



**Universitat de les  
Illes Balears**

Facultat de Ciències

**Memòria del Treball de Fi de Grau**

**Ajust estadístic de la temperatura mensual de les Illes Balears en funció de les components principals de la circulació atmosfèrica de gran escala. Estimació dels efectes del canvi climàtic.**

Jaume Orell Miquel

**Grau de Física**

Any acadèmic 2017-18

Treball tutelat per Romualdo Romero March  
Departament de Física

S'autoritza la Universitat a incloure aquest treball en el Repositori Institucional per a la seva consulta en accés obert i difusió en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació	Autor		Tutor	
	Sí	No	Sí	No
	X		X	

Paraules clau del treball:

Canvi climàtic, Illes Balears, circulació atmosfèrica, altura geopotencial, anàlisi de components principals, regressió lineal múltiple, *Global climate model*.



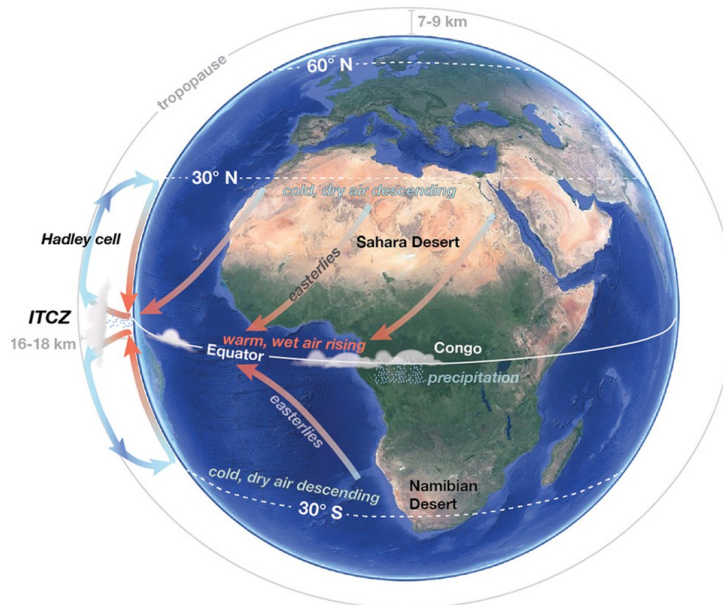
## ÍNDIX

1. Introducció i objectius	1
2. Base de dades	2
3. Metodologia	2
3.1 Anàlisi de components principals	3
3.2 Regressió Lineal Multiple	6
4. Estudi de sensibilitat del MLR	7
4.1 Evolució temporal	7
4.2 Altura geopotencial a 850 hPa (H850)	9
4.3 Altura geopotencial a 550 hPa (H550)	11
4.4 Temperatura a 600 hPa (T600)	12
4.5 Variable física ajustada linealment	13
4.6 Comparació i sensibilitat dels MLRs	16
4.7 Aplicació als models de circulació globals	20
5. Estimació dels efectes de canvi climàtic	22
5.1 Maig-Juny	22
5.2 Conjunt dels bimesos	24
6. Conclusions	28
7. Bibliografia	29

# 1. Introducció i objectius

En l'estudi de la meteorologia i el clima hi ha diverses variables que són d'especial interès però d'aquestes la més senzilla de calcular i mesurar és possiblement la temperatura. A més, és una magnitud física que la gent del carrer està avesada a utilitzar i és més propera a ells. Així els resultats dels que estudien quin serà l'impacte del canvi climàtic, no sols al planeta sinó també a les vides d'aquells que l'habituen, són més fàcils de comprendre per tothom.

És conegut que hi ha una estreta relació entre la temperatura global i les concentracions dels gasos d'efecte hivernacle, com és el  $\text{CO}_2$ . El que ha passat històricament és que l'augment de la temperatura provoca un augment d'aquests gasos a l'atmosfera i aquests a la vegada, com a gasos d'efecte hivernacle que són, contribueixen a l'augment de la temperatura, un sistema que s'alimenta a si mateix. Per tant, el canvi en el clima és un fenomen natural que ha passat i passarà sempre. El problema rau en què era un procés natural, generat pels processos pròpis del planeta, i l'actual canvi climàtic no ho és. Des de la revolució industrial les concentracions de gasos d'efecte hivernacle, sobretot de  $\text{CO}_2$ , a l'atmosfera han augmentat fins a superar tots els registres que es tenien. Per tant, ara les tornes s'han canviat, s'ha produït un augment enorme de  $\text{CO}_2$  però sense què s'hagui experimentat un augment de la temperatura. Per tant, el canvi climàtic actual té una nova contribució: els humans. I aquí hi ha el problema, els humans han posat en funcionament la maquinària del canvi climàtic. Per tant, la qüestió a estudiar és com respondrà la temperatura. Sembla evident que hi haurà un augment però cal estimar de quants graus i l'impacte que pot tenir a la societat.



**Il·lustració 1. Esquema de la circulació atmosfèrica deguda a la cèl·lula de Hadley. [7]**

Un dels efectes que s'ha estudiat i que és el punt de partida d'aquest treball és el que s'explica a Jansà *et. al.* (2016) [1]. En ell s'estableix una forta relació entre la temperatura en superfície i l'altura a la qual la pressió és de 500 hPa. Es veu com en el període d'estudi les dues han anat en augment. Aquest fet guarda relació amb l'oscil·lació de l'abast de la cèl·lula de Hadley. L'aire a l'equador ascendeix degut a que és més càlid i per tant menys dens. Un pic a dalt, per continuïtat, es desplaça cap als pols. Però degut a l'efecte de Coriolis, la seva trajectòria es desvia (cap a la dreta a l'hemisferi nord i a l'esquerra a l'hemisferi sud). Aleshores, allà on comença a moure-se seguint els paral·lels descendeix. Una vegada descendit, també per continuïtat, torna cap a l'equador. La secció d'aquesta circulació dibuixa un cicle tancat, una cel·la, la cèl·lula de Hadley. Degut a les diferències de temperatura que experimenten els hemisferis durant les estacions, la latitud on es troba el límit de la cel·la oscil·la, arribant a majors latituds a l'estiu i menors a l'hivern. Per això, un augment de l'altura geopotencial es

relaciona amb una arribada més avançada del límit de la cèl·lula de Hadley i també de les condicions atmosfèriques estivals (Karnauskas *et. al.* (2014) [6]).

Aleshores, el que es pretén en aquest treball és estudiar i obtenir una relació de com les estructures i moviments atmosfèrics de gran escala que ocorren a la regió mediterrània permeten explicar la temperatura registrada a les Illes Balears. Seguint els passos de Jansà *et. al.* (2016), s'estudiarà el bimes Maig-Juny durant el període de temps comprès entre 1986 i 2005. A més, aquest bimes és representatiu del traspàs de primavera a estiu i és en aquestes estacions on s'han registrat uns majors escalfaments (Homar *et. al.* (2010) [5]). L'objectiu principal és l'obtenció d'un model matemàtic que expliqui les temperatures observades per Maig-Juny i, posteriorment, s'analitzarà la viabilitat de la seva extensió a la resta dels bimesos de l'any i la seva predictibilitat a llarg termini, centrant el cas d'estudi futur al període de finals de segle comprès entre 2081 i 2100.

## 2. Base de dades

Per assolir tal tasca es requereixen dos grups de dades: les temperatures en superfície i els camps d'altura geopotencial a 550 hPa. Per a les primeres s'utilitzaran les temperatures registrades a l'estació meteorològica de l'aeroport de Son Sant Joan durant el període de 20 anys que abraça des del 1986 fins al 2005. Aquestes actuaran com a dades representatives de la temperatura al conjunt de les Illes. Per a les segones es construïran els camps a partir de les dades de què es disposen. En l'estudi de Jansà *et. al.* (2016) s'utilitzaven les de 500 hPa però en aquest cas no es tenen. Per tant, el que es fa és reconstruir un camp proper, el de 550 hPa, a partir del conjunt de mapes d'altura geopotencial a les pressions de 850 hPa i 250 hPa. Per aquests últims es disposa de dues fonts diferents, una és la que aporta el reanàlisi del *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) conjuntament amb el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) i l'altra és el reanàlisi ERA-Interim que proporciona l'*European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF). Per tant, ara que es tenen els dos conjunts de dades només fa falta relacionar-les, el problema és que es té massa informació. Cada mapa es compon per una malla de punts i a cada un es té el valor corresponent a l'altura. I això per cada dia del bimes durant els 20 anys.

Les fonts anteriors serviran per entrenar l'algorisme però aquest s'aplicarà a un altre conjunt de dades. Aquestes altres dades corresponen a un conjunt de 20 models de circulació general o de clima global (*General Circulation Model* o *Global Climate Model*, abreujat com GCM) que són els que segons Romero *et. al.* (2017) expliquen millor els ambients meteorològics precursors dels medicanes, un tipus de cicló mediterrani de característiques quasi tropicals. Es suposa que si aquests models expliquen correctament un fenomen poc freqüent com els medicanes, seran capaços de reproduir satisfactòriament altres atributs meteorològics del dia a dia.

## 3. Metodologia

En un anàlisi d'aquestes característiques el problema rau en la gran quantitat de dades que es tenen i en com destriar-les per quedar-se només amb les que estan més correlacionades amb la magnitud que ens interessa, la temperatura a les Illes en aquest cas. Per això, el que es fa en aquestes situacions és una anàlisi de components principals (abreujat com PCA a partir de les sigles angleses de *Principal Components Analysis*). És un tipus d'anàlisi bastant comú i molt utilitzat, sobretot a meteorologia i climatologia, perquè ajuda a visualitzar patrons, estructures o distribucions que permeten explicar fenòmens o faciliten l'obtenció d'una relació entre les principals causes i els efectes. Uns exemples d'aquest tipus d'estudis són Romero (1999) [8], Romero (1999) [9] i Romero (1999) [10] on s'estudia la precipitació i les pluges torrencials a la Mediterrània occidental a partir de diferents components principals com els camps d'altura potencials a 500 i 925 hPa (cas semblant al d'aquest

estudi) o els dies de pluja significativa. Per tant, l'anàlisi estadístic que es desenvoluparà és una metodologia habitual en investigacions climàtiques, com els exemples citats realitzats pel grup de Meteorologia de la UIB, i aquesta es pot encarar amb diferents i diversos objectius, no només en els que es centra el treball.

### 3.1 Anàlisi de components principals

L'anàlisi de components principals és una tècnica estadística que permet reduir el nombre de dimensions del problema amb l'objectiu de millorar el tractament de les seves dades (Jolliffe (2002) [4]). Pel cas d'estudi es té un mapa de geopotencial per cada dia del bimes i això per cada any dels 20 que s'estudien, en total es tenen  $n$  mapes. Per exemple, al considerar el bimes Maig-Juny  $n$  val 1220. Cada mapa és un engrallat en el qual cada cruïlla té un valor, el nombre de cruïlles del mapa és el nombre de mesures que es tenen registrades d'aquell dia concret i en general es tenen  $p$  mesures, en aquest cas  $p$  és 4600. Si es consideren els mapes com a conjunts de valors ordenats, com si fosin vectors de  $p$  components, cada un dels  $n$  mapes representa un punt en aquest espai  $p$  dimensional. Llavors, cada un dels  $p$  eixos d'aquest espai correspon a una de les cruïlles i el valor que es registren a l'eix corresponen als de la cruïlla per a cada un dels mapes. Al representar tots els mapes en aquest  $p$ -espai es forma un núvol de punts on és possible identificar direccions principals. Aleshores, s'associen uns nous eixos perpendiculars a aquestes direccions privilegiades amb l'objectiu de què amb uns pocs eixos, i no 4600, s'aconsegueixi explicar gran part de la variabilitat existent. La forma abreujada de designar aquests eixos, aquestes components principals és PC, a partir de les sigles angleses de *principal components*.

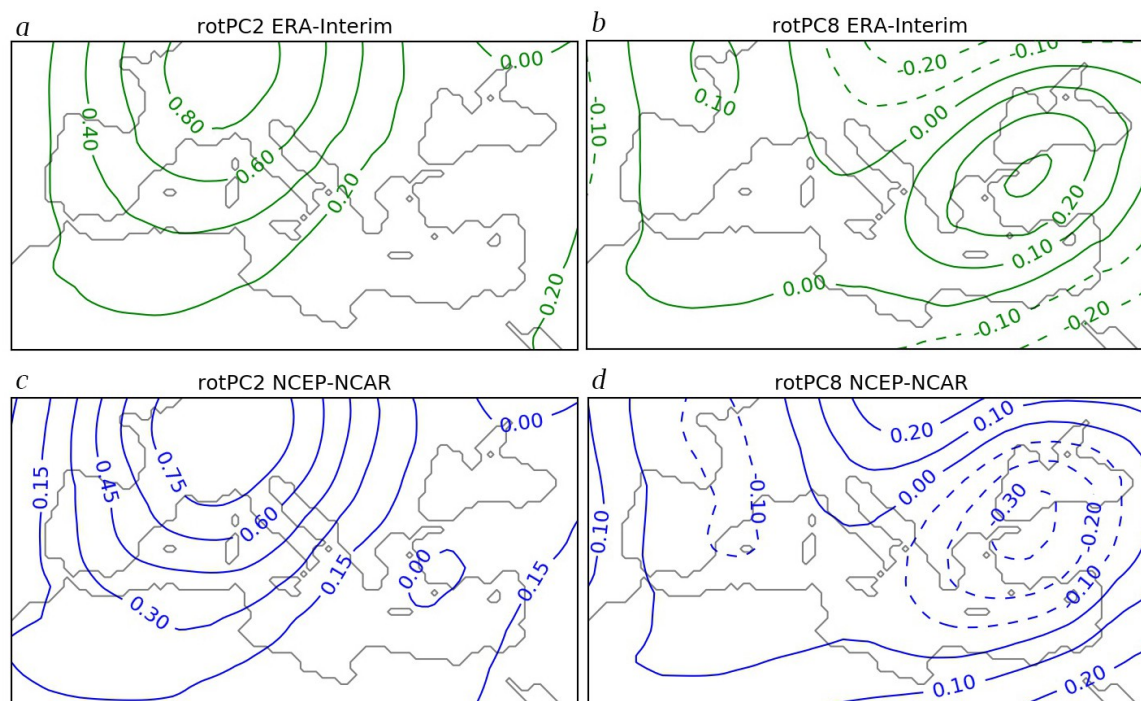
Així, com també es fa a Jansà *et. al.* (2016), el nombre de PCs que s'utilitzaran serà només 10, a part perquè només amb aquests ja s'aconsegueix explicar un 97% de la variabilitat. Així es redueix de 4600 eixos, que expliquen el 100% de la variabilitat, a uns modestos 10. Cada mapa ocupava el seu lloc a l'espai  $p$ -dimensional depenent del valor que tenia per a cada una de les  $p$  components i eren aquestes components les que el definien. Ara, al només tenir 10 dimensions, cada mapa vendrà donat per només 10 valors, aquests valors s'anomenen *scores* i són els valors de la projecció del mapa sobre els nous eixos, els 10 PCs. Cada un dels mapes de 550 hPa es pot reconstruir a partir de la superposició dels 10 PCs multiplicats pels corresponents *scores*. Al fer-ho no es recupera exactament el mapa original ja que s'ha perdut un 3% d'informació de la variabilitat, si es fes amb els 4600 eixos sí. D'aquesta manera, cada dia només ve representat per 10 valors i el bimes sencer es pot analitzar a partir de la mitjana d'aquests 10 *scores* de cada un dels dies. El nombre de dades que finalment s'utilitzaran s'ha reduït molt i ara només es tenen 10 valors que caracteritzen cada bimes dels 20 anys. S'ha aconseguit que amb només 200 valors s'expliqui el 97% de variabilitat del bimes Maig-Juny durant 20 anys.

Una vegada definits aquests eixos, aquestes components principals, també es pot aplicar una rotació d'eixos, definint uns PC rotats (de forma abreujada com rotPCs). La rotació dels 10 eixos ens deixa dins un espai també 10 dimensional però la seva funció és ajudar a l'interpretació dels eixos. En aquest cas s'ha aplicat una rotació de les més típiques en aquest tipus d'anàlisi de components principals que s'anomena *varimax*. La matriu de rotació *varimax* és la que proporciona la màxima variances dels autovalors dels nous eixos rotats. Una vegada calculada s'aplica als 10 PCs retinguts i s'obtenen els nous PCs rotats. En aquest cas, els nous eixos són ortogonals entre si, per tant, els nous *scores* es tornen a calcular a partir de la projecció dels mapes sobre els rotPCs.

El conjunt dels rotPCs, a part de ser un element matemàtic, són eixos d'un subespai vectorial de 10 dimensions dins un espai més gran de 4600 dimensions, descriuen patrons i estructures de gran escala dels camps de geopotencial de 550 hPa que serviran per explicar gran part de la variabilitat de les dades originals dels reanàlisis i dels GCMs. Per tant, un valor major d'un PC vol dir que aquella circulació contribueix més en la tendència del camp de geopotencial.

Una mostra representativa de les estructures que descriuen els PCs rotats són les que es mostren a la Figura 1. Com es veu, els dos reanàlisis utilitzats van en una mateixa direcció i són coincidents en identificar unes mateixes estructures, on les petites diferències són degudes a les pròpies diferències entre reanàlisis. Les estructures poden ser coincidents, com a les Figures 1.a i 1.c, però no tenen perquè coincidir en els valors que prenen, com es veu a les Figures 1.b i 1.d on la circulació és la mateixa però de signe oposat.

La forma de nombrar els PCs és numerant-los de major a menor en funció de la variabilitat que expliquen, definint com PC1 el que n'explica més, com es mostra a la Taula 1. Però al aplicar la rotació per obtenir els rotPC les contribucions de cada PC a la variabilitat total es reorganitzen i el seu percentatge de variabilitat explicada canvia. Però la variabilitat acumulada pel conjunt dels PCs i dels rotPCs és la mateixa, com es veu a la Taula 2.



**Figura 1. Estructures dels PCs rotats 2 i 8 dels dos models utilitzats.**

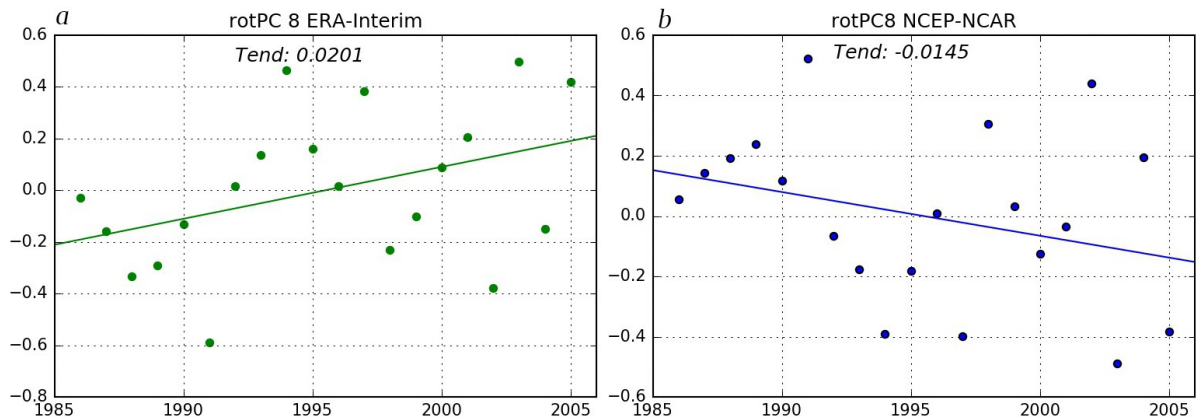
	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8	PC 9	PC 10
ERA-Interim	59.4% (59.4%)	11.6% (71.0%)	8.2% (79.3%)	6.5% (85.7%)	4.0% (89.7)	2.5% (92.2%)	2.0% (94.3%)	1.5% (95.7%)	0.9% (96.7%)	0.7% (97.3%)
NCEP-NCAR	57.1% (57.1%)	12.1% (69.1%)	8.4% (77.6%)	6.5% (84.1%)	4.3% (91.1%)	2.8% (91.1%)	2.2% (93.4%)	1.6% (95.0%)	1.1% (96.0%)	0.8% (96.8%)

**Taula 1. Variabilitat explicada i acumulada total, entre parèntesis, pels 10 primers PCs dels reanàlisis.**

	rotPC 1	rotPC 2	rotPC 3	rotPC 4	rotPC 5	rotPC 6	rotPC 7	rotPC 8	rotPC 9	rotPC 10
ERA-Interim	22.8% (22.8%)	12.8% (35.6%)	12.8% (48.4%)	15.9% (64.3%)	5.0% (69.3%)	7.0% (76.3%)	17.5% (93.7%)	1.3% (95.0%)	1.2% (96.2%)	1.1% (97.3)
NCEP-NCAR	22.0% (22.0%)	12.6% (34.6%)	11.9% (46.5%)	15.4% (61.9%)	5.9% (67.8%)	7.1% (74.9%)	17.9% (92.8%)	1.5% (94.3%)	1.2% (95.5%)	1.3% (96.8%)

**Taula 2. Variabilitat explicada i acumulada, entre parèntesis, pels 10 primers PCs rotats dels reanàlisis.**

Cada un dels mapes de 550 hPa es pot representar com la superposició de tots els mapes dels PCs cada un multiplicat per un coeficient. Aquest coeficient o *score* (versió anglesa per a la seva referència) és el valor que té el mapa en els nous eixos que s'han definit, els PCs rotats. El valor del *score*, que és el que té un mapa en el nou sistema d'eixos format pels 10 rotPCs, és un indicatiu de lo molt o poc que contribueix el rotPC determinat en la reconstrucció del mapa. Si s'analitza el valor que pren l'*score* per un determinat rotPC al llarg dels anys d'estudi es pot saber si aquella estructura es veu potenciada o afeblida amb el pas dels anys, es pot conèixer obtenint-ne la tendència. A la Figura 2 es veu la tendència dels *scores* del PC 8 pels dos reanàlisis. Una és negativa i l'altra positiva però, recordant les Figures 1.b i 1.d que prenen valors amb signe oposat, fa que al final es tenguí la mateixa contribució.



**Figura 2. Tendència de l'*score* del rotPC 8 pels dos reanàlisis utilitzats.**

### 3.2 Regressió Lineal Multiple

Com s'ha explicat, la gran quantitat de dades que es tenia inicialment s'ha comprimit, a partir dels *scores* dels rotPC, en només 10 valors anuals que provenen de la mitjana dels *scores* diaris del bimes. Així, amb només 10 paràmetres per any, és més fàcil trobar una relació entre aquests i la temperatura anual del bimes. El model matemàtic que es proposa és una regressió lineal múltiple (MLR de forma abreujada a partir de les sigles angleses *Multiple Linear Regression*) del tipus

$$MLR = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot PC_i + b_0$$

on  $b_0$  és el terme independent, els  $b_i$  són els coeficients lineals corresponents al PC rotat  $i$  i els  $PC_i$  són els *scores* corresponents. Aquests últims són els que serviran per ajustar el MLR amb la temperatura i determinar els  $b_i$ . Una vegada calculats els valors dels coeficients lineals, mostrats a la Taula 3, cal recalculer les temperatures a partir del model MLR per veure si s'ajusten i s'assemblen a les que es tenen de forma experimental. Aquests valors recalculats es poden ajustar linealment per extreure la tendència d'escalfament o de refredament durant el període 1986-2005 i tenir un paràmetre més per decidir si l'ajust MLR és bo. Com es pot veure en la Figura 3 els dos MLR s'ajusten bastant bé a la realitat i són capaços de modelar la variabilitat present al llarg dels anys. Pels dos reanàlisis es donen resultats molt semblants i les petites diferències entre ells es poden suposar degudes a les discrepàncies que s'observen en els mapes dels PCs rotats.

El model MLR que utilitza les dades del reanàlisi ERA-Interim s'ajusta amb una correlació de 0.937 i un RMSE (sigles en anglès de l'arrel de l'error quadràtic mig) de 0.342 i l'equació de la recta que s'obté a partir les temperatures calculades per aquest mètode és

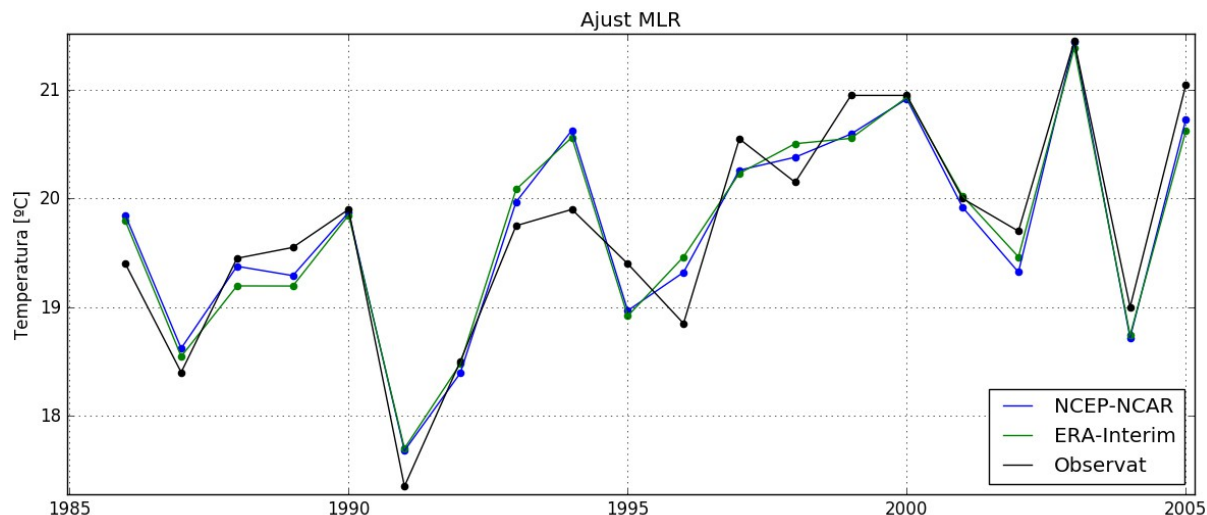


$$T = 0.0773 \text{ anys} - 134.45$$

d'on s'interpreta que hi ha hagut un augment de la temperatura de 0.773 °C/dècada. Si es fa pel model MLR de NCEP-NCAR, la correlació és de 0.946 i el RMSE de 0.318 i l'equació de recta que resulta és

$$T = 0.0724 \text{ anys} - 124.73$$

de la què s'extreu un augment de la temperatura de 0.724 °C/dècada. Els dos ajusts MLR coincideixen en descriure un augment de la temperatura superior als 0.7 °C/dècada.



**Figura 3.** Valors de les temperatures calculades a partir dels models MLR de NCEP-NCAR i ERA-Interim superposades als valors observats.

	<i>ERA-Interim</i>			<i>NCEP-NCAR</i>		
	$b_i$	Tendència	Contribució	$b_i$	Tendència	Contribució
Independent	19.713			19.713		
PC 1	-0.690	-0.089	0.061	-0.906	-0.078	0.070
PC 2	<b>2.341</b>	0.142	<b>0.333</b>	<b>2.488</b>	0.130	<b>0.323</b>
PC 3	0.335	0.239	0.080	0.191	0.174	0.033
PC 4	<b>1.448</b>	0.027	0.039	<b>1.403</b>	0.016	0.023
PC 5	-0.657	0.071	-0.046	-0.693	0.059	-0.041
PC 6	0.524	0.015	0.008	0.464	0.021	0.010
PC 7	-0.694	-0.148	<b>0.103</b>	-0.948	-0.153	<b>0.145</b>
PC 8	0.585	0.201	<b>0.117</b>	-0.745	-0.145	<b>0.108</b>
PC 9	-0.250	-0.152	0.038	0.118	0.088	0.010
PC 10	0.708	0.056	0.040	0.526	0.079	0.042
<i>MLR</i>			<b>0.773</b>			<b>0.724</b>

**Taula 3.** Valors dels coeficients lineals  $b_i$  dels PCs rotats [°C], la tendència explicada [dècada<sup>-1</sup>] i la contribució a la tendència global [°C/dècada]. Ressaltats els majors valors de la columna.

Per a cada reanàlisi és possible conèixer quin paper juga cada PC en la tendència final, només cal multiplicar el coeficient lineal pel valor de la tendència. A la Taula 3 hi apareixen tots dos valors i el

resultat del seu producte. Es pot veure com un major coeficient no significa una major contribució final.

Però les tendències extreures són degudes a temperatures obtingudes a partir dels algorismes, cal saber la tendència que hi ha hagut realment entre el 1986 i el 2005. Per això s'ajusten els valors observats de la temperatura per extreure la tendència real, d'aquesta forma s'obté l'equació de recta següent

$$T = 0.0959 \text{ anys} - 171.66$$

A partir de l'equació se'n deriva que hi ha hagut una tendència d'escalfament de 0.959 °C/dècada si es considera el període 1986-2005, un valor significativament major als que diuen els dos models MLR.

El model MLR utilitzant 10 PCs ha reproduït bastant bé la variabilitat de la temperatura però no ha donat un bon valor per a l'augment de la temperatura, tots dos queden per sota de la tendència real observada. Aleshores s'hauran de proposar millores a l'algorisme de partida amb 10 PCs per tal d'aconseguir explicar la tendència observada.

## 4. Estudi de sensibilització del MLR

### 4.1 Evolució temporal

Per tant, tenint com a base el model MLR de 10 PCs cal afegir quelcom que permeti augmentar la tendència total. Una possible solució seria afegir un terme extra al MLR que sigui dependent del temps, dels anys. Amb aquest terme es pretén capturar l'escalfament de fons i amb els 10 PCs afegir la variabilitat a la tendència mitja. Així el model MLR que caldrà ajustar ara serà del tipus

$$MLR = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot PC_i + b_0 + c \cdot t$$

És una estructura semblant a la del MLR de 10 PCs però on s'ha afegit el terme lineal amb el temps  $c \cdot t$  on  $c$  és el coeficient lineal temporal, que també caldrà determinar. Els altres coeficients lineals i l'independent també s'hauran de redeterminar ja que no ens serveixen els obtinguts anteriorment perquè eren referits a un model amb només 10 PCs i ara hi ha un terme nou. Per cada proposta de MLR que es faci cal calcular de nou tots els coeficients.

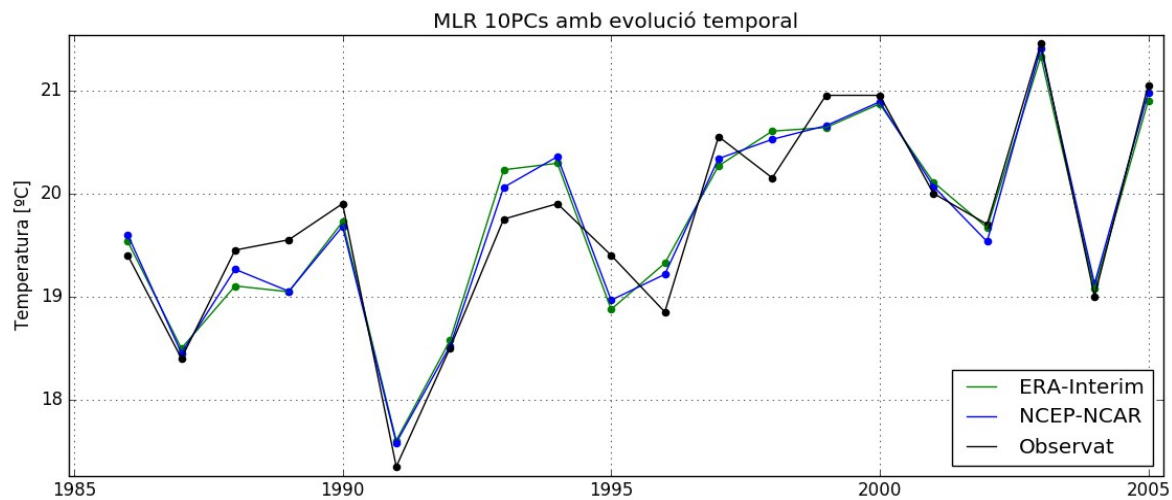
El procediment per a la determinació dels valors dels nous coeficients és totalment anàloga al que s'ha fet anteriorment. Una vegada obtinguts es calculen les temperatures modelades i s'ajusten linealment per extreure la tendència del reanàlisi a partir del pendent de la recta d'ajust. Els resultats de les temperatures modelades són els que es mostren a la Figura 4.

Com es veu, ambdós reanàlisis tornen donar temperatures molt semblants i aquestes a la vegada són semblants a les observades, es reproduïx molt bé la variabilitat. Però això ja ho teníem en l'anterior model, el que ens interessa és saber si s'ha aconseguit augmentar la tendència. Per l'actual ajust MLR amb ERA-Interim la correlació és de 0.951 i el RMSE de 0.303 i l'equació de la recta que ajusta les temperatures modelitzades és

$$T = 0.0959 \text{ anys} - 171.66$$

Pel cas de l'algorisme que utilitza les dades de NCEP-NCAR la correlació és 0.963 i RMSE 0.263 i s'obté l'ajust

$$T = 0.0959 \text{ anys} - 171.66$$



**Figura 4. Valors de les temperatures calculades utilitzant el model MLR de 10PCs i un terme lineal amb el temps pels NCEP-NCAR i ERA-Interim superposades als valors observats.**

Les rectes obtingudes pels dos reanàlisis són exactament les mateixes i a la vegada són iguals a la recta que ajusta els valors observats, fins a l'últim decimal que dona el programa. Aleshores, el que s'extreu d'aquest nou model MLR és que reproduïx a la perfecció la tendència observada, s'aconsegueix un augment de la temperatura de 0.959 °C/dècada, i a més també reproduïx fantàsticament la variació anual. L'explicació que es pot donar a aquests resultats, que a simple vista resulten com a mínim sorprenents, és que a sobre de la tendència de l'augment de la temperatura si afegeix la variabilitat dels PCs. És a dir, el terme temporal captura la tendència observada i els PCs la variabilitat anual que donen unes temperatures modelades finals allunyades de la recta de tendència i properes a les observades.

Però aquest model presenta un inconvenient de significat. Es pot construir un algorisme que obtingui els resultats experimentals però ha de tenir certa lògica i motivació cada terme que el forma. I el terme dependent del temps no en té massa. L'incorporació del terme lineal amb el temps no és degut a cap fonament físic que el permeti explicar. L'intenció és afegir un terme que capturi l'escalfament de fons que hi ha, els gairebé 0.3 °C/dècada de diferència entre l'observat i el que diuen els models MLR de 10 PCs. Però que passaria si, per exemple, en el futur la tendència de fons fos un refredament? Els coeficients  $c$  del dos model MLR que s'han obtingut són 0.0412 °C/anual i 0.0408 °C/anual pels reanàlisis ERA-Interim i NCEP-NCAR, respectivament. Els coeficients lineals són positius, aleshores aquests termes sempre contribuiran amb un augment de la temperatura amb el pas dels anys. Si en el futur hi hagués un refredament aquest model no el podria reproduir bé perquè estaria forçat a explicar un escalfament. A part, la contribució a l'augment d'aquest terme serà sempre lineal i en augment. Així com els valors dels *scores* dels PCs rotats variaven i podien ser tant positius com negatius, els anys passen d'un en un, el terme a introduir a la  $t$  del model sempre serà l'any anterior més un.

Per tot això, encara que aquest model MLR amb un terme lineal amb el temps hagi donat uns resultats tan bons no és un bon algorisme. Les matemàtiques són bones però el significat físic d'aquestes no tant, per tant, cal seguir cercant un altre terme per afegir-lo al MLR base de 10PCs.

## 4.2 Altura geopotencial a 850 hPa (H850)

La variable que s'afegeixi a l'algorisme base de 10 PCs caldrà que no sigui uniformement creixent com passa amb els anys sinó que pugui prendre valors més grans o més petits en funció de si hi ha una tendència de fons d'escalfament o de refredament. El terme que s'afegeixi al conjunt dels 10 PCs també caldrà que tengui una motivació física al darrere. Per trobar-lo partirem dels fonaments físics de l'atmosfera. L'atmosfera no només està formada per gasos, també hi ha altres substàncies i una de vital importància és l'aigua. L'aigua es pot trobar a l'atmosfera en forma de vapor, líquid o sòlid. Però el seu estudi i com afecta en la termodinàmica atmosfèrica no és senzill i dificultaria els càlculs, per això en una no molt allunyada aproximació es pot tractar l'atmosfera sense aigua, suposar una atmosfera seca. Aleshores, es pot considera que l'aire segueix l'equació d'estat de gas ideal.

$$P = \rho R T \quad (1)$$

On  $P$  és la pressió,  $\rho$  és la densitat de l'aire,  $T$  la temperatura i  $R$  la constant dels gasos ideals  $287.04 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$ . A part, l'aire és un fluid, un medi continu, i en molt bona aproximació es pot considerar que en la vertical del fluid es compleix l'aproximació hidrostàtica.

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (2)$$

On  $g$  és el valor de la gravetat. Si a (2) substituïm la densitat per l'expressió que resulta d'aïllar-la a (1) tendrem

$$dz = \frac{-RT}{g} \frac{dP}{P} = \frac{-RT}{g} d\ln(P) \quad (3)$$

Aleshores es pot integrar (3) des d'un punt inicial a altura  $z_1$  i pressió  $P_1$  fins a un punt final d'altura  $z_2$  i pressió  $P_2$ .  $R$  i  $g$  són constants, però la temperatura no, canvia en l'altura. Per evitar fer l'integral, considerant la variació de la temperatura amb la pressió, es pot definir  $\hat{T}$  com la temperatura mitjana de l'estrat.

$$\int_{z_1}^{z_2} dz = \frac{-R}{g} \int_{P_1}^{P_2} T d\ln(P) = \frac{-R}{g} \frac{\int_{P_1}^{P_2} T d\ln(P)}{\int_{P_1}^{P_2} d\ln(P)} \int_{P_1}^{P_2} d\ln(P) = \frac{-R\hat{T}}{g} \int_{P_1}^{P_2} d\ln(P) \quad (4)$$

Els límits d'integració en l'altura compleixen que  $z_2 > z_1$  però per la pressió tenim que  $P_2 < P_1$ . Cal recordar que l'altura augmenta en la vertical però la pressió no, a major altura hi ha menys quantitat d'aire a sobre. Això permet girar els límits d'integració amb el signe de davant i el logaritme que resultarà al fer l'integral tindrà un argument major a 1. Així es veu més clar que tots els termes resultants són positius. Finalment s'obté l'equació hipsomètrica

$$z_2 - z_1 = \frac{R}{g} \hat{T} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (5)$$

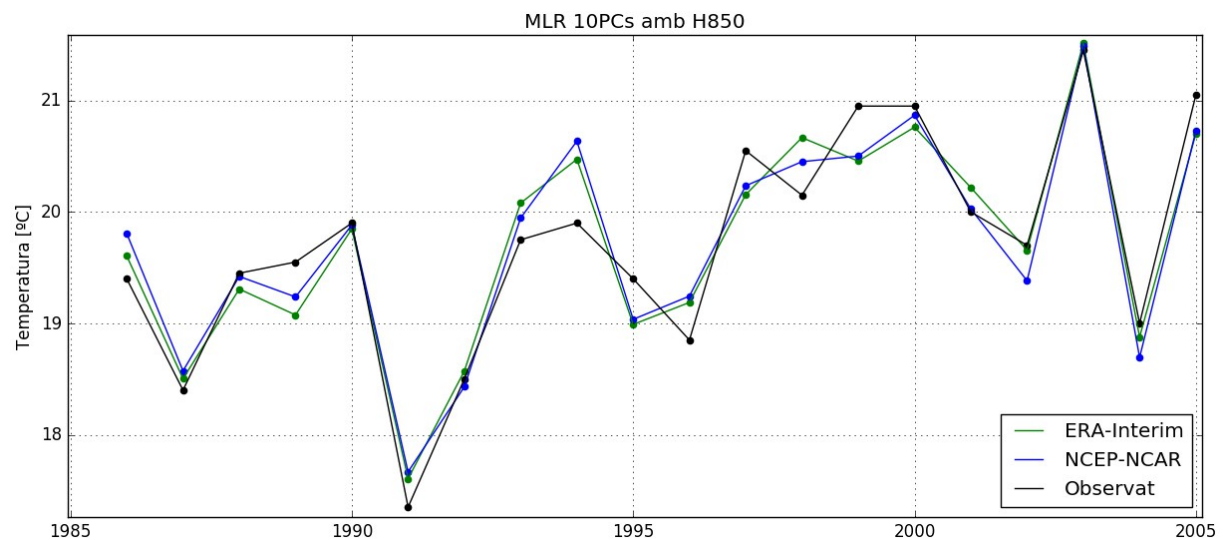
El que ens diu aquesta equació és que l'espessor d'un estrat és directament proporcional a la temperatura mitja de l'estrat. A major temperatura, l'altura entre dos nivells de pressió de referència és més gran que a una temperatura menor. És una equació que relaciona espessor i temperatura de la

columna d'aire d'un punt, ja que al mouer-se geogràficament tant la pressió com la temperatura poden variar i en conseqüència l'espessor.

En el cas d'estudi del treball el que es vol determinar és la temperatura en superfície. El que es podria fer, utilitzant l'equació hipsomètrica, és relacionar l'espessor de la capa superficial de l'atmosfera amb la corresponent temperatura mitja i si s'utilitza una capa superior prou pròxima al terra aquesta temperatura no seria massa diferent a la temperatura en superfície. Per tant, es pot proposar com a nou terme del model MLR la gruixa de la capa més superficial de l'atmosfera sobre la regió de les Illes Balears. Aquesta, excepte constants que quedarien englobades dins del propi coeficient lineal del MLR, representa una bona estimació de la temperatura en superfície. Per fer-ho rigurosament caldria tenir els valors en superfície, que es sol fixar a un nivell d'uns 1000 hPa, i restar-los als d'un nivell no massa elevat. El problema és que les dades de que es disposen són limitades i només es tenen les altures geopotencials als nivells de 850 hPa i 250 hPa. El nivell de 250 hPa és massa elevat i no serveix per aquest cas. El que sí podria servir és el nivell de 850 hPa com a nivell superior. Però es segueix amb el problema de no tenir dades del nivell de superfície. Per resoldre-ho es pot suposar que el canvi de l'espessor de l'estrat es deu sobretot als canvis del nivell superior, el nivell arran de superfície no canvia massa. Així, la variació del gruix de la capa vendrà caracteritzat únicament pel valor del nivell a 850 hPa. Però el mapa de 850 hPa ocupa tota la regió que es veu a la Figura 1, on les Illes Balears queden representades per un petit quadrat que ocupa només 12 punts de la malla. Aleshores, per l'obtenció del valor a utilitzar es fa la mitjana dels valors que estan, més o menys, sobre les Illes. Aquests valors són els que serviran per ajustar el model MLR, que ara serà del tipus

$$MLR = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot PC_i + b_0 + c \cdot H 850$$

on H850 són els valors ja mencionats del nivell de 850 hPa i  $c$  és el corresponent coeficient de l'altura.



**Figura 5. Temperatures calculades a partir del model MLR de 10PCs i dependència lineal en l'altura de 850 hPa per NCEP-NCAR i ERA-Interim superposades als valors observats.**

Amb les dades de cada un dels reanàlisis ERA-Interim i NCEP-NCAR es determinen els valors dels coeficients i es calculen les temperatures modelitzades a partir dels corresponents MLRs. El resultat, mostrat a la Figura 5, segueix el mateix patró que els ja obtinguts. Els dos models s'assemblen bastant i també són capaços de reproduir la variabilitat anual de la temperatura de forma satisfactòria. Però cal veure si són capaços d'explicar la tendència d'augment de temperatura. Com s'ha fet les altres vegades s'ajusten els valors de les temperatures a una recta. D'aquesta manera, el que s'obté pel cas de ERA-

Interim és un MLR amb una correlació de 0.947 i un RMSE de 0.315 i l'ajust lineal de la temperatura calculada és

$$T = 0.0870 \text{ anys} - 153.86$$

Pel cas de l'algorisme utilitzant les dades de NCEP-NCAR la correlació és de 0.946 i el RMSE de 0.314 i la recta que ajusta les temperatures és

$$T = 0.0743 \text{ anys} - 128.64$$

Encara que les temperatures dels dos MLR siguin molt semblants, al final, al calcular les tendències hi ha una diferència apreciable. Pel MLR amb ERA-Interim es té un escalfament de 0.87 °C/dècada i amb NCEP-NCAR és de 0.743 °C/dècada. La tendència de ERA-Interim es queda uns 0.1 °C/dècada per sota de la tendència observada i en canvi, per NCEP-NCAR no hi ha massa millora respecte el model base. Recordem que amb el model de 10 PCs pel cas NCEP-NCAR s'havia obtingut una tendència de 0.724 °C/dècada, ara s'ha aconseguit augmentar unes centèsimes de grau per dècada. Un augment molt pobre comparat amb el més d'una dècima de grau per dècada que s'ha millorat amb el reanàlisi ERA-Interim.

Amb aquest algorisme que introdueix l'altura del nivell de pressió de 850 hPa s'ha obtingut un bon resultat amb les dades de ERA-Interim però no s'ha millorat massa amb les de NCEP-NCAR. Tot i això, encara no s'ha aconseguit explicar l'augment de 0.959 °C/dècada.

### 4. 3 Altura geopotencial a 550 hPa (H550)

Potser un dels motius pels quals no s'ha obtingut un resultat del tot satisfactori al introduir el paràmetre H850 ha estat suposar que l'efecte del nivell de superfície era menyspreable, que la variació de la gruixa de la capa no era principalment deguda al nivell de 850 hPa o que era massa alt com per considerar-ho així. Per utilitzar correctament l'equació hipsomètrica, sense cap aproximació adicional, calen dos nivells de referència, els dos únics dels que es disposa són els de 850 hPa i de 250 hPa. La gruixa entre aquests dos nivells seria la temperatura mitjana a l'estrat, que vendria a ser la temperatura a uns 550 hPa. És un nivell mitjà però que pot ser un bon indicatiu del que ocorre als nivells baixos de l'atmosfera. Per tant, el nou model MLR que s'analitzarà serà un que incorpori aquesta nova variable, la gruixa de l'estrat entre 850 hPa i 250 hPa. L'algorisme serà del tipus

$$MLR = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot PC_i + b_0 + c \cdot H550$$

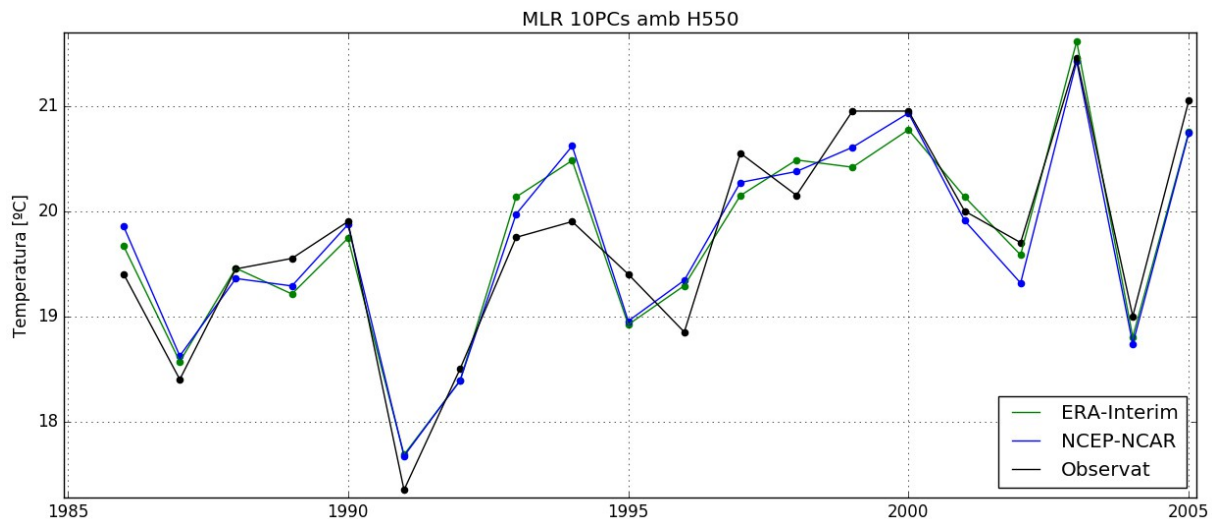
on H550 són els valors de l'espessor de l'estrat que s'utilitza, que està centrat a 550 hPa i  $c$  és el corresponent coeficient lineal.

Com s'ha fet pels MLR anteriors, es recalculen els coeficients de l'algorisme i una vegada coneguts es calculen les temperatures modelitzades per ajustar-les linealment i extreure-ne la tendència. Si s'utilitzen les dades de ERA-Interim, el MLR té una correlació de 0.945 i un RMSE de 0.320 i la recta que s'obté és

$$T = 0.0821 \text{ anys} - 144.20$$

En canvi, si s'agafen les dades de NCEP-NCAR l'ajust té una correlació de 0.946 i un RMSE de 0.318 i la recta que s'extreu de les temperatures és

$$T = 0.0728 \text{ anys} - 125.48$$



**Figura 6. Temperatures calculades a partir del model MLR de 10PCs i dependència de l'espessor entre 850 hPa i 250 hPa per NCEP-NCAR i ERA-Interim superposades als valors observats.**

Es torna a repetir que les temperatures modelades són semblants entre els dos reanàlisis i ambdós registren bastant bé la variabilitat, com es mostra a la Figura 6, però no es tradueix a les tendències. Les tendències que s'han obtingut de 0.821 °C/dècada per ERA-Interim i de 0.728 °C/dècada per NCEP-NCAR són molt semblants a les que ja s'havia obtingut amb l'algorisme que incloïa el nivell de 850 hPa. El model matemàtic amb ERA-Interim millora respecte del base amb 10 PCs però segueix no arribant a la tendència observada i pel cas NCEP-NCAR els resultats només són uns 0.003 °C/dècada millors que els base.

A la vista de les tendències obtingudes, que en aquest cas són lleugerament menors a les anteriors, aquest algorisme no serveix per explicar els valors observats. El motiu dels valors més petits i de no reproduir la tendència observada es pot deure a que al considerar els nivells 850 hPa i 250 hPa s'utilitzen dades de l'atmosfera mitja, massa allunyats de la superfície. El que ocorre a una capa de l'atmosfera afecta a les altres però potser l'efecte de la temperatura superficial sobre la columna d'aire no és prou significatiu com perquè la temperatura a nivells mitjans es vegi fortament modificada. L'algorisme té significat físic però no és millor que el que ja es tenia utilitzant els valors d'altura geopotencial a 850 hPa.

#### 4.4 Temperatura a 600 hPa (T600)

Una de les altres dades de que es disposa és de la temperatura al nivell de 600 hPa. En el cas anterior, al considerar els nivells de 850 hPa i 250 hPa el valor resultant era una bona aproximació, excepte per constants, de la temperatura mitjana de 550 hPa. Com s'ha vist, potser degut a que el nivell 550 hPa és massa elevat, els resultats no han millorat el cas en que s'utilitzava exclusivament 850 hPa. Per tant, si s'utilitzen valors directament de la temperatura d'un nivell un poc més baix, més pròxim al terra potser es milloren els resultats. Per tant, el MLR a implementar tindrà el terme extra T600 que serà el valor de la temperatura a 600 hPa sobre les Illes Balears i  $c$  serà el corresponent coeficient.

$$MLR = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot PC_i + b_0 + c \cdot T600$$

El procediment és anàleg a com s'ha fet amb els anteriors models MLR i el resultat que s'obté amb aquest MLR és el mostrat a la Figura 7. Com en els anteriors casos es reproduceix bé la variabilitat però

el que interessa és que també ho faci de la tendència. Si s'ajusten les temperatures modèliques obtingudes amb ERA-Interim es té la recta

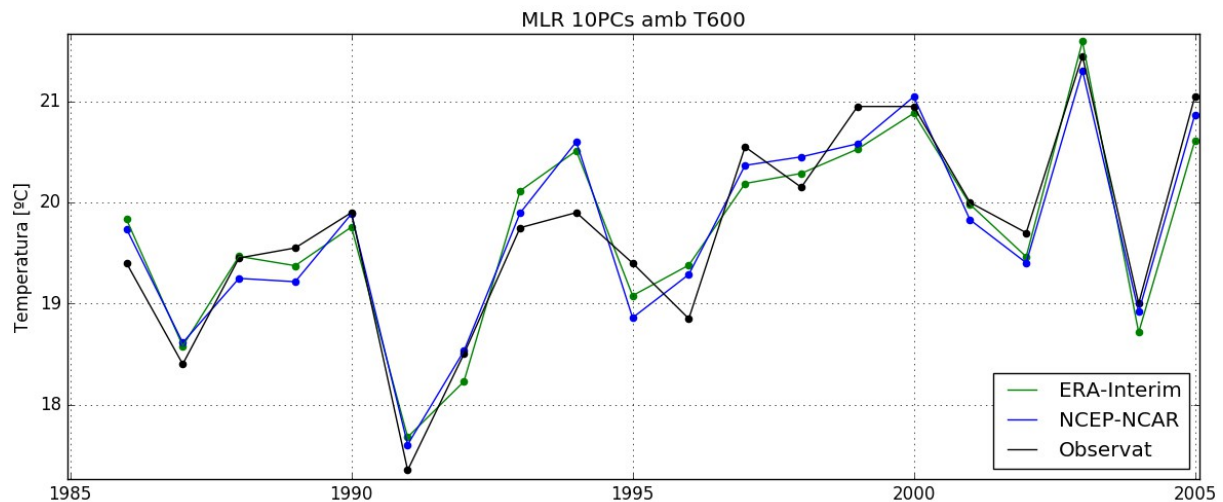
$$T = 0.0735 \text{ anys} - 126.96$$

amb una correlació de 0.946 i un RMSE de 0.318 del MLR. Si s'utilitzen les dades de NCEP-NCAR la correlació és del MLR és 0.951 i el RMSE de 0.302 i la recta que resulta és

$$T = 0.0806 \text{ anys} - 141.12$$

Les tendències que s'obtenen en aquest cas són de 0.735 °C/dècada per ERA-Interim i de 0.806 °C/dècada per NCEP-NCAR.

A diferència del que passava en els anteriors models MLR que incloïen un terme d'altura geopotencial, ara el que té una tendència major i dona un resultat més satisfactori és el que utilitza les dades de NCEP-NCAR. La tendència és la més gran de tots els algorismes que utilitzen NCEP-NCAR, tot i això, només és devers 0.05 °C/dècada major a la que s'obtenia pel MLR base i encara queda per sota de la tendència observada. El model matemàtic amb ERA-Interim dona una tendència menor a la que s'obtenia pel cas amb només els 10 PCs, s'ha empitjorat el resultat final.



**Figura 7. Temperatures calculades a partir del model MLR de 10PCs i dependència de la temperatura a 600 hPa per NCEP-NCAR i ERA-Interim superposades als valors observats.**

A l'introduir la temperatura a 600 hPa, una variable amb sentit físic, s'han obtingut resultats satisfactoris pel cas NCEP-NCAR però pel cas ERA-Interim s'han empitjorat respecte l'algorisme de partida, el que donava fins al moment una menor tendència.

#### 4.5 Variable física ajustada linealment

Els diferents algorismes MLR que incorporen un terme extra, a part dels 10 PCs, per capturar la tendència d'escalfament de fons que no s'explica només amb els 10 PCs no han estat capaços d'arribar a la tendència observada de 0.959 °C/dècada. El cas que s'ha acostat més ha estat el MLR amb H850 amb les dades de ERA-Interim, però no és suficient. L'únic algorisme que sí ha reproduït tant la tendència com la variabilitat ha estat el que utilitza com a paràmetre extra els propis anys. Ja s'ha explicat perquè no era un bon algorisme físic tot i els bons resultats, però el motiu del seu èxit pot obrir la porta a un model físic correcte. El que sí podria ser un bon paràmetre seria una variable física ajustada linealment amb els anys. Considerar els valors d'una variable al llarg del període, ajustar-los amb una recta i utilitzar els valors que resulten de l'ajust per alimentar el model MLR. Fins ara



s'utilitzaven directament els valors dels camps, aquests són deguts a la tendència i a la pròpia variabilitat. Per tant, si prèviament s'ajusten linealment i després s'utilitzen els valors de l'ajust, la part de la variabilitat desapareix i només queda la part que interessa, la tendència de fons. Pot semblar que aquest mètode és com el d'utilitzar els anys ja que els valors d'alimentació del MLR seran linealment creixents (o decreixents) com ho eren els anys. Però la diferència rau en què aquests valors surten després d'un tractament de dades en què els valors originals poden augmentar o disminuir depenent de la temperatura, cosa que amb els anys no ocorre. El tractament de dades previ consistirà en obtenir la recta que ajusti els valors del model climàtic, on la variable independent seran els anys i recalculer els valors de la variable física a partir de la recta. Aquests seran els que s'utilitzin per entrenar el MLR. De forma general, el MLR serà de la forma

$$MLR = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot PC_i + b_0 + c(m \cdot anys + n)$$

on el terme  $m \cdot anys + n$  és l'equació de la recta d'ajust de la variable física, els coeficients  $m$  i  $n$  seran la tendència dins el període i el terme independent, respectivament; i  $c$  és el coeficient dels valors físics ajustats.

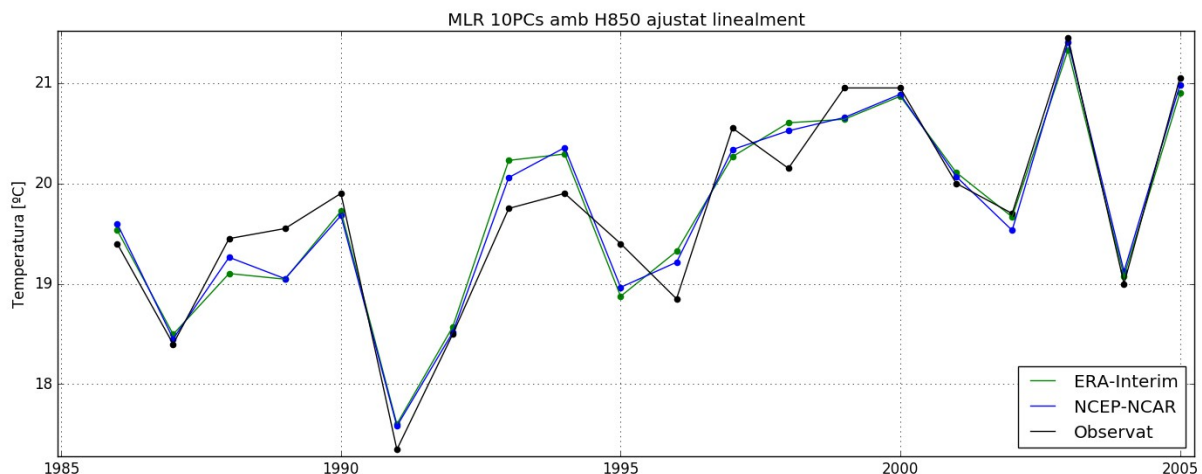
Aleshores, com que el MLR que ha donat valors més favorables fins al moment ha estat el que utilitzava el valor de l'altura geopotencial a 850 hPa es provarà aquest nou anàlisi amb aquests valors. Per les dades del reanàlisi ERA-Interim el MLR que s'utilitzarà serà

$$MLR = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot PC_i + b_0 + c(0.5310 \cdot anys + 455.34)$$

i amb les de NCEP-NCAR es té

$$MLR = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot PC_i + b_0 + c(0.7575 \cdot anys - 171.66)$$

Amb els models MLR definits ja es poden repetir tots els passos que s'han fet en tots els altres casos, el resultat final és el mostrat a la Figura 8.



**Figura 8. Temperatures calculades a partir del model MLR de 10PCs i els valors d'altura a 850 hPa prèviament ajustats linealment per NCEP-NCAR i ERA-Interim superposades als valors observats.**

El que s'extreu dels valors dels coeficients  $m$  dels dos MLR és que per ambdós l'altura geopotencial a 850 hPa ha anat en augment, fet que concorda amb els resultats de Jansà *et. al.* (2016). Amb això i

amb l'equació hipsomètrica es pot raonar que també ho ha fet la temperatura mitja de l'estrat, fet que no entra en conflicte amb l'augment de la temperatura observat experimentalment i que concorda amb Homar *et. al.* (2010).

La recta d'ajust que s'obté a partir dels valors de la temperatura del MLR amb ERA-Interim és

$$T = 0.0959 \text{ anys} - 171.66$$

obtenint una correlació de 0.951 i un RMSE de 0.303 en l'ajust de l'algorisme. Si s'agafen els valors calculats a partir de les dades de NCEP-NCAR la recta que s'obté és

$$T = 0.0959 \text{ anys} - 171.66$$

i el MLR té una correlació de 0.963 i un RMSE de 0.263. Les rectes obtingudes amb els dos reanàlisis són exactament les mateixes.

Amb aquest nou model MLR, les rectes d'ajust que s'obtenen són exactament les mateixes i donen una tendència de 0.959 °C/dècada, que és la mateixa tendència que l'observada. Coincideixen amb la recta del model MLR que incloïa els anys ja que de forma directa s'està fent el mateix, incloure els anys com a variable del MLR però amb un rerefons i una motivació diferents que permeten argumentar el perquè. Al cap i a la fi, indirectament, dins del MLR ja hi és la recta de la tendència observada, però aquesta es complementa amb els 10 PCs per tal de també reproduir la variabilitat de la temperatura i no només el seu augment.

S'ha provat aquest mètode de previ ajust de les dades amb les de l'altura geopotencial a 850 hPa perquè el MLR de 10 PCs amb H850 ha donat bons resultats per ERA-Interim. Però aquest mateix algorisme no ha donat resultats satisfactoris per NCEP-NCAR i en el que és previament ajustat sí. Per tant, es pot provar d'utilitzar les dades de temperatura a 600 hPa. El MLR de 10 PCs amb T600 ha donat resultats satisfactoris per NCEP-NCAR però pèssims per ERA-Interim. Caldrà veure si al ajustar previament els valors tots dos milloren com ha passat amb les dades de 850 hPa. Aleshores, amb l'ajust previ de les dades de temperatura a 600 hPa el MLR que resulta pel reanàlisi ERA-Interim és

$$MLR = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot PC_i + b_0 + c(0.0702 \cdot \text{anys} - 144.71)$$

i utilitzant les dades de NCEP-NCAR es té

$$MLR = \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot PC_i + b_0 + c(0.0519 \cdot \text{anys} - 108.12)$$

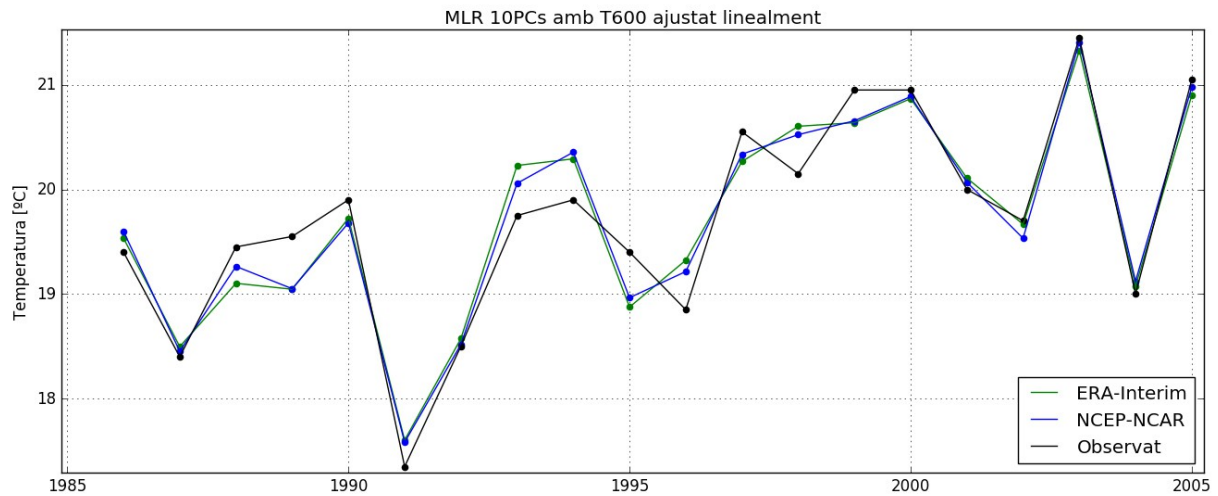
En els MLR es torna a observar un valor de  $m$  positiu, el que indica que la temperatura a 600 hPa va en augment dins el període ajustat. Una vegada definits els dos models MLR pels dos conjunts de dades climàtiques ja es poden repetir tots els passos fets en els altres estudis, el conjunt de temperatures es mostra a la Figura 9.

La recta d'ajust de les temperatures obtingudes a partir de l'ajust amb ERA-Interim amb una correlació de 0.951 i un RMSE de 0.302 és

$$T = 0.0959 \text{ anys} - 171.66$$

Utilitzant les dades de NCEP-NCAR l'ajust MLR té una correlació de 0.963 i un RMSE de 0.263 i la recta que ajusta les temperatures és

$$T = 0.0959 \text{ anys} - 171.66$$



**Figura 9.** Temperatures calculades a partir del MLR de 10PCs i els valors de la temperatura a 600 hPa prèviament ajustats linealment per NCEP-NCAR i ERA-Interim superposades als valors observats.

Es tornen a repetir els resultats obtinguts abans amb H850. Les dues rectes obtingudes són les mateixes, encara que amb diferents correlació i RMSE dels MLR, i donen una tendència de 0.959 °C/dècada que és la mateixa que la tendència observada.

Els motius que expliquen que els resultats amb T600 i H850 pels dos reanàlisis siguin els mateixos i a més coincideixin amb els observats és que amagat dins l'ajust previ de les dades hi ha la tendència observada, que es recupera al final, i els 10 PCs el que fan és reproduir la variabilitat.

## 4.6 Comparació i sensibilitat dels MLRs

Fins ara s'han provat 6 models MLR diferents: només 10 PCs, amb els valors de l'altura geopotencial a 850 hPa, amb els valors de l'estrat centrat a 550 hPa, amb la temperatura a 600 hPa, amb els valors a 850 hPa ajustats prèviament i amb la temperatura a 600 hPa ajustada prèviament. El model MLR que inclou els anys no es considera per raons físiques. Per cada MLR s'han utilitzat les dades de dos reanàlisis, ERA-Interim i NCEP-NCAR. En total es tenen 12 models MLR diferents, però el que interessa del MLR és que reproduïxi bé els valors de la temperatura. Aleshores, el que es mostra a la Taula 4 és la comparativa de totes les rectes d'ajust de les temperatures modelitzades pel conjunt dels algorismes utilitzats per poder decidir quin s'adapta millor a la realitat. El que s'ha de comprovar és que els models donen temperatures semblants a les obtingudes experimentalment i que reproduïxen amb bastant encert la variabilitat d'aquestes dins del període 1986-2005. Per tant, com que capturar la variabilitat de forma satisfactòria ho aconseguïxen tots els MLRs, es valorarà més que reproduïxi la tendència observada, que recordem que és de 0.959 °C/dècada, i que el model MLR tenguí una elevada correlació i un valor de RMSE baix.

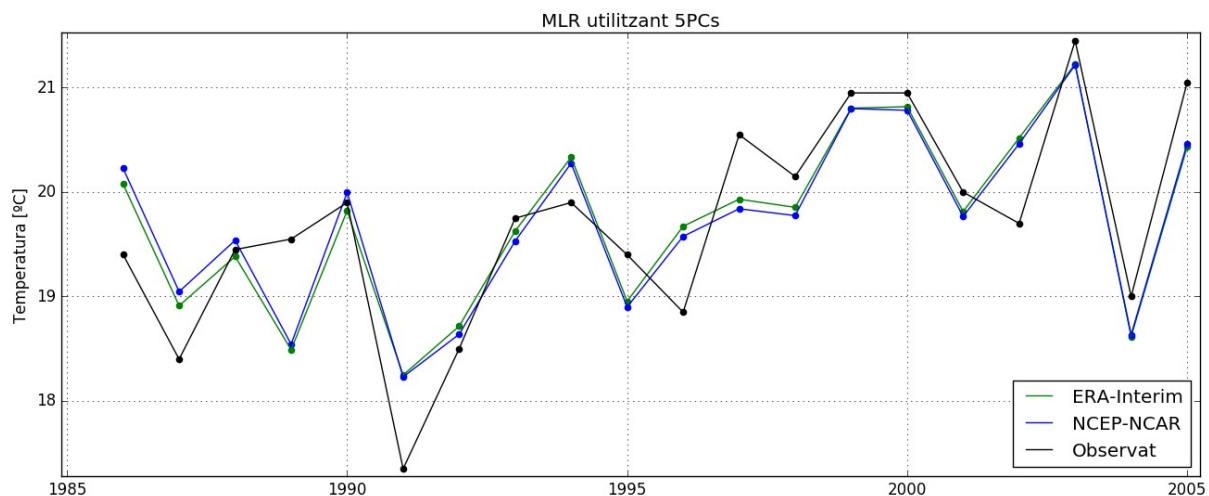
Es veu com el MLR més pobre és, en general, el que només utilitza 10 PCs. El de ERA-Interim que utilitza la temperatura a 600 hPa i els de NCEP-NCAR que utilitzen algun valor d'altura geopotencial no aporten massa millora respecte el MLR de 10 PCs. Els MLRs que utilitzen les dades de l'altre reanàlisi sí aporten una millora, superant els 0.8 °C/dècada. Però els algorismes que millor resultats han donat, de fet reproduïxen la tendència observada de 0.959 °C/dècada, són els que inclouen les variables físiques prèviament ajustades. D'aquests, els que tenen una major correlació i menor RMSE

són els que utilitzen les dades de NCEP-NCAR, els que utilitzen les de ERA-Interim tenen correlacions i RMSE lleugerament menors i majors, respectivament. Però entre el model matemàtic que utilitza H850 o T600 de NCEP-NCAR no hi ha cap motiu per distingir quin és el millor.

	ERA-Interim			NCEP-NCAR		
	Tendència [°C/dècada]	Correlació	RMSE	Tendència [°C/dècada]	Correlació	RMSE
10 PCs	0.773	0.937	0.342	0.724	0.946	0.318
H850	0.870	0.947	0.315	0.743	0.946	0.314
H550	0.821	0.945	0.320	0.728	0.946	0.318
T600	0.735	0.946	0.318	0.806	0.951	0.302
H850 ajustat	0.959	0.951	0.303	0.959	0.963	0.263
T600 ajustat	0.959	0.951	0.302	0.959	0.963	0.263

**Taula 4. Comparació dels resultats significatius obtinguts dels models MLRs utilitzats**

Tots els algorismes considerats fins ara tenen com a font per reproduir la variabilitat els 10 PCs, que si es recorda de la Taula 1, expliquen al voltant d'un 97% de la variabilitat. Però al final, el que s'està fent és ajustar una sèrie de 20 valors a partir d'11 paràmetres, 10 si només es consideren els PCs. Caldria veure si amb menys paràmetres, que vol dir amb menys PCs, també es reproduïxen bé les mesures observades. Amb 5 PCs s'aconsegueix explicar un 90% de la variabilitat. Les temperatures modelades que s'obtenen només utilitzant 5 PCs són les mostrades a la Figura 10.



**Figura 10. Temperatures calculades a partir del MLR de només 5 PCs utilitzant les dades de ERA-Interim i NCEP-NCAR, superposades a les observades.**

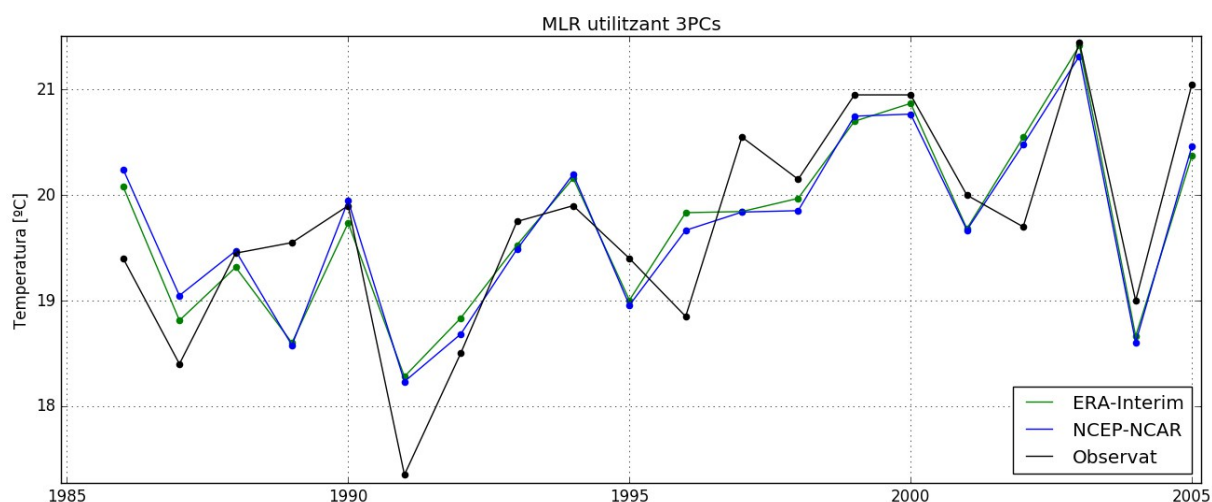
Encara que s'hagui reduït a la meitat el nombre de PCs els resultats que s'obtenen no són la meitat de bons. Els dos reanàlisis segueixen un mateix camí, ara un poc més separats que abans, i aquest és pròxim al de les temperatures observades. Cert que comparat amb l'algorisme de només 10 PCs aquest no resol tan bé la variabilitat però tot i així ho fa de forma molt correcta. És a l'analitzar les tendències que s'extreuen de les temperatures on es veu la principal diferència entre utilitzar 10 o 5 PCs. Les tendències que s'obtenen són menors que les que s'obtenien en el cas de 10 PCs. Amb només 5 s'obtenen unes tendències de 0.707 °C/dècada i de 0.630 °C/dècada per ERA-Interim i NCEP-NCAR, respectivament. Com que els resultats amb només 5 PCs no estan gens malament, a pesar de la baixa tendència, es pot estudiar si millorant l'algorisme, igual que s'ha fet pel cas de 10 PCs,

s'aconsegueixen millors resultats. El procés és exactament el mateix que el ja fet i detallat pel cas del MLR de 10 PCs però ara utilitzant-ne 5. Els resultats finals són els que es mostren a la Taula 5.

	ERA-Interim			NCEP-NCAR		
	Tendència [°C/dècada]	Correlació	RMSE	Tendència [°C/dècada]	Correlació	RMSE
5 PCs	0.707	0.843	0.528	0.630	0.837	0.536
H850	0.716	0.843	0.528	0.617	0.838	0.535
H550	0.821	0.863	0.495	0.659	0.870	0.483
T600	0.731	0.929	0.363	0.564	0.887	0.452
H850 ajustat	0.959	0.864	0.494	0.959	0.869	0.485
T600 ajustat	0.959	0.894	0.494	0.959	0.869	0.485

**Taula 5. Comparació dels resultats significatius obtinguts dels models MLRs de 5 PCs.**

Si s'observen els valors de les correlacions i dels RMSE obtinguts pels MLRs amb només 5 PCs es veu com són pitjors que pel cas anterior. Com què amb 5 PCs no es captura tanta variabilitat això repercuteix en la qualitat del MLR amb correlacions més baixes, cap arriba a 0.9, i RMSE majors, només un cas baixa de 0.4. Si es miren les tendències, els únics models que reproduïxen bé la tendència observada són els que incorporen les variables prèviament ajustades. En general, es repeteix que les tendències són menors utilitzant els valors de NCEP-NCAR que els de ERA-Interim, encara que són menors a les que s'obtenien pels corresponents models amb 10 PCs. De fet, les tendències pels MLRs amb NCEP-NCAR són menors que les del NCEP-NCAR de només 10 PCs. La pèrdua de variabilitat també ha afectat disminuint la tendència.



**Figura 11. Temperatures calculades a partir del MLR de només 3 PCs utilitzant les dades de ERA-Interim i NCEP-NCAR, superposades a les observades.**

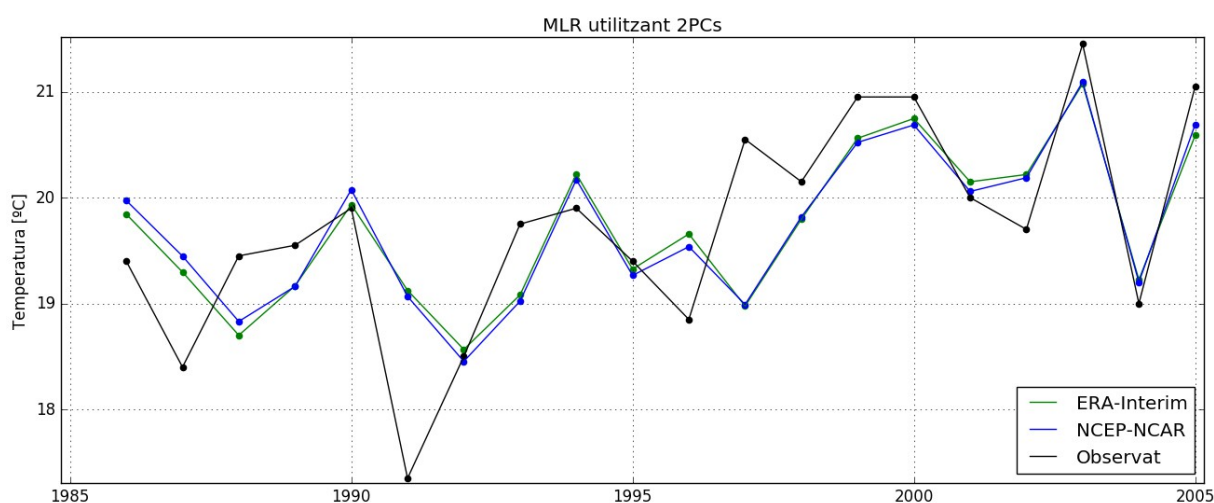
Si enlloc de voler reproduir el 90% de la variabilitat es vol només el 80% caldria agafar només 3 PCs. Així les temperatures que s'obtenen tenen un aspecte com el que ja tenien amb 5 PCs, com es pot veure a la Figura 11. Els dos reanàlisis acompanyen la variació de temperatura observada però es veu com ara ja se n'han separat un poc, encara que els dos segueixen dibuixant camins molt semblants. Els resultats que es tenen són els esperats, un model MLR amb menys PCs ha d'explicar pitjor la variació que els anteriors de 5 i 10 PCs. De totes formes, la bona explicació que encara es fa de les temperatures dona peu a refer els estudis realitzats pels altres MLRs amb diferent nombre de PCs. A la Taula 6 es poden veure els resultats si s'afegeixen les variables ja estudiades al model de 3 PCs.

	ERA-Interim			NCEP-NCAR		
	Tendència [°C/dècada]	Correlació	RMSE	Tendència [°C/dècada]	Correlació	RMSE
3 PCs	0.734	0.836	0.538	0.639	0.835	0.539
H850	0.766	0.837	0.536	0.635	0.835	0.539
H550	0.745	0.855	0.508	0.617	0.850	0.516
T600	0.676	0.876	0.472	0.574	0.859	0.502
H850 ajustat	0.959	0.852	0.513	0.959	0.865	0.491
T600 ajustat	0.959	0.852	0.513	0.959	0.865	0.491

**Taula 6. Comparació dels resultats significatius obtinguts dels models MLRs de 3 PCs.**

Els resultats mostrats a la Taula 6 són com s'esperaven, segueixen la línia dels obtinguts pel cas de 5 PCs. Al tenir menor variabilitat explicada influeix en els MLRs que s'obtenen amb unes correlacions menors, no arriben a 0.88, i uns valors majors de RMSE que no baixen de 0.45. A més, cal sumar-hi que en general no es reproduïx correctament la tendència observada, excepte pels casos que tenen variables ajustades prèviament.

Per complementar l'estudi de la sensibilitat del MLR al nombre de PCs, per explicar un 70% de la variabilitat només fan falta 2 PCs. Dos únics valors per bimes són capaços d'explicar més de la meitat de la variabilitat, amb 40 *scores* s'explica el 70% de la variabilitat de 20 anys. Si es fa l'estudi amb 2 PCs el resultat de les temperatures modelitzades és el de la Figura 12. Amb aquest últim estudi es veu més clara la pèrdua de variabilitat. Ara les temperatures que s'obtenen es veu com segueixen unes oscil·lacions més suaus i no reproduïx tant bé l'any anòmal de 1991, encara que també es pot veure com sí explica bé determinats pics bruscos com els de 2003 i 2004. Es veu com els reanàlisis estan més separats de les temperatures observades, encara que els dos segueixen anant junts. Per curiositat científica i per tal de completar l'anàlisi es pot estudiar l'efecte d'introduir els termes extra ja considerats pels altres casos al MLR de 2 PCs. A la Taula 7 es mostren els resultats finals al incloure les variables físiques juntament als 2 PCs.



**Figura 12. Temperatures calculades a partir del MLR de només 2 PCs utilitzant les dades de ERA-Interim i NCEP-NCAR, superposades a les observades.**

Els resultats obtinguts són com s'esperaven tenint en compte com han estat els obtinguts per 5 i 3 PCs. El cas de l'altura geopotencial a 850 hPa amb les dades de ERA-Interim és un cas estrany ja que dóna

una tendència que només difereix en 0.1 °C/dècada de l'observada, una de les tendències més bones obtingudes, sense considerar els models amb les variables prèviament ajustades. Però és un model MLR amb una correlació que no arriba a 0.8 i una RMSE de gairebé 0.6. En conjunt, els altres models MLRs tenen valors de la correlació i RMSE semblants o pitjors i les tendències que es tenen són massa baixes, excepte pels casos amb variables ajustades linealment.

	ERA-Interim			NCEP-NCAR		
	Tendència [°C/dècada]	Correlació	RMSE	Tendència [°C/dècada]	Correlació	RMSE
2 PCs	0.701	0.709	0.692	0.649	0.716	0.684
H850	0.898	0.792	0.599	0.690	0.795	0.594
H550	0.736	0.806	0.581	0.605	0.810	0.576
T600	0.635	0.849	0.518	0.536	0.825	0.554
H850 ajustat	0.959	0.734	0.666	0.959	0.749	0.650
T600 ajustat	0.959	0.734	0.666	0.959	0.749	0.650

**Taula 7. Comparació dels resultats significatius obtinguts dels models MLRs de 2 PCs.**

El que s'ha vist al variar el nombre de PCs utilitzats al MLR és que cada vegada la variabilitat de les temperatures modelitzades és menor, els MLRs comencen a reproduir no tant bé els augments i les disminucions de la temperatura dins el període. Aquesta disminució de la coincidència entre les temperatures modelitzades i les observades es corrobora amb uns valors de correlació cada vegada més petits i un RMSE cada vegada més gran pels MLRs. Una altra conseqüència és que la tendència cada vegada és menor. Pel cas de 10 PCs ja estava allunyada de la tendència observada i al tenir menys PCs aquesta disminueix encara més. El que s'observa amb els models que incorporen una variable física prèviament ajustada és que la tendència resultant és exactament l'observada, indirectament aquesta ja està inclosa dins del MLR, i el paper que juguen els PCs és el d'afegir la variabilitat. Això es veu clar al compara els models de diferents PCs. Tenen mateixa tendència però a mesura que el nombre de PCs és menor la qualitat de l'ajust també disminueix. Per tant, tot i que amb només 2 PCs s'aconsegueixi reproduir la tendència de 0.959 °C/dècada no és un algorisme del tot bo degut a que té poca correlació i elevat RMSE.

Aleshores, a la vista dels resultats globals obtinguts, els dos algorismes que responen millor a la tendència i a la variabilitat segueixen sent els que inclouen 10 PCs i l'altura geopotencial a 850 hPa o la temperatura a 600 hPa ajustades linealment amb les dades extretes del reanàlisi NCEP-NCAR.

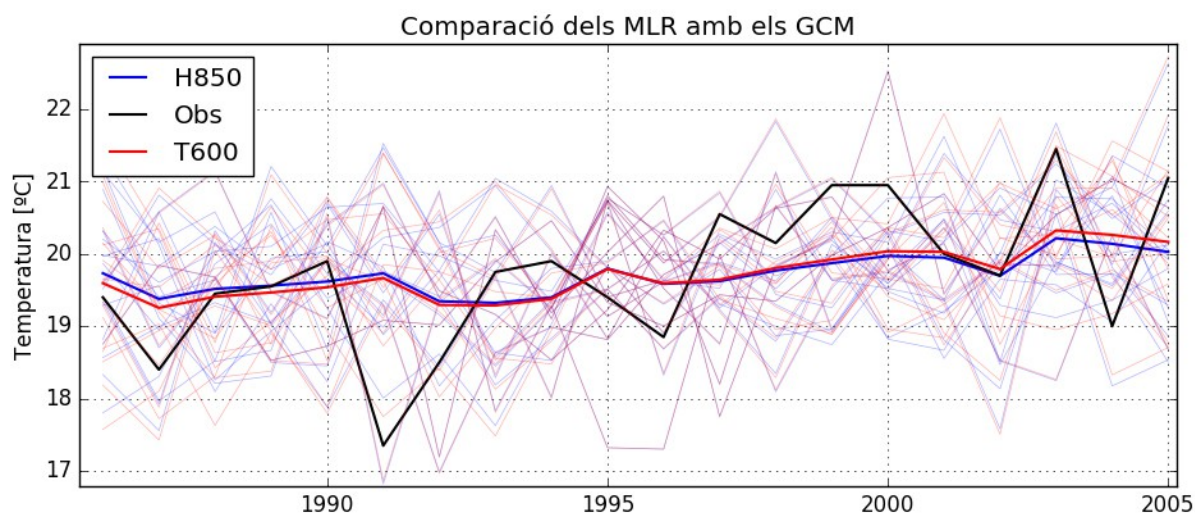
## 4.7 Aplicació als models de circulació global

Per discernir amb quin dels dos algorismes quedar-se es farà a partir dels resultats que s'obtinguin al utilitzar-los amb els models de circulació globals (abreujats amb les sigles en anglès com GCMs). Ara es coneix el comportament amb les dades de NCEP-NCAR, però és una única font, cal veure com actua amb les dels altres 20 GCMs.

La forma d'obtenir els resultats a partir de les dades dels GCMs serà la següent. El mateix algorisme amb el qual s'han obtingut els valors dels *scores* dels PCs rotats per NCEP-NCAR s'aplicarà a la base de dades de cada model per obtenir els *scores* d'aquell model en particular. A part, també es calcularan els valors de la temperatura a 600 hPa i de l'altura geopotencial a 850 hPa sobre les Illes tal com ja s'havia fet abans. Aleshores, s'introduiran aquests *scores* i els valors de les variables físiques ajustades linealment al model MLR on ara s'utilitzaran els valors dels coeficients que s'han obtingut al entrenar-lo amb el reanàlisi NCEP-NCAR. Així, per cada un dels models globals es modelitzaran les

temperatures anuals del bimes. Però les d'un en particular no són d'interès, sí ho són les del conjunt dels models. Per tant, el que es fa és calcular la temperatura mitjana de cada any com el valor mitjà dels obtinguts per cada un dels models. Aquestes temperatures sí que seran d'interès. El que s'utilitzarà per comparar resultats entre MLRs serà que la línia de temperatura mitjana s'ajusti a les temperatures observades i que la temperatura mitjana modelitzada pel període 1986-2005 coincideixi amb l'observada, que és de 19.71 °C.

Però a l'hora de calcular els *scores* dels GCMs sorgeix un dubte amb la base de dades d'on extreure els mapes mitjans i de desviació estàndard d'altura geopotencial a 550 hPa, necessaris pel càlcul dels *scores*. Aquí s'obren dues possibilitats, utilitzar els mapes que s'han fet servir per NCEP-NCAR, el reanàlisi amb el qual s'ha entrenat el MLR per calcular els coeficients, o els mapes propis de cada GCM, el model del qual es volen extreure els nous *scores* a utilitzar per obtenir la temperatura. Per sortir dels dubtes es fan els càlculs pels dos camins. Amb el MLR que utilitza els valors de H850 la temperatura mitjana que s'obté utilitzant els mapes de NCEP-NCAR és de 18.47 °C, en canvi, si s'utilitzen els mapes propis del GCM la temperatura augmenta fins a 19.38 °C, només unes dècimes per sota de la temperatura observada. Si el MLR que s'utilitza és el que inclou els valors de T600 les temperatures que resulten són menors, 16.87 °C i 17.78 °C, però d'aquestes la major torna a ser la que utilitza els mapes propis. Per tant, queda clar que pel càlcul dels *scores* s'han de fer servir els mapes del propi model, ja que donen una temperatura mitjana més semblant a l'observada. El que es veu amb els resultats és que la temperatura que s'obté amb un MLR i amb l'altre té més d'1 °C de diferència, sent major el de H850, però si ens fixam en la tendència és major la que utilitza T600, 0.468 °C/dècada, que la de H850, 0.323 °C/dècada. Cap dels dos acaba de convèncer del tot. Un té millor temperatura mitjana i l'altre millor tendència, però en conjunt cap acaba d'explicar les observacions.



**Figura 13. Temperatures dels dos MLRs amb els *scores* calculats amb els mapes propis i la variable física amb el biaix corregit.**

Ja es té clar el tractament de dades a seguir per a l'obtenció dels *scores* pel model MLR, però aquest també té un altre valor del que depèn, de la variable física ajustada. En l'estudi anterior aquesta era directament la que s'obté dels models GCM amb l'ajust pertinent. Però aquest valor pot ser que segueixin la mateixa tendència que els de NCEP-NCAR però degut a les diferències que hi ha a les equacions que resolen els models globals poden tenir un cert biaix respecte dels de referència, els de NCEP-NCAR. Cal recordar que els valors de la variable física van acompanyats també d'un coeficient i que aquest s'ha calculat a partir d'uns valors que tenen un valor mig determinat. Per tant, els nous valors que s'introdueixin cal que estiguin referits al mateix valor mig. Per tal de corregir-ho s'introdueix un valor corrector del biaix, propi per cada GCM, que s'inclou en el conjunt de les variables extretes de la base de dades abans d'ajustar-les linealment. A les diferents proves que s'han realitzat introduint un valor corrector s'ha vist que només introdueixen un valor constant a totes les



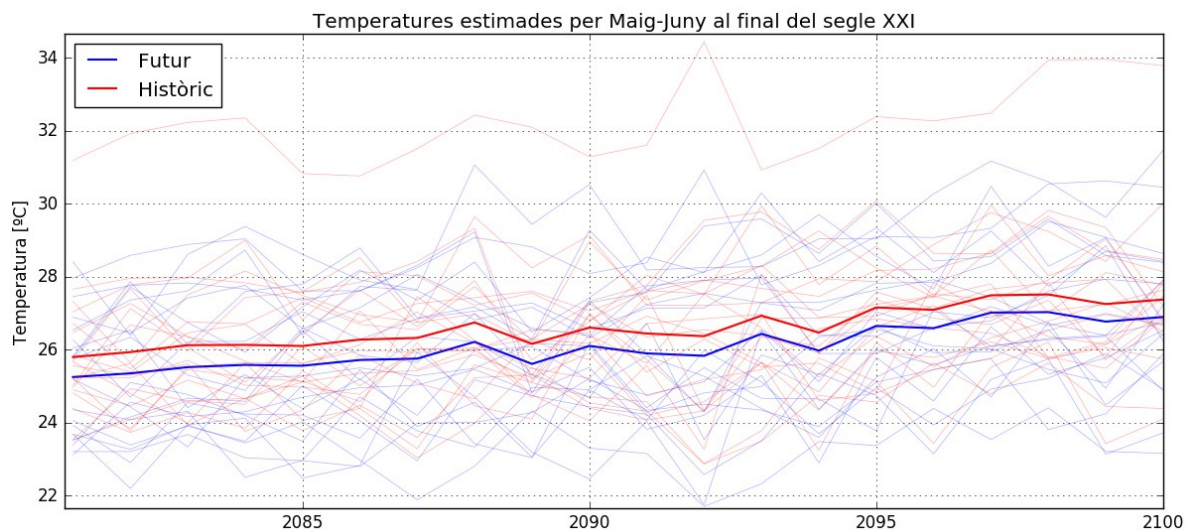
temperatures, per tant, no es veu afectada la tendència d'aquestes. L'única modificació que sofreixen les temperatures és si en conjunt són més o menys càlides, però no la seva evolució temporal. Així, les tendències que s'obtenen pels MLR són les mateixes que abans, 0.468 °C/dècada amb T600 i 0.323 °C/dècada amb H850, però ambdues temperatures mitjanes ja sí coincideixen amb l'observada, 19.71 °C. L'altre efecte que produeix la correcció del biaix és que la dispersió entre els GCM disminueix, tots es compacten més al voltant de la temperatura mitjana. A la Figura 13 es poden veure els resultats finals dels dos MLRs, on es veu que el que inclou T600 obté resultats lleugerament millors que el de H850, mostrant una major tendència.

## 5. Estimació dels efectes de canvi climàtic

### 5.1 Maig-Juny

Per tant, a la vista dels resultats obtinguts fins al moment, l'algorisme que s'ha adaptat millor a la realitat observada és el MLR que inclou el valor de la temperatura a 600 hPa amb la correcció del biaix i linealitzat i els *scores* calculats a partir dels mapes mig i desviació estàndard pròpis de cada model global. Aleshores serà aquest l'algorisme que s'utilitzarà per estimar la temperatura a les Illes Balears a finals del segle XXI. El període futur d'estudi torna a abraçar 20 anys, en aquest cas els últims 20 de final de segle, entre el 2081 fins el 2100. La forma de procedir per obtenir les temperatures serà semblant al que s'ha seguit en l'estudi dels GCMs històrics.

El biaix que s'ha introduït pel cas històric, calculat com la diferència entre les temperatures mitjanes del reanàlisi NCEP-NCAR i del GCM, serà el mateix que s'introduirà en el cas futur. Però sorgeix un altre dubte a l'hora de calcular els *scores*, si cal utilitzar els mapes mig i desviació estàndard referits al cas històric, el qual guarda relació amb els coeficients dels PCs que s'han fet servir, o del cas futur, ja que ara es pretén analitzar aquest cas.



**Figura 14. Temperatures de finals de segle calculades amb el MLR que inclou T600 amb el biaix corregit i els *scores* calculats a partir dels mapes històrics (vermell) o futurs (blau).**

Per sortir dels dubtes es poden fer els càlculs pels dos mètodes. Les temperatures que els models MLRs estimen pel bimes Maig-Juny a finals de segle són les que es mostren a la Figura 14. Amb el model que utilitza els mapes de l'escenari històric (representats en vermell) s'obté una tendència de 0.843 °C/dècada i una temperatura mitja de 26.61 °C i utilitzant els del GCM futur (representats en blau) la tendència és 0.899 °C/dècada i la temperatura mitjana 26.08 °C. Amb un s'obté una major

temperatura mitja i amb l'altre una major tendència, encara que els resultats no són massa dispars. Però cal recordar que el model MLR s'ha entrenat amb els PCs, amb circulacions, del passat.

Si totes les circulacions i estructures amb els anys es potenciesin per igual, tots els camps augmentessin en conjunt, com que en el procés de càlcul dels *scores* es resta el mapa mig (que seria igual al mapa mitjà històric però augmentat una constant) aquest efecte no es veuria reflectit en els nous *scores* i, per tant, tampoc en la temperatura final. Només contribuiria el terme de la variable física. A aquest efecte, i a d'altres no considerats, se'ls pot atribuir la diferència de mig grau que sorgeix depenent de quins mapes mig i de desviació estàndard s'han utilitzat. Per tant, cal utilitzar els mapes propis del GCM obtinguts en el cas històric també al futur, per tal que sigui coherent amb els valors dels coeficients calculats.

Es veu a la Figura 14 com un dels GCM dona temperatures anormalment altes, no segueix la línia dels altres. Si es refan els càlculs mitjos sense tenir-lo en compte no es modifica la tendència global però la temperatura mitjana baixa poc més d'una dècima, 26.47 °C. Es veu com l'efecte d'un sol GCM no és massa important sobre el total, per això els valors que interessen són els del conjunt. Però sí es veu, i aquest model anòmal n'és un bon exemple, com la dispersió entre models ha augmentat respecte del cas històric. Abans estaven confinats dins un rang d'uns 3 °C i ara és major, uns 4 °C; més si es té en compte el model divergent. Això és degut a com es calculen els valors dels GCMs pel passat. Cada un ressol les seves pròpies equacions amb les seves consideracions però inclouen, amb una certa ponderació, les dades experimentals de què es disposen. D'aquesta forma, es reajusten els resultats que donen perquè no s'allunyin gaire de les observacions, de la realitat. Pel cas futur, obviament no es tenen valors experimentals i fa que els models evolucionin lliurement, cada un pel camí que dicten les seves equacions. La diferència entre ells rau dins les equacions que ressolen. Alguns confereixen un pes major a determinats efectes que d'altres potser ni tenen en compte. Tot això s'introdueix a les equacions generals en forma de parametritzacions, que a més, un mateix efecte es pot expressar de formes diferents. Això fa que al final els resultats d'un i d'altre no coincideixin exactament. Al fer la mitja de tots els models, el resultat és una estimació de la temperatura deguda a la contribució de molts efectes i considerats de formes diverses. A més, al promitjar els resultats dels models es pretén filtrar les incerteses pròpies de cada simulació climàtica. D'aquí l'importància de considerar el conjunt i no un individual.

Però poden quedar dubtes de quin seria l'escenari futur si el MLR triat hagués estat un altre, ja que en l'estudi final s'han descartat algunes opcions que podrien ser vàlides. L'altre algorisme que s'ha mantingut fins a la tria final era el model MLR que incloïa els valors de H850 ajustat linealment. Amb aquest model s'obté una temperatura estimada de 23.84 °C i una tendència d'escalfament de 0.461 °C/dècada. Aquest MLR, pel cas històric, tenia una tendència de devers 0.1 °C/dècada menor que l'altre. Aquesta menor tendència es pot veure com s'ha traduït en una temperatura mitjana d'uns 3 °C menor i una tendència gairebé de la meitat respecte del model amb T600 per a finals de segle.

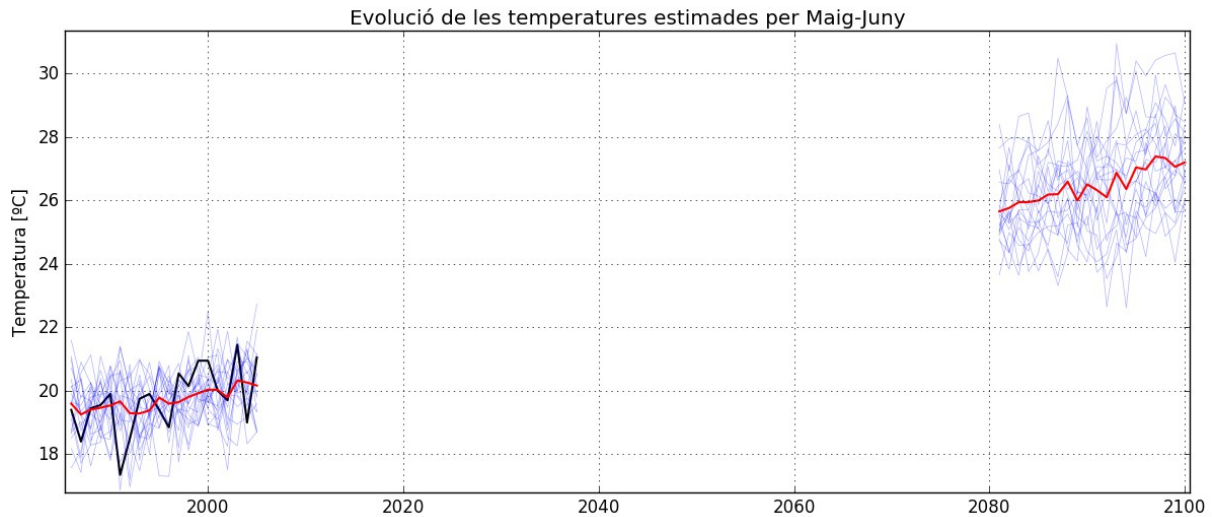
Per poder apreciar millor les diferències de temperatura entre els dos períodes d'estudi es poden veure els resultats obtinguts amb el model MLR pel cas històric i futur a la Figura 15. Com es veu, si s'allarga la línia que semblen seguir les temperatures del cas històric s'arriba al conjunt de valors obtinguts al futur, per tant, els resultats futurs no semblen ser massa discordants o allunyats amb el que es podria esperar.

La tendència observada que es registra pel cas històric, que també reproduïa el model MLR amb les dades de NCEP-NCAR, és de 0.959 °C/dècada. Però al considerar tots els models GCMs ha canviat, la recta d'ajust que segueix la temperatura mitjana modelitzada és

$$T = 0.0468 \text{ anys} - 73.69$$

d'on s'extreu una tendència de 0.468 °C/dècada. Si anam als resultats de finals del segle XXI, la recta que s'obté és

$$T = 0.0843 \text{ anys} - 149.85$$



**Figura 15. Representació de l'evolució estimada de les temperatures mitjanes pel bimes Maig-Juny pel cas històric i pel futur. En negre els valors observats, en vermell les temperatures mitjanes que s'obtenen a partir del conjunt de valors dels GCMs (en blau).**

Per tant, una tendència de 0.843 °C/dècada, major que la modelitzada pels GCMs històrics però menor que la tendència observada present. Si pel cas històric ja hi ha una certa discrepància entre la tendència observada i la resultant de fer la mitja amb els GCMs, sent aquesta última menor, cal esperar que la tendència al futur sigui aproximada i que fins i tot pugui ser considerada com una cota inferior de la realitat. Per tant, es podria esperar que, tal com ha ocorregut pel cas present, l'escalfament real a finals de segle XXI sigui major a 0.843 °C/dècada, que és el que estima el model matemàtic.

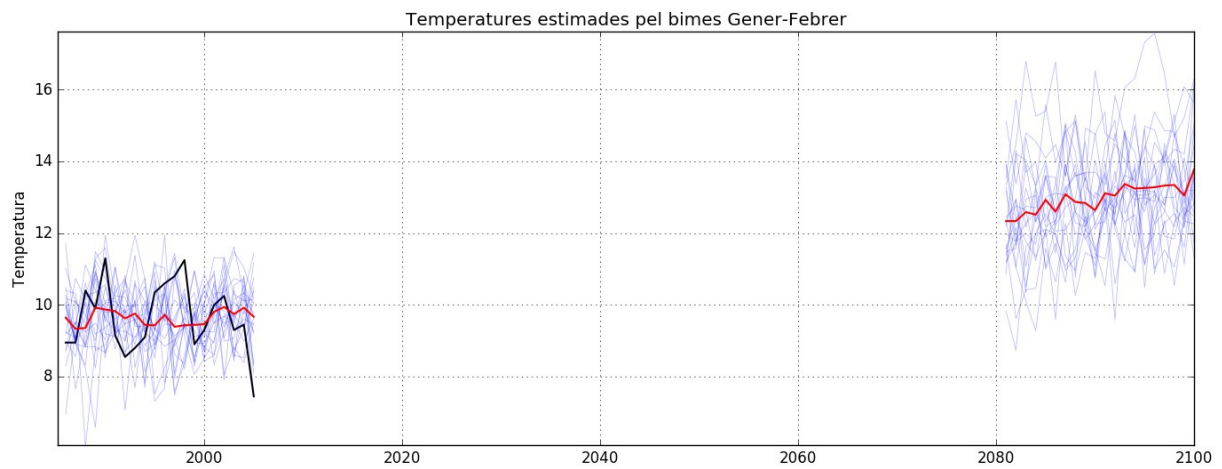
## 5.2 Conjunt dels bimesos

La millora d'un model MLR fonamentat en 10 PCs, procediment basat en els bons resultats expressats a Jansà, *et al.* (2016), ha derivat en l'obtenció de bons i coherents resultats per la temperatura del bimes Maig-Juny tant dins el període 1986-2005 com pel 2086-2100. L'algorisme final resultant de l'estudi és un MLR basat en 10 PCs amb un terme que inclou els valors ajustats linealment de la temperatura a 600 hPa amb la correcció del biaix. Per tant, a priori i basat en els bons resultats d'aquest MLR per Maig-Juny (MJ), es pot suposar que el comportament d'un model similar per a la resta de bimesos serà semblant al ja estudiat. Així es pot estendre l'anàlisi dels efectes del canvi climàtic sobre la temperatura als bimesos restants: Gener-Febrer (GF), Març-Abril (MA), Juliol-Agost (JA), Setembre-October (SO) i Novembre-Desembre (ND). A les Figures 16-20, es poden observar els resultats del model pel cas històric i pel futur.

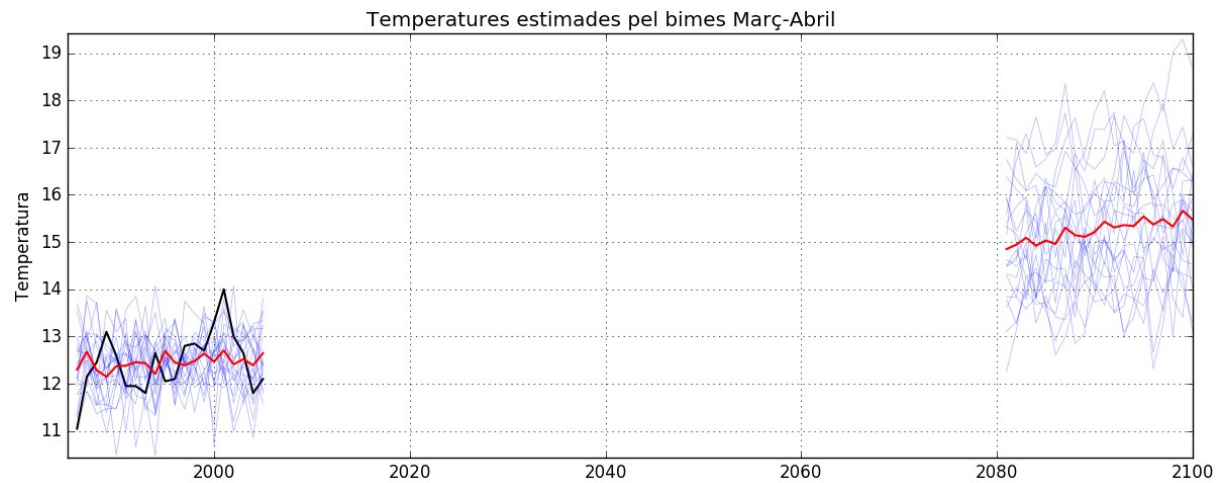
Amb una ràpida mirada a les gràfiques obtingudes ja es pot veure que els bimesos Juliol-Agost i Setembre-October no tenen un bon comportament, el seu anàlisi i comentaris particulars es faran més endavant.

Per poder comparar i discutir millor els resultats del model MLR aplicat als sis bimesos, a la Taula 8 hi ha els resultats més significatius de cada un, tant pel cas històric com pel futur. La temperatura

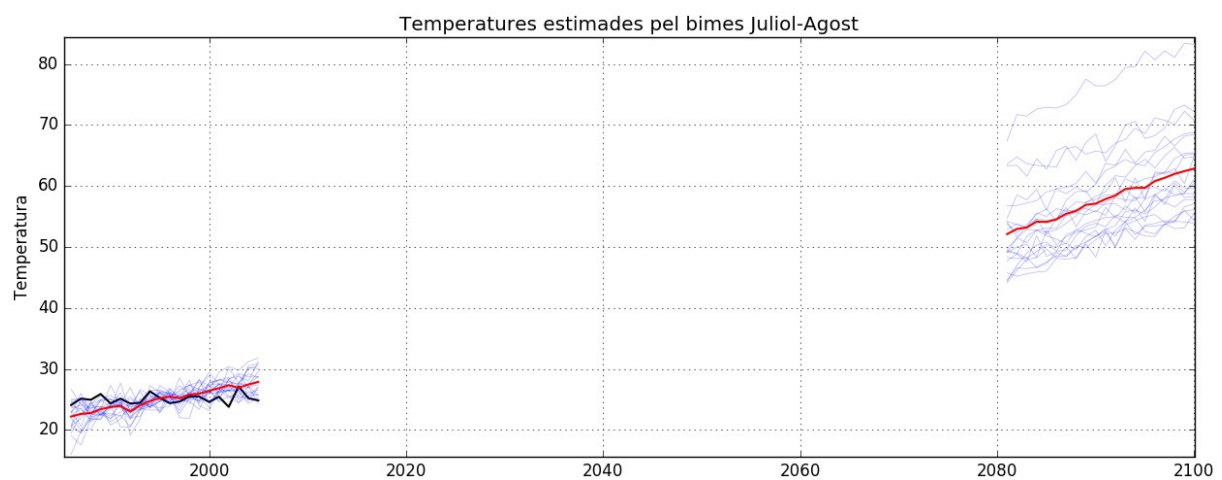
mitjana que registra el conjunt dels GCMs coincideix amb la mitjana observada que també és la que reproduïx el model MLR utilitzant els dades del NCEP-NCAR. Això és per pura construcció del MLR, ja que s'afegeix el terme corrector del biaix amb aquesta intenció.



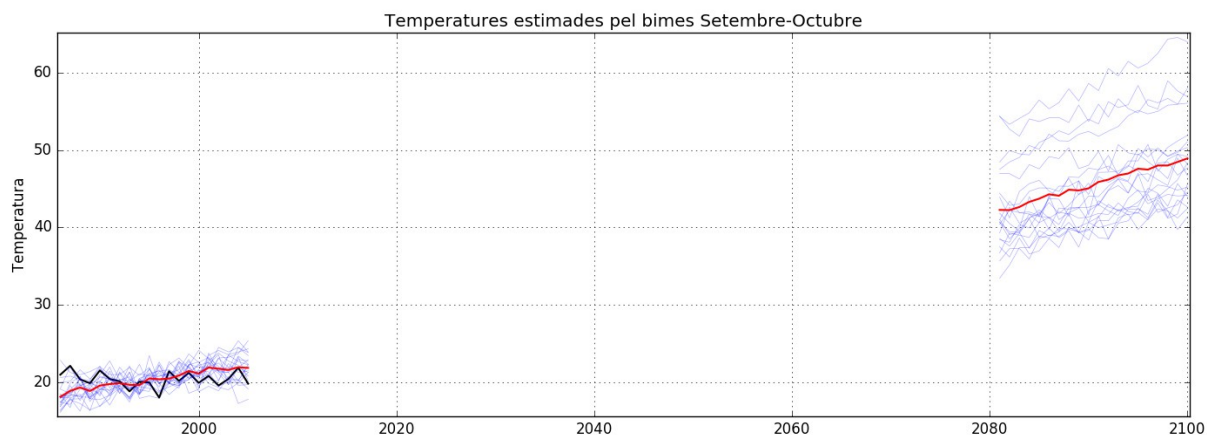
**Figura 16.** Igual que la Figura 15 però pel bimes Gener-Febrer.



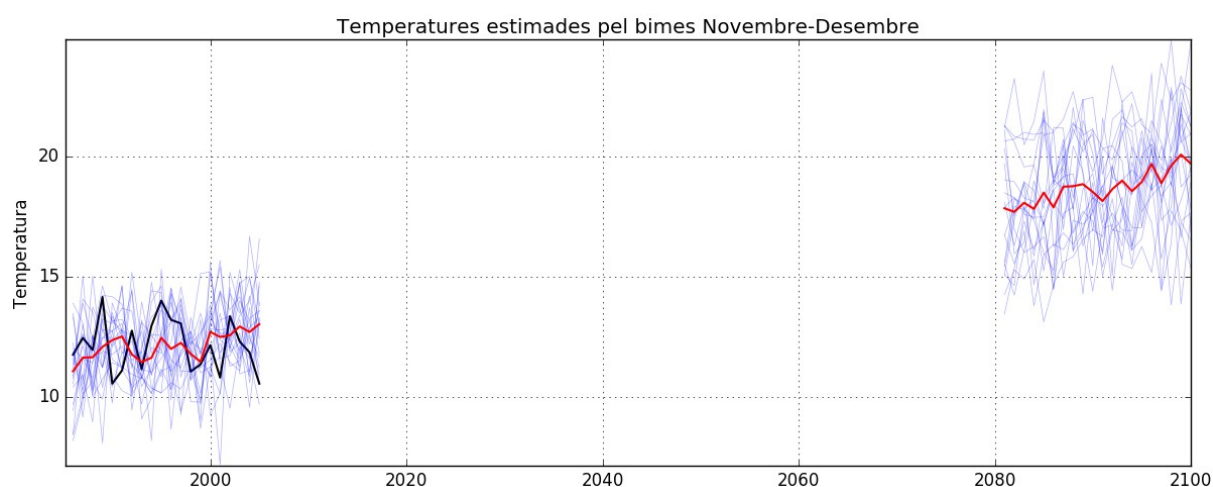
**Figura 17.** Igual que la Figura 15 però pel bimes Març-Abril



**Figura 18.** Igual que la Figura 15 però pel bimes Juliol-Agost.



**Figura 19. Igual que la Figura 15 però pel bimes Setembre-October.**



**Figura 20. Igual que la Figura 15 però pel bimes Novembre-Desembre.**

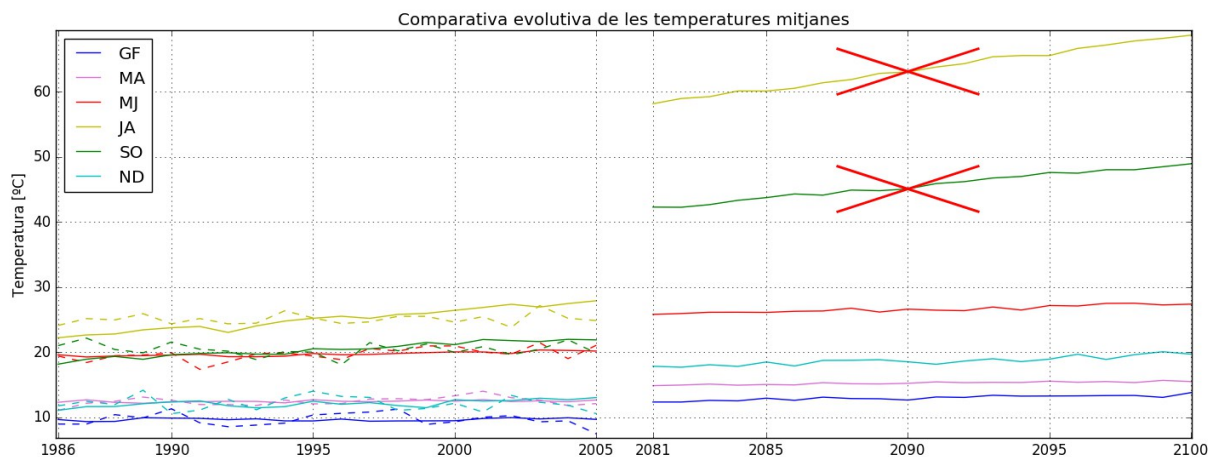
	Històric			Futur		
	Temperatura mitjana [°C]	Tendència observada [°C/dècada]	Tendència [°C/dècada]	Temperatura mitjana [°C]	Tendència [°C/dècada]	$\Delta T$ [°C]
Gener-Febrer	9.64	-0.187	0.074	12.98	0.571	3.34
Març-Abril	12.45	0.408	0.112	15.24	0.346	2.79
Maig-Juny	19.71	0.959	0.468	26.47	0.843	6.76
Juliol-Agost	25.05	0.265	2.935	57.55	5.740	-
Setembre-October	20.40	-0.187	1.891	45.58	3.601	-
Novembre-Desembre	12.12	-0.276	0.638	18.68	1.008	6.56

**Taula 8. Valors obtinguts a partir del model MLR. Són les dades que s'extreuen de les Figures 15 - 20. Els valors de  $\Delta T$  per JA i SO són 32.50 i 25.18 °C, respectivament, i no s'han inclòs a la taula perquè no tenen sentit físic ja que són fruit d'un mal comportament de l'algorisme per aquests bimesos.**

El que ja s'havia vist pel bimes Maig-Juny i que ara es veu en el conjunt de bimesos és que la tendència dels models GCMs no s'ajusta a l'observada. Així com el model MLR amb les dades de NCEP-NCAR sí reproduceix perfectament la tendència observada per tots els bimesos, a partir

d'incloure el terme linealitzat de T600, al utilitzar les dades dels GCMs no s'aconsegueix. Pels casos Maig-Juny i Març-Abril la tendència modelitzada és molt menor a l'observada però coincideix en un augment. Pels bimesos Gener-Febrer i Novembre-Desembre s'ha experimentat un descens de les temperatures però la tendència obtinguda per l'algorisme és positiva. L'obtinguda pel primer és lleugerament positiva. Per l'últim bimes, el fet de tenir grans variabilitats, i potser un període massa curt, fan que el model no reproduïxi una tendència que va a la baixa. Encara que les tendències no concordin, la línia de temperatura mitjana s'entrecreua amb la de les observades i aquestes queden englobades dins del nígul de dispersió dels models GCMs.

A les gràfiques de l'evolució de la temperatura es veu com si es prolonguen les temperatures mitjanes, aquestes van a parar al nígul de dispersió dels models GCMs futurs. Això és un indicatiu de que l'algorisme aplicat pel futur dóna temperatures dins el rang esperat, tenint en compte l'actual escalfament modelat. Però tot i aquesta coincidència, les tendències d'escalfament no són iguals. El que tenen en comú els bimesos és que la tendència futura és major que l'històrica. Per tant, es registraria un escalfament major a l'actual a finals de segle. Però com s'ha vist, el model matemàtic no reproduïx del tot les tendències, però sí les temperatures mitjanes. Aleshores, si s'analitzen aquests resultats el que es veu és un clar augment de la temperatura mitjana bimensual a finals de segle, com es pot apreciar millor a la Figura 21.



**Figura 21. Salt de les temperatures mitjanes entre les històriques i les futures estimades. Les temperatures futures per JA i SO s'han representat però manquen de significat físic.**

L'extensió del model MLR que ha reproduït valors tan bons pel bimes Maig-Juny només ha estat satisfactòria pel bimes Març-Abril, un bimes que per condicions climàtiques s'assembla al Maig-Juny i que també seria considerat com de transició entre primavera i estiu. Pels mesos d'hivern no s'ha reproduït la tendència negativa que han experimentat en el període històric i per Juliol-Agost i Setembre-October el resultat no és gens satisfactori. Per aquests bimesos marcadament anòmals ja s'observen comportaments estranys de l'algorisme pel cas històric. La línia de temperatures mitjanes talla amb un pendent clarament marcat a la línia de temperatures observades, enlloc d'evolucionar dins el rang d'oscil·lacions anuals com s'observa pels altres bimesos. Això és conseqüència de que la dispersió dels GCMs no inclou els valors experimentals i es veu com aquests ja tenen, en conjunt, una tendència marcadament positiva, quan pels altres casos no és així. Els valors futurs estan clarament sobreescalfats (d'aquí que no es mostrin a la Taula 8) que no són gens raonables i no mereixen cap altre comentari que la tendència futura coincideix amb les altres en ser major que l'històrica. El fet que si s'allarga la tendència obtinguda al període històric sembli que arriba als valors futurs fa pensar que els dos grups de resultats són coherents entre ells, com ocorre amb els altres bimesos. Però no són acceptables des del punt de vista físic ja que representen temperatures. Això fa pensar que el mètode d'anàlisi ja falla al cas històric a part de que és possible que en aquests mesos, que són els més calorosos de l'any, l'extrapolació que es fa de l'algorisme utilitzant-lo al període futur ja no sigui vàlida. Però això només explicaria els mals resultats del futur. Pels històrics podria ser que la

regionalització falli en aquests mesos. En els models i reanàlisis, les Illes Balears venen representades per 12 punts de malla enmig de la Mediterrània on ni es distingeixen les diferents illes. Podria ser que per aquests mesos calorosos hi intervingués qualche efecte que no es perceptible en els altres bimesos i que per tant no fa vàlida l'extensió de l'algorisme entrenat i optimitzat per Maig-Juny. Una combinació d'un algorisme no adequat i una mala regionalització poden ser els causants d'uns resultats catastròfics.

## 6. Conclusions

La motivació inicial d'aquest estudi són els bons resultats de Jansà *et. al.* (2016) on es relaciona la variació i augment de la temperatura en superfície a les Illes Balears a partir dels valors de l'altura geopotencial. El punt de partida ha estat la proposta d'un model matemàtic amb 10 PCs però de seguida s'ha vist que tenia molt marge de millora. Aleshores s'han explorat noves vies per tal de millorar aquest model MLR proposat inicialment a partir d'afegir termes extres a l'equació que expliquessin sobretot la tendència que no s'aconseguia explicar només amb els PCs. L'optimització s'ha centrat en el bimes Maig-Juny i s'ha aconseguit derivar un algorisme que permet explicar tant la temperatura mitjana com la tendència observada per aquest bimes en el període 1986-2005. Això entrenant l'algorisme amb les dades dels reanàlisis ERA-Interim i NCEP-NCAR. Quan s'ha aplicat a les dades dels models globals no s'han conservat els bons resultats, encara que els obtinguts no estan gens malament. Per tant, el MLR final és un algorisme amb 10 PCs que incorpora la temperatura sobre les Illes a 600 hPa, prèviament ajustada linealment i amb el biaix corregit.

Aleshores, a la vista dels bons resultats i com aquests explicaven les temperatures observades s'ha decidit estendre aquest MLR a la resta de bimesos confiant que el seu comportament seria semblant al ja estudiat. El comportament dels bimesos a l'algorisme ha estat l'esperat, la població dels GCMs abracen els valors observats i la temperatura mitjana que en resulta es veu com evoluciona dins dels rangs donats per les temperatures observades. Però a l'analitzar les tendències, aquestes només són satisfactòries pel bimes Març-Abril. Pels bimesos freds no s'ha reproduït el refredament que experimenten. Però pels bimesos Juliol-Agost i Setembre-October és veu clarament com l'algorisme falla. Per aquests dos bimesos és evident que cal explorar noves i diferents vies de millora que s'adaptin a les condicions específiques de l'estiu.

Les tendències obtingudes es poden considerar com a estimacions de com es preveu que sigui l'augment de la temperatura al futur i per tots els bimesos coincideixen en un augment major que l'actual. Si s'analitzen les temperatures mitjanes futures, totes són majors a les actuals i es veu com de mitjana s'espera un augment de devers 5 °C, oscil·lant entre els 3 °C per Gener-Febrer i Març-Abril als 6 °C i poc de Maig-Juny i Novembre-Desembre. Aquest augment de les temperatures mitjanes és coherent i concorda amb l'augment que es pot esperar, per exemple, per a Catalunya a finals de segle, segons el que s'extreu dels resultats del TICCC (Calbó *et. al.* (2016) [3]). Cert que Catalunya no és les Balears però són territoris prou propers com per considerar que els efectes del canvi climàtic sobre un no seran radicalment diferents als experimentats per l'altre.

A la vista dels resultats que s'han obtingut i la seva validesa, tant pel cas històric com pel futur, s'han de considerar en conjunt. Assumint que la mitjana de la població de valors dels models globals es pot considerar propera a l'entorn del valor més probable, aquests coincideixen en estimar un augment de la temperatura mitjana i de la seva tendència cap a finals de segle per a tots els bimesos i, per tant, un augment de la temperatura anual.

## 7. Bibliografia

- [1] Jansà, A., Homar, V., Romero, R., Alonso, S., Guijarro, J.A. i Ramis, C. 2016. *Extension of summer climatic conditions into spring in the western Mediterranean area*. *Int. J. Climatol.* doi 10.1002/joc.4824.
- [2] Romero, R. i Emanuel, K. 2017. *Climate change and hurricane-like extratropical cyclones: Projections for North-Atlantic polar lows and medicanes based on CMIP5 models*. *J. Climate*, **30**, 279-299.
- [3] Calbó, J., Doblas-Reyes, F., Gonçalves, M., Guemas, V., Barrera, A., Cunillera, J., García-Serrano, J. i Altava, V. 2016. *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Projeccions climàtiques i escenaris futurs (pp 113-133)*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans i Govern de Catalunya.
- [4] Jolliffe, I.T. 2002. *Principal Component Analysis*. New York: Springer.
- [5] Homar, V., Ramis, C., Romero, R. i Alonso, S. 2010. *Recent trends in temperature and precipitation over the Balearic Islands (Spain)*. *Clim. Change*, **98**: 199–211.
- [6] Karnauskas, K. B. i Ummenhofer, C. C. 2014. *On the dynamics of the Hadley circulation and subtropical drying*. *Clim Dyn.* doi 10.1007/s00382-014-2129-1.
- [7] Il·lustració de la cèl·lula de Hadley:  
[https://www.visionlearning.com/img/library/module\\_viewer.php?mid=255&l=&c3=](https://www.visionlearning.com/img/library/module_viewer.php?mid=255&l=&c3=)
- [8] Romero, R., Ramis, C. i Guijarro, J. A. 1999. *Daily rainfall patterns in the Spanish Mediterranean area: An objective classification*. *Int. J. Climatol.*, **19**, 95-112.
- [9] Romero, R., Ramis, C. i Guijarro, J. A. 1999. *Daily rainfall affinity areas in the Mediterranean Spain*. *Int. J. Climatol.*, **19**, 557-578.
- [10] Romero R., Sumner, G., Ramis, C. i Genovés, A. 1999. *A classification of the atmospheric circulation patterns producing significant daily rainfall in the Spanish Mediterranean area*. *Int. J. Climatol.*, **19**, 765-785.