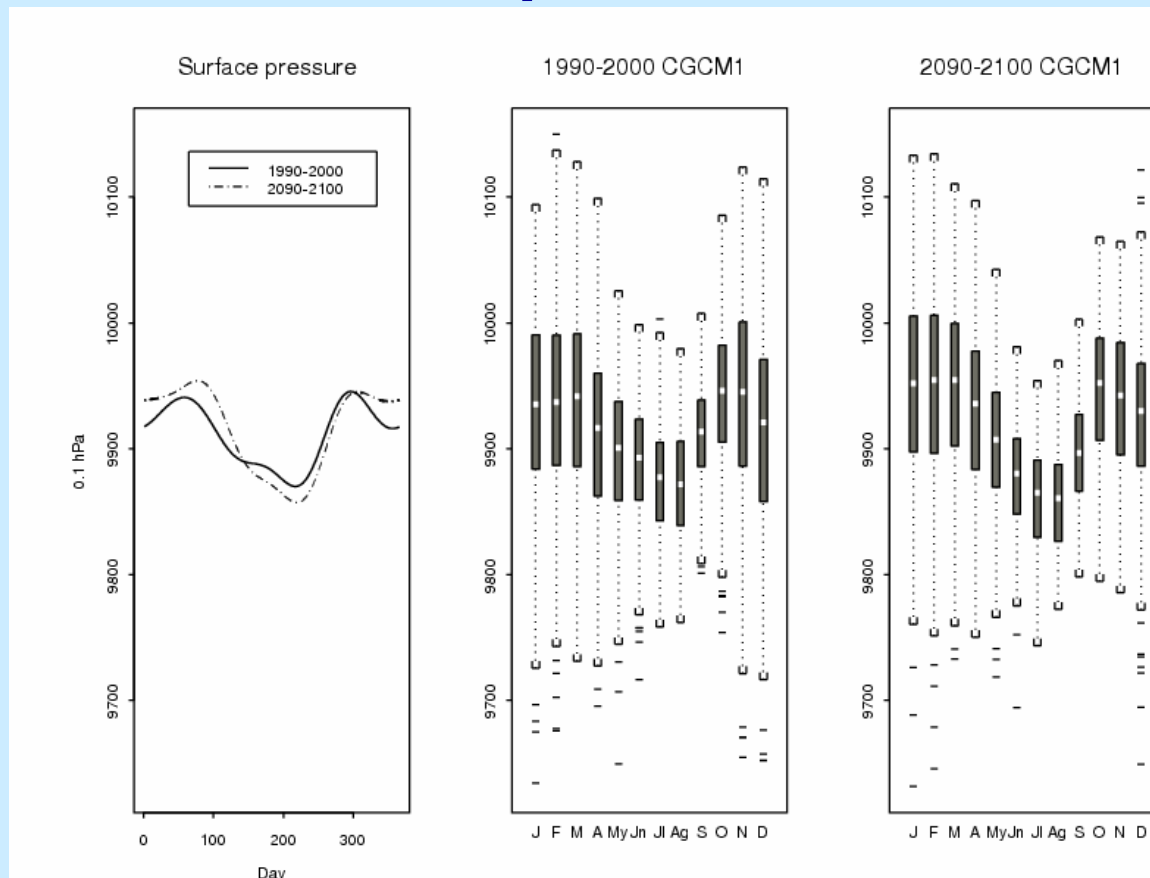
2) Para la cantidad, el modelo estadístico produce similares valores medios mensuales, pero no es capaz de reproducir la distribución en la mayoría de los meses



# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Proyección para 2090-2100

### Análisis comparativo de los resultados de CGCM1 para 1990-2000 y 2090-2100

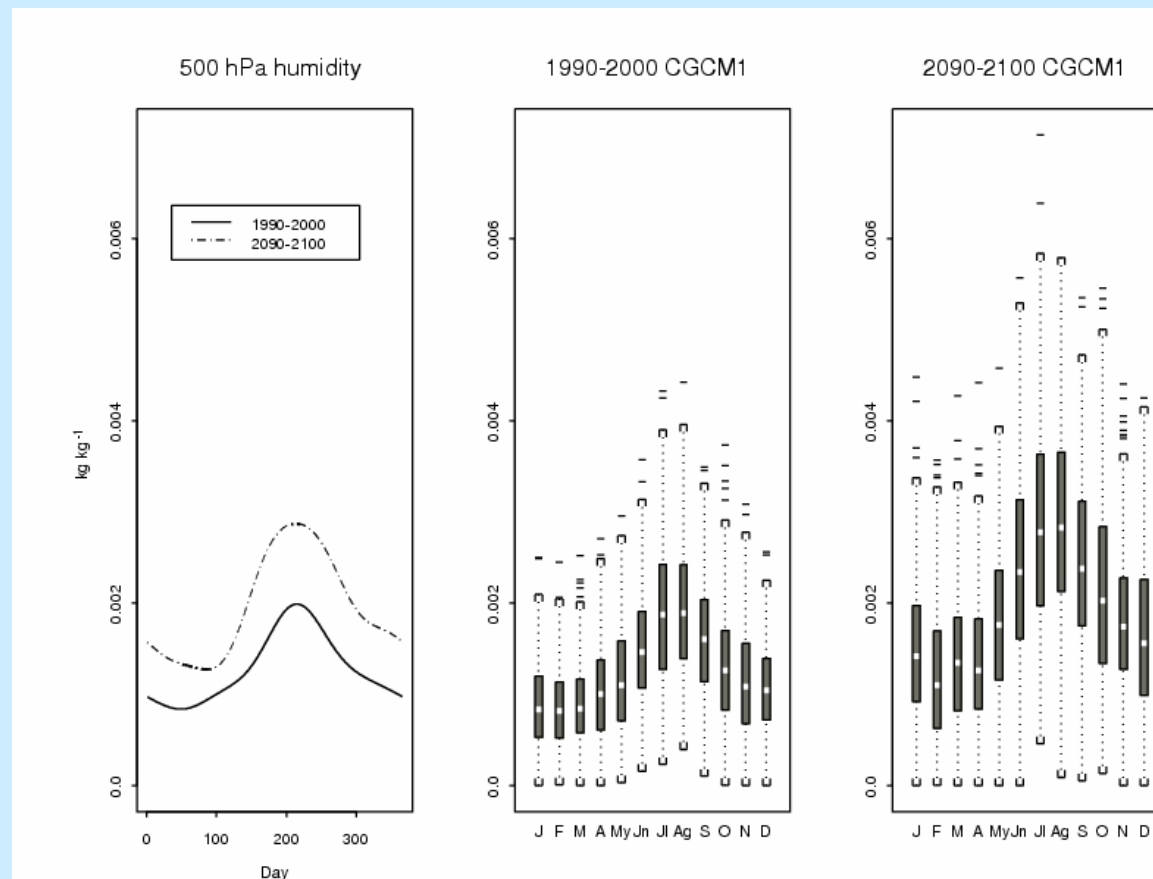


Cambios en la presión atmosférica poco relevantes



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL Proyección para 2090-2100

### Análisis comparativo de los resultados de CGCM1 para 1990-2000 y 2090-2100



Para la humedad específica se proyectan incrementos en el valor medio y en la variabilidad en los tres niveles, manteniendo el perfil estacional. El incremento es mayor, en términos relativos, a mayor altura.

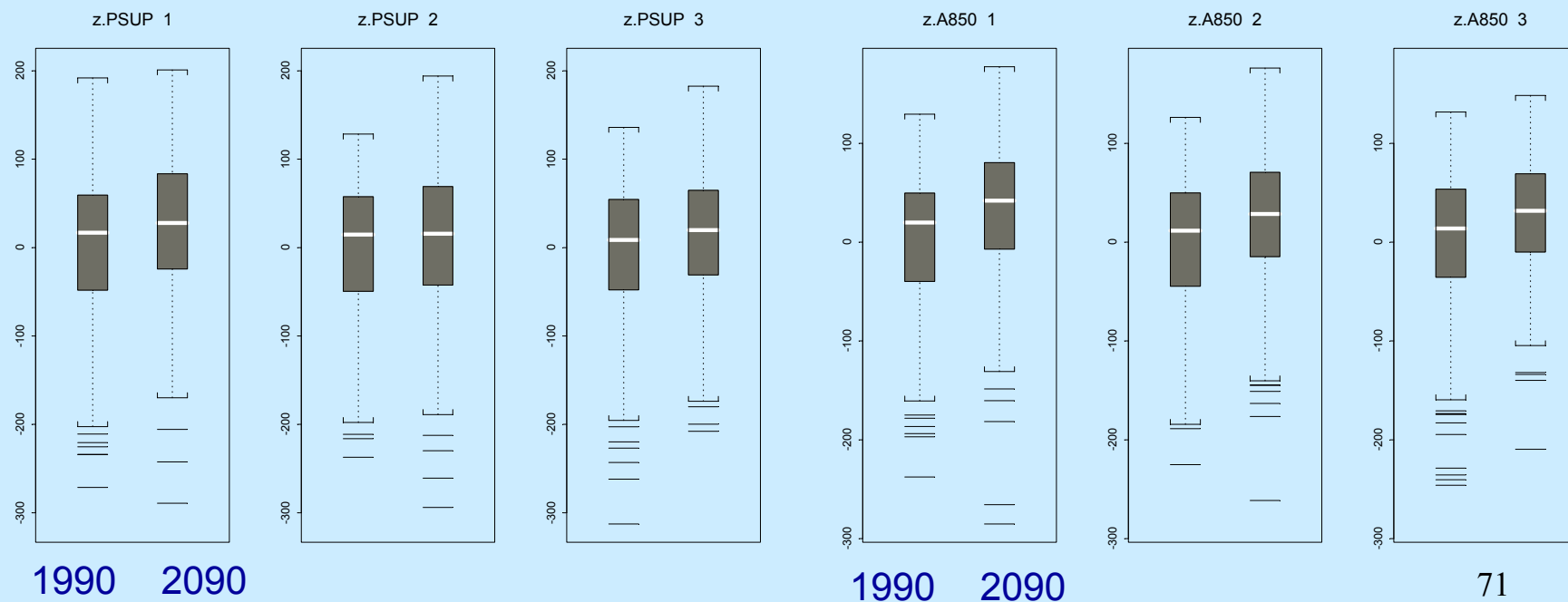


# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Proyección para 2090-2100

### Uso del modelo estadístico

Similar rango de valores para las anomalías de presión atmosférica y de altura del geopotencial 850hPa



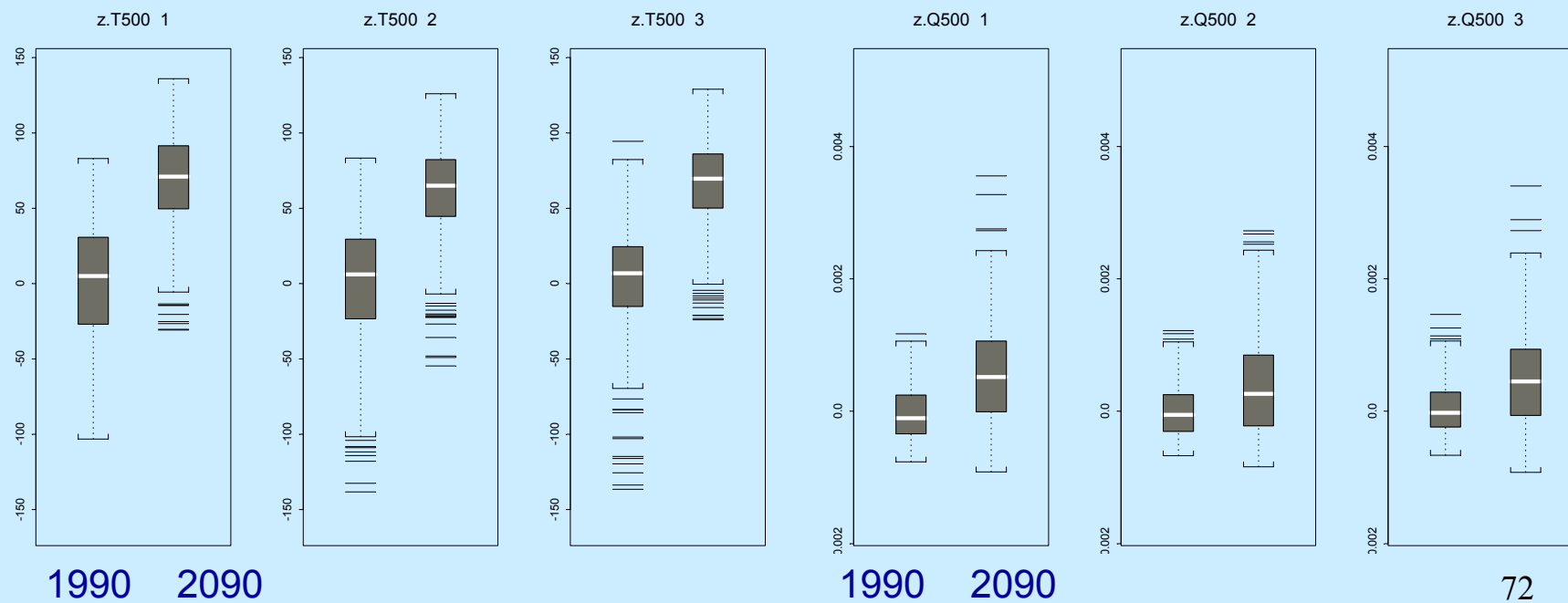
# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Proyección para 2090-2100

### Uso del modelo estadístico

Distinto rango y distribución para las anomalías de temperatura y de humedad en 500hPa

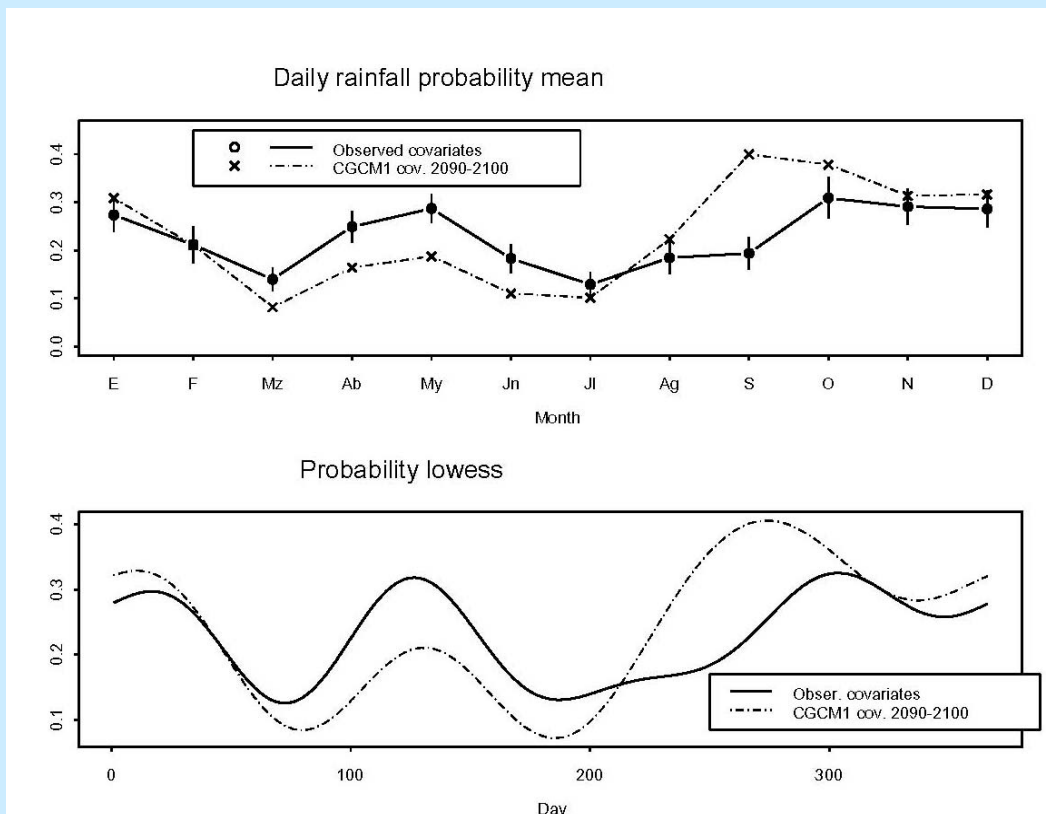
El modelo estadístico se aplica en condiciones de extrapolación



# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Proyección para 2090-2100

### Resultados de la proyección para la frecuencia



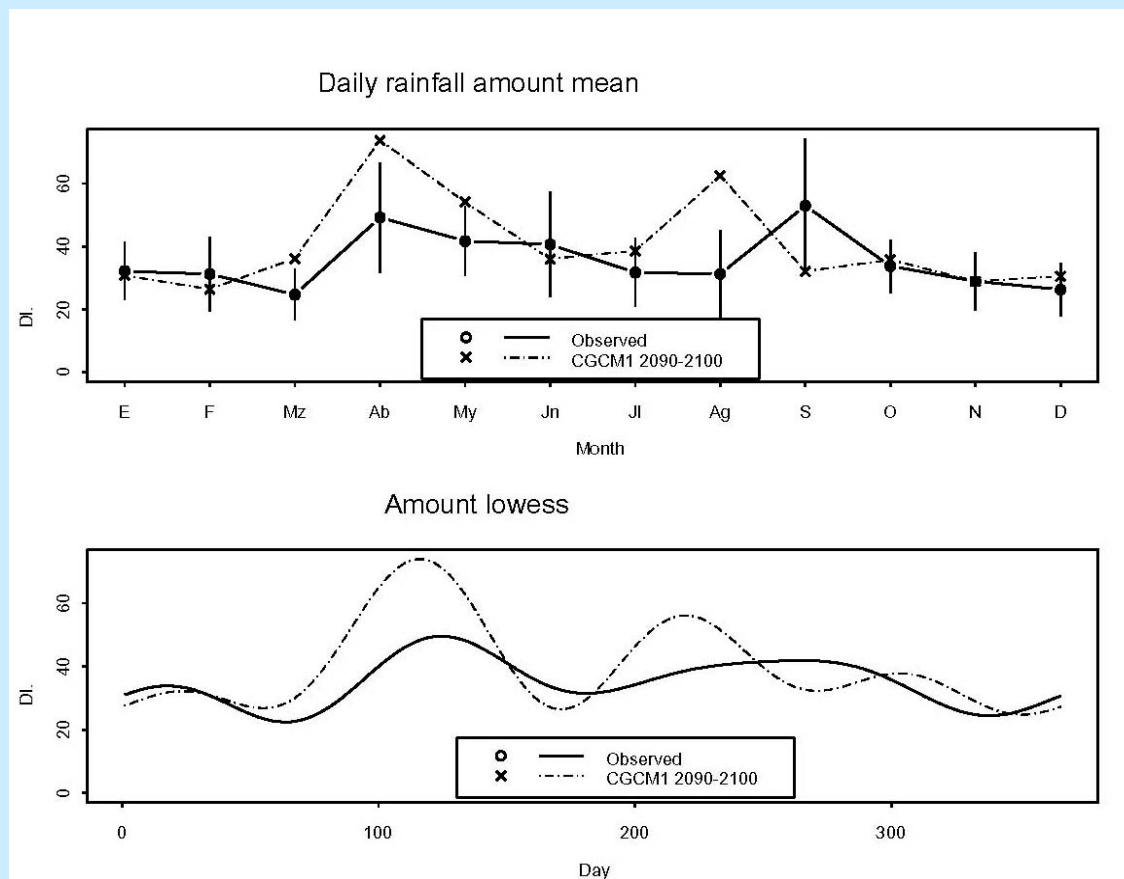
Menor frecuencia en Primavera  
Mayor frecuencia en Septiembre



# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Proyección para 2090-2100

### Resultados de la proyección para la cantidad diaria



Mayor intensidad en  
Primavera y en  
Agosto



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL Proyección para 2090-2100

### Cambio en el régimen estacional

Model fitted values with GCM covariables for 2090-2100					
Wet day frequency					
	Annual	Winter	Spring	Summer	Autumn
Observed value	82.1	22.0	22.5	15.0	22.8
Fitted value	84.8	25.1	13.2	13.6	32.9
% change/observed	3.2	14.1	-41.3	-9.3	44.5
% change/GCM 1990-2000	4.9	18.4	-36.2	-6.8	36.0
Rainfall amount					
	Annual	Winter	Spring	Summer	Autumn
Observed value	2920.0	648.0	906.0	518.0	850.0
Fitted value	3260.0	745.0	764.0	686.0	1070.0
% change/observed	11.7	14.9	-15.7	32.4	25.9
% change/GCM 1990-2000	19.0	22.5	-10.7	41.4	35.3

Anualmente, cambios poco relevantes en la frecuencia; mayores en la cantidad acumulada

Primaveras más secas, similares a los actuales Veranos

Veranos y Otoños más húmedos



# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Propiedades de la metodología

### De carácter general

- El análisis sobre el grado de reproducción del clima observado se realiza en la escala diaria

La modelización propuesta permite obtener conclusiones sobre aspectos de la escala diaria relevantes para las aplicaciones hidrológicas: distribución de las longitudes de racha, rachas extremas, etc.

- La metodología es susceptible de proporcionar mejores resultados incorporando variables bien representadas por futuras versiones de los GCM o por RCM de mayor resolución



## PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

### Propiedades de la metodología

#### Respecto a otras metodologías estadísticas

- a) El modelo de regresión seleccionado es **más flexible que otros basados en la clasificación de tipos de clima**
  - Es posible usar cualquier variable bien representada por el GCM, lo que incrementa la sensibilidad del downscaling: humedad en 500hPa y en superficie, rango de temperaturas,...
- b) Frente a los **generadores de clima**, nuestro método utiliza salidas del modelo climático en la escala diaria
- c) Respecto a otros modelos basados en obtener una función de transferencia
  - Permite introducir relaciones no lineales y utiliza distribuciones no gaussianas adecuadas a las características de la respuesta



# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Problemas de la metodología

### Problemas particulares

El ajuste no es completamente automatizable

Es modelo-dependiente y local-dependiente:

- debe valorarse cuáles son las variables bien representadas por el modelo numérico en la región de interés
- debe ajustarse el modelo en cada lugar, lo que puede significar el uso de distintos predictores según los puntos

### Problemas generales del downscaling estadístico

Supone una relación estacionaria entre la variable respuesta y los predictores

La introducción de determinados predictores y la ausencia de otros puede producir proyecciones muy diferentes

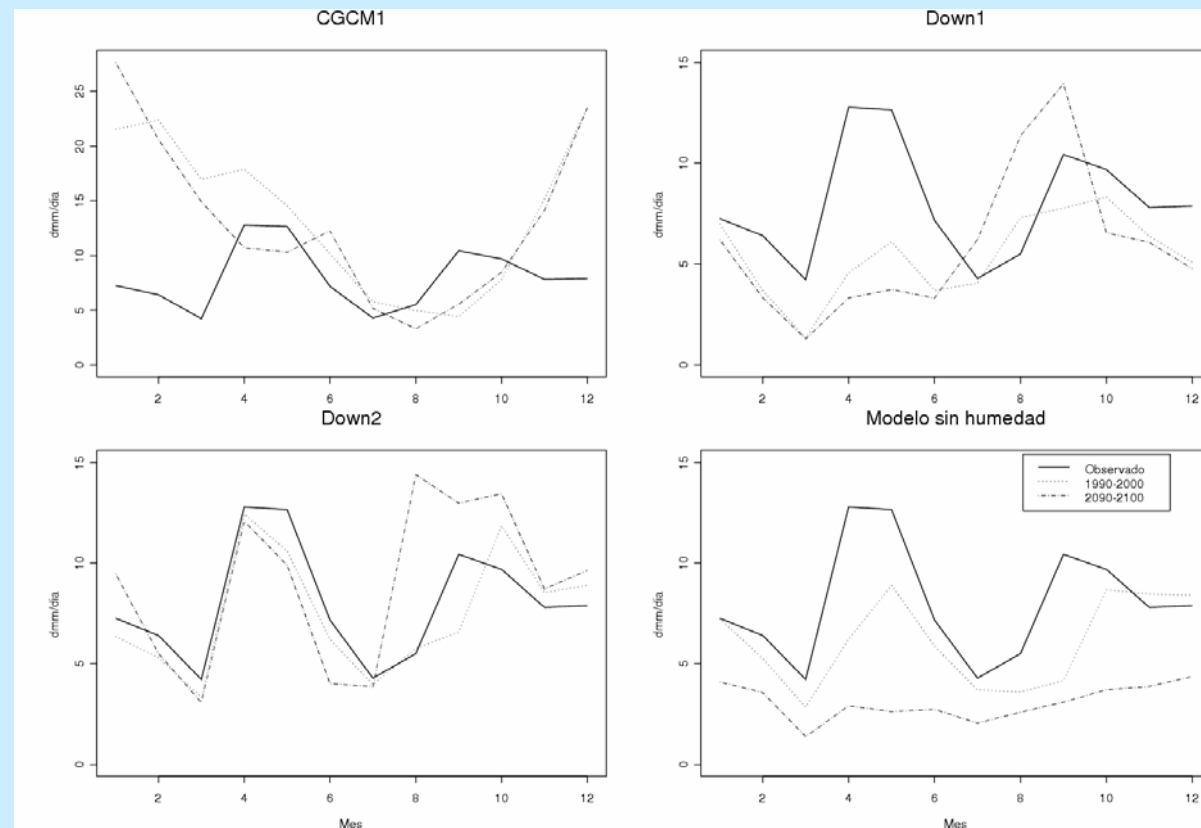


# PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL

## Problemas de la metodología

### Problemas generales del downscaling estadístico

La introducción de determinados predictores y la ausencia de otros puede producir proyecciones muy diferentes



## **PROCESO DE PRECIPITACIÓN DIARIA A ESCALA LOCAL**

### **Líneas actuales de trabajo**

#### **Proyecto ACCEBRO, 2006-09, financiado por CICYT**

Obtención de escenarios de cambio climático de la precipitación en las distintas zonas climáticas de la cuenca del Ebro para mediados y finales del siglo XXI

- Escenarios de cambio climático para el proceso de sequía meteorológica a escala regional
- Análisis del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en una subcuenca

Mejora del submodelo estadístico de cantidades

Extensión a un modelo multipunto

Adaptación del método para su utilización con datos de Reanálisis

Generación de escenarios regionales usando distintos modelos y escenarios SRES



## REFERENCIAS

- Abaurrea, J., Asín, J. (2005). Forecasting local daily precipitation patterns in a climate change scenario. *Clim. Res.*, 28, 183-197
- Abaurrea, J., Asín, J., Cebrián, A.C., Centelles, A. (2006). Modeling and projecting extreme hot events in the central Ebro valley, a continental-Mediterranean area. Por aparecer en *Global and Planetary Change*
- Beckmann, B.R., Buishand, T.A. (2001). KNMI contribution to the European project WRINCLE: downscaling relationships for precipitation for several European sites. KNMI, De Bilt
- Beckmann, B.R., Buishand, T.A. (2002). Downscaling relationships for precipitation for the Netherlands and North Germany. *Int. J. Climatol.*, 22, 21-32
- Beersma, J.J., Buishand, T.A. (2003). Multi-site simulation of daily precipitation and temperature conditional on the atmospheric circulation. *Clim. Res.*, 25, 121-133
- Cavazos, T. (2000). Using self-organizing maps to investigate extreme climate events: an application to wintertime precipitation in the Balkans. *J. Climate*, 13, 1718-1732
- Dai, A. (2006). Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models. *J. Climate*, 19, 4605–4630
- Fowler, H.J., Kilsby, C.G., O'Connell, P.E., Burton, A. (2005). A weather-type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of scenarios of climatic variability and change. *J. Hydrol.*, 308, 50-66
- Frei, C., Christensen, J.H., Déqué, M., Jacob, D., Jones, R.G., Vidale, P.L. (2003). Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps. *J. Geophys. Res.*, 108 (D3), paper 4124, doi:10.1029/2002JD002287



## REFERENCIAS

- Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J., Vidale, P.L. (2006). Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *J. Geophys. Res.*, D06105, doi: 10.1029/2005JD005965
- Giorgi, F., Bi, X.Q., Pal, J. (2004). Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. I: Present day climate (1961-1990). *Clim. Dyn.*, 22, 733-756
- Stehlik, J., Bardossy, A. (2002). Multivariate stochastic downscaling model for generating daily precipitation series based on atmospheric circulation. *J. Hydrol.*, 256, 120-141
- Stern, R.C., Coe, R. (1984). A model fitting analysis of daily rainfall data. *J. R. Stat. Soc. A*, 147, 1-34
- Sumner, G.N., Romero, R., Homar, V., Ramis, C., Alonso, S., Zorita, E. (2003). An estimate of the effects of climate change on the rainfall of Mediterranean Spain by the late twenty first century. *Clim. Dyn.*, 20, 789-805
- Van Ulden, A.P., van Oldenborgh, G.J. (2006). Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for climate change in Central Europe. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 863-881
- Wilby, R.L., Wigley, T.M.L., Conway, D., Jones, P.D., Hewitson, B.C., Main, J., Wilks, D.S. (1998). Statistical downscaling of general circulation model output: a comparison of methods. *Water Resour. Res.*, 34, 2995-3008

