

**VERIFICACIÓ DE PRONÒSTICS DEL MODEL MASS
INCORPORANT DADES DE REANÀLISI NCEP/NCAR
I APLICACIÓ A LA CONSTRUCCIÓ D'UNA
CLIMATOLOGIA REGIONAL**

per

ALEJANDRO GARCÍA COQUE

Editat d'acord amb els requeriments de l'ensenyament de

MÀSTER OFICIAL EN METEOROLOGIA

de la

UNIVERSITAT DE BARCELONA

SUPERVISOR: DR. BERNAT CODINA SÁNCHEZ

SETEMBRE DE 2008

ÍNDIX

Llista de taules.....	3
Llista de figures.....	4
1. Objectius del projecte.....	6
2. Descripció del model MASS.....	7
- Característiques generals	7
- Configuració utilitzada en l'entorn de la península Ibèrica	8
3. Tècniques experimentals	10
- Metodologia de la modelització amb el MASS.....	10
- Metodologia de la verificació operativa.....	11
- Consideracions sobre el mètode aleatori de selecció de dates.....	12
4. Resultats.....	13
- Validació operativa dels pronòstics a 12 hores del MASS	13
- Verificació de la consistència de les simulacions.....	22
- Verificació del realisme de les simulacions	27
5. Aplicació a un estudi climatològic regional.....	31
6. Resum de resultats.....	35
7. Conclusions.....	36
8. Agraïments.....	37
9. Bibliografia.....	38

LLISTA DE TAULES

Taula 1. Valors mitjans dels índexs de validació dels cinc camps estudiats, pels pronòstics vàlids a les 00h	15
Taula 2. Valors mitjans dels índexs de validació dels cinc camps estudiats, pels pronòstics vàlids a les 12h	16
Taula 3. Notació de la classificació d'events entre predicció exitosa, falsa alarma, event omès i absència d'event	20
Taula 4. Estadística de les prediccions d'onades de calor en el període [2001-2007] al Prat de Llobregat	21
Taula 5. Valors mitjans del biaix del MASS respecte la els 56 observatoris peninsulars.	25

LLISTA DE FIGURES

Figura 1: Topografia del model a 15 km de resolució	9
Figura 2: Esbòs de les finestres de modelització del model MASS, a 40 i 15 km de resolució	10
Fig. 3: Classificació de la sèrie de vent simulada pel Prat i comparació amb una distribució de Weibull de paràmetres $c=6.906$, $k=2.385$	12
Fig. 4. <i>Mean Error Index</i> de la pressió a nivell del mar, calculat per cada dia de l'any 2007 i separat per hora de validesa	17
Fig. 5. <i>Root Mean Squared Error Index</i> de la pressió a nivell del mar, calculat per cada dia de l'any 2007 i separat per hora de validesa	17
Fig. 6. Index S1 de la pressió a nivell del mar, calculat per cada dia de l'any 2007 i separat per hora de validesa	18
Fig. 7. <i>Wind Vector Difference</i> , calculat per cada dia de l'any 2007 i separat per hora de validesa	18
Fig. 8. Índex S1 de la temperatura a 850 hPa, calculat per cada dia de l'any 2007 i separat per hora de validesa	19
Figura 9. Imatge GIS on es mostra la localització de l'estació del Prat de Llobregat i els quatre punts de malla més propers	21
Fig. 10. Correlació entre els valors horaris de temperatura modelitzats amb el GFS i els del MASS, corresponents al període [1986-2007]	22
Fig. 11. Correlació entre els valors horaris de vent modelitzats amb el GFS i els del MASS, corresponents al període [1986-2007]	23
Fig. 12. Gràfica comparativa de la velocitat del vent segons les reanàlisis dels models GFS i MASS	23
Fig. 13. Comparativa de les temperatures mitjanes climàtiques modelitzades amb el MASS i les del GFS. El període de mostreig comença a l'any que es veu a l'eix d'ordenades i acaba al 2007	24
Fig. 14. Correlació entre les temperatures mitjanes mensuals modelitzades amb el MASS i les observacions oficials de l'Aemet	25
Fig. 15. Temperatura mitjana anual sobre la península Ibèrica, a l'esquerra dibuixada a partir de la xarxa d'observatoris oficials de l'Aemet, i a la dreta segons la reanàlisis del model MASS a 15 km	26

Fig. 16. Reanàlisi NCEP/NCAR en què s'aprecia l'entrada de vents del nord a la península Ibèrica	27
Fig. 17. Camps d'isobares pronosticats pel MASS per als dies 20 i 21 de març de 2007, localitzant una baixa pressió a sotavent.....	28
Fig. 18. Imatges del satèl·lit NOAA captades els dies 20 i 21 de març de 2007 sobre les 13h UTC	28
Fig. 19. Correlació entre les sortides horàries del MASS i les observacions de vent en un punt del sud de la península	29
Fig. 20. Comparació d'observacions mensuals in situ amb les interpolacions bilineal i multilíneal del MASS sobre el punt en qüestió	30
Fig. 21. Gràfica comparativa entre el vent mitjà mensual modelitzat sobre els anys climàtics tipus de 366 dies i les mitjanes climàtiques de la sèrie completa	31
Fig. 22. Correlació entre els valors de vent mitjà mensual corresponents a l'any tipus (1) i els valors climàtics de la modelització del període [1980-2007]	32
Fig. 23. Correlació entre els valors de vent mitjà mensual corresponents a l'any tipus (2) i els valors climàtics de la modelització del període [1980-2007]	32
Fig. 24. Correlació entre els valors de vent mitjà mensual corresponents al promig dels dos anys tipus i els valors climàtics de la modelització del període [1980-2007]	33
Fig. 25. Gràfica comparativa entre la temperatura mitjana mensual modelitzada sobre els anys climàtics tipus de 366 dies i les mitjanes climàtiques de la sèrie completa	33
Fig. 26. Correlació entre les temperatures mitjanes mensuals corresponents al promig dels dos anys tipus i els valors climàtics de la modelització del període [1980-2007]	34

1. OBJECTIUS DEL PROJECTE

La finalitat del present treball és estudiar la fiabilitat dels pronòstics a 12 hores realitzats pel model meteorològic MASS, en una configuració optimitzada per latituds mitjanes, sobre la regió que engloba la península Ibérica. Amb aquest objectiu, es faran comparacions dels pronòstics del model amb observacions d'estacions meteorològiques, anàlisis dels camps i resultats d'altres models de major escala. Això permetrà quantificar el grau d'exactitud, realisme i consistència dels pronòstics.

L'estudi comença amb l'extracció d'errors mitjans i biaixos per les variables més rellevants en el camp d'aplicació de les presents modelitzacions, que és la reanàlisi regional vinculada al sector de l'energia eòlica. Posteriorment, s'estudiarà la representativitat espacial i temporal dels pronòstics, tot comparant les simulacions amb dades d'observatoris oficials i xarxes d'estacions automàtiques. Per acabar, es farà un apropament als mètodes de validació científica, que determinen el realisme dels processos bàsics simulats partint del coneixement a priori d'aquests i la seva identificació amb observacions disponibles. La metodologia desenvolupada en aquest treball constituirà una referència per validar modelitzacions similars que puguin incorporar-s'hi en el futur.

En funció dels resultats de les validacions, es tractarà de construir una climatologia que serveixi per determinar els valors normals tant en punts concrets com en promig sobre diverses localitzacions. L'interés d'aquesta aplicació, sobretot, se centra en estudis de seguiment (o variabilitat climàtica), tot comparant un període determinat amb la mitjana climàtica.

En les pròximes seccions es descriuen les característiques del model MASS, així com la configuració utilitzada en les simulacions que aquest treball requereix, i la metodologia desenvolupada per portar a terme l'estudi de verificació.

2. EL MODEL MASS

2.1 Característiques generals

El MASS (*Mesoscale Atmospheric Simulation System*) és un model numèric de predicció desenvolupat en els últims 25 anys per Meso Inc. com a eina de recerca, així com una plataforma de generació de productes meteorològics comercials. El MASS simula els fenòmens físics fonamentals que governen l'atmosfera, incloent-hi la conservació de la massa, la quantitat de moviment i l'energia (els principis bàsics de la dinàmica i termodinàmica clàssiques). També posseeix un mòdul d'energia cinètica turbulenta que té en consideració la viscositat i l'estabilitat tèrmica del cisallament del vent. Com a model dinàmic, el MASS simula l'evolució de les condicions atmosfèriques en passos de temps de l'ordre de pocs segons. Això genera una fort demanda de recursos computacionals, especialment quan es treballa a resolucions molt elevades.

A continuació es llisten les principals característiques del model MASS:

- Configurable en qualsevol regió del planeta.
- Configurable en tres projeccions (estereogràfica polar, Lambert o Mercator).
- Resolució variable per les diferents dades de característiques de la superfície com el relleu, usos del sòl, índex de vegetació, albedo, o la densitat de vegetació.
- Capacitat interactiva de múltiples niuaments.
- Té la capacitat de simple o múltiple interacció.
- Múltiple interacció: niuaments múltiples en zones diferents de la simulació mare. El domini niuat pot començar i acabar en qualsevol instant de la simulació.
- Les dades de topografia de les simulacions niuades són introduïdes en el moment d'executar la simulació niada.
- El model pot ser configurat per ser executat des d'escala global fins escala de núvol.
- Preparat per assimilar observacions reals.
- Pot acoblar-se a models globals i d'altres models d'àrea limitada.
- Utilitza la sortida d'altres models com a condicions inicials, o condicions de contorn (per exemple les anàlisis del NCEP i ECMWF i les reanàlisis de NCEP/NCAR, ECMWF).
- Opció d'executar el model de forma hidrostàtica o no-hidrostàtica.
- Possibilitat d'escollir entre diferents parametritzacions físiques.
- Possibilitat d'assimilació 4DVAR a través de la tècnica del nudging.
- Pot executar-se en diferents plataformes: Cray, SGI, IBM, DEC, Sun, HP, Linux-PCs.
- Format de les sortides completament configurable: formats ASCII, GRIB.

El model MASS utilitza diferents tipus de bases de dades globals, geofísiques i meteorològiques. Les principals fonts de dades són dades de reanàlisi, radiosondatges, dades de superfície i característiques dels usos del sòl. La base de dades de reanàlisi –la més important– està constituïda per dades meteorològiques històriques, referides a una xarxa tridimensional, generades pel *US National Center for Environmental Prediction* (NCEP) i el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Aquestes dades permeten obtenir una instantània de les condicions meteorològiques en tot el planeta a diferents alçades i a intervals de 6 hores. Combinant les dades de radiosondatge, superfície y reanàlisi, s'estableixen les condicions inicials, així com les condicions de contorn actualitzades per les simulacions del model MASS. El mateix model determina l'evolució de les condicions atmosfèriques. Com

que les dades de reanàlisi tenen poc detall, el MASS s'executa per tota una sèrie de simulacions niuades succesives, utilitzant com a entrada en cadascuna les dades de sortida de la simulació precedent, fins arribar al nivell de detall desitjat.

Les bases de dades geofísiques d'entrada que s'utilitzen són, principalment, l'elevació i usos del sòl, índex de vegetació i valors climatològics de la temperatura de l'aigua del mar. Les dades d'elevació generalment utilitzades en les diverses aplicacions del MASS són les generades pel *US Geological Survey*, compilades en un model d'elevació digital del terreny (DEM). El *US Geological Survey*, la Universitat de Nebraska i la Comissió Europea han generat dades globals del terreny en un projecte comú. Les classificacions dels diferents usos del sòl deriven de la interpretació de les dades del *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) –les mateixes que s'utilitzen per calcular l'índex de vegetació (NDVI). El model transforma la cobertura del sòl i l'índex de vegetació en paràmetres físics, tals com la rugositat del terreny, l'albedo i la emissivitat. La resolució nominal d'aquestes dades és de 250 m.

El MASS simula les condicions atmosfèriques per cada dia d'un període de 28 anys. Cada simulació genera el vent i d'altres variables meteorològiques (com poden ser la temperatura, la pressió, la humitat, l'energia cinètica turbulenta o el flux de calor) en tres dimensions en el domini d'integració, i la informació es guarda en sortides horàries. Els mapes derivats d'aquestes sortides es comparen amb anàlisis del propi model i observacions realitzades en estacions oficials o torres meteorològiques sobre la superfície terrestre o sobre el mar, per tal de portar a terme la verificació del model. En cas d'observar-se discrepàncies significatives, es poden realitzar ajustos a posteriori.

2.2 Configuració utilitzada en l'entorn de la península Ibèrica

Com s'ha vist, el model MASS, en analogia amb qualsevol altra eina de predicció numèrica del temps, té un ampli ventall d'opcions d'assimilació de dades, acoblament amb altres models, disseny de les malles, escala de simulació i parametritzacions. Segons les característiques geogràfiques i climatològiques de la regió d'aplicació, existeixen configuracions més apropiades que d'altres per simular-hi les condicions atmosfèriques. En l'entorn de la península Ibèrica, el MASS s'ha executat amb la següent configuració:

- Compliment de l'equació hidrostàtica.
- Projectió estereogràfica polar.
- Parametritzacions:
 - *Kain-Fritsch* per la convecció.
 - *TKE* per la capa límit.
 - *Microfísica de núvols*: fase mixta sense calamarsa.
 - *Esquema de radiació*: calcula cobertura de núvols mitjançant la humitat relativa.
- Introducció de condicions de contorn cada 6 hores.
- Niuament de la malla amb 15 km de resolució en l'interior d'una malla de 40 km de resolució, que fa d'intermediària amb les dades meteorològiques i les reanàlisis NCEP/NCAR del model global amb resolució de 2.5 graus d'arc. L'elecció d'aquesta resolució busca l'equilibri entre la representativitat topogràfica de les simulacions i el cost de realitzar-les amb una resolució major.

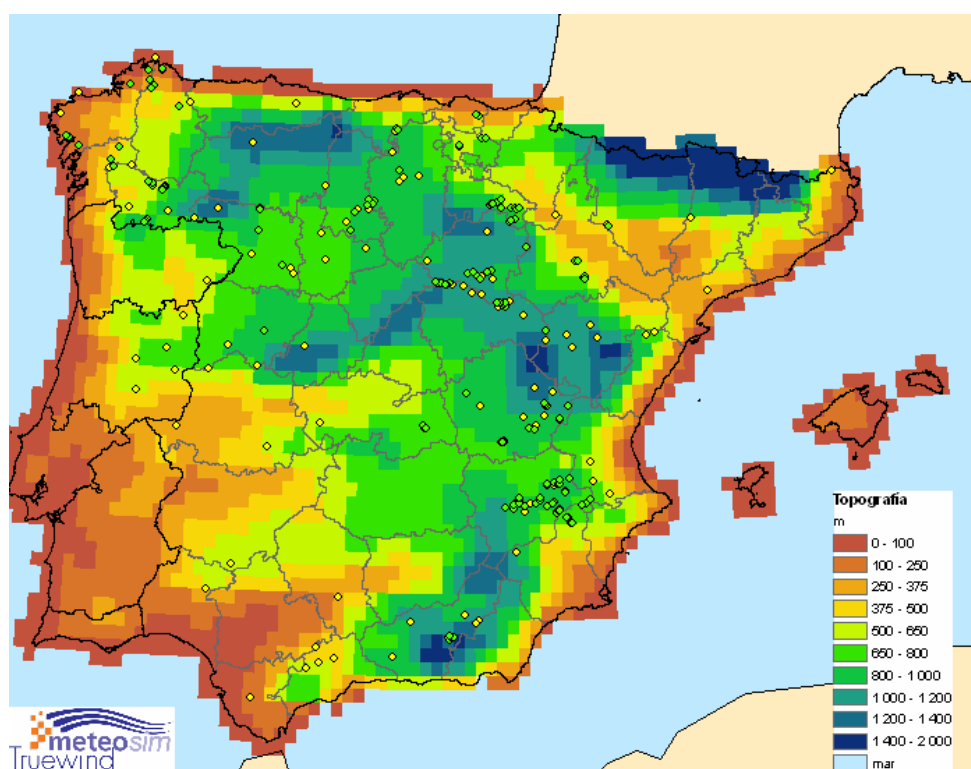


Fig. 1: Topografia del model a 15 km de resolució.

3. TÈCNiques I PROCEDIMENTS EXPERIMENTALS

3.1 Metodologia de la modelització amb el MASS

L'objecte de verificació és el model meteorològic MASS, amb la configuració descrita anteriorment. El model es va inicialitzar amb les dades de reanàlisi del model global GFS, procedents del *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) i el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Per cadascuna de les simulacions, es van utilitzar les observacions de superfície (radiosondatges, Synops, Metars i dades de boies marítimes). Les dades del model global també es van introduir, amb una freqüència de 6 hores, com a condicions de contorn al llarg de la modelització. La durada total de cadascuna de les simulacions individuals és de 12 hores, i la sèrie de modelitzacions del període complet inclou un *cold start* el primer dia de cada mes.

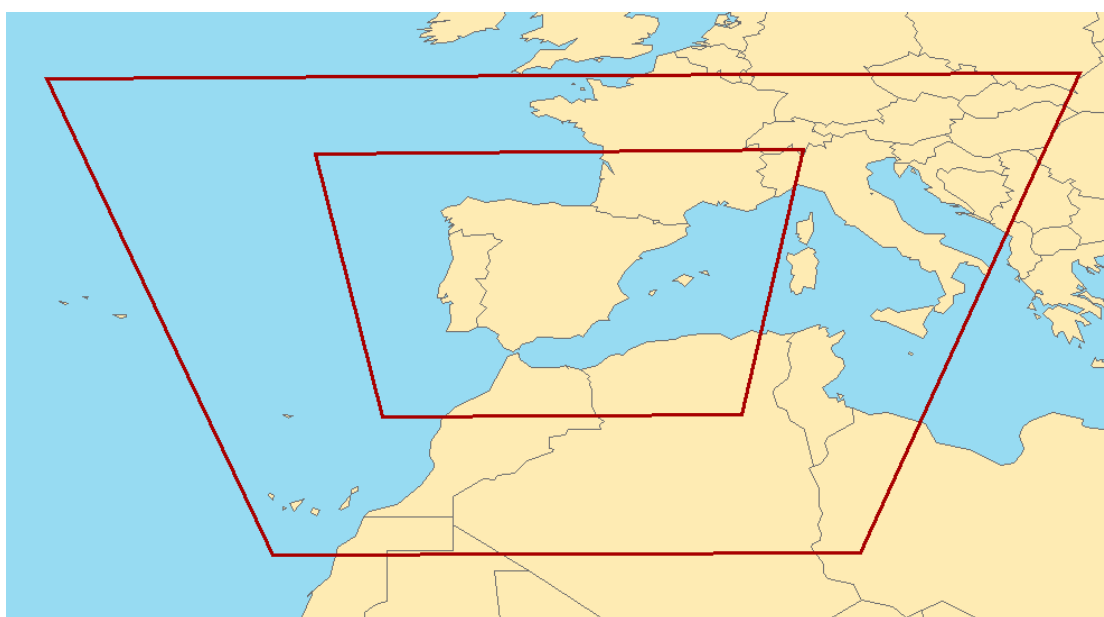


Fig. 2: Esbòs de les finestres de modelització del model MASS, a 40 i 15 km de resolució.

Per portar a terme una verificació que caracteritzi adequadament els pronòstics del model MASS en el context de la península Ibèrica, cal que les dades a estudiar compleixin una sèrie de condicions relacionades amb l'estadística i la climatologia:

- Condició de representativitat estadística, la qual cosa s'aconsegueix estudiant una mostra suficientment gran per poder tractar-la com una població.
- Homogeneïtat estadística, és a dir, la similitud entre els valors que prenen les variables meteorològiques dins la regió d'estudi.
- Representativitat meteorològica: la validació ha de contenir una mostra, idealment nombrosa, de situacions sinòptiques i mesoescalars que es puguin donar en la regió d'aplicació.

Amb l'objectiu d'acomplir aquestes condicions, tot tenint en compte la limitació del temps de càlcul i espai d'emmagatzematge de dades, es van modelitzar tres conjunts de dades diferents:

- Inicialment, es van realitzar simulacions per cada dia de l'any 2007. Això va requerir un total de 526 hores de simulació, que es van distribuir en 24 nodes de càlcul tot tenint en compte la interdependència entre les simulacions de 12 hores. Gràcies al repartiment de la modelització entre les múltiples màquines, els 250 GB de dades que en un principi s'haurien de generar en 22 dies van estar disponibles en poc menys de 24 hores.
- Posteriorment, per poder portar a terme els estudis climatològics d'aquest treball, i així estendre els resultats a un període més llarg, es van simular dos anys climàtics tipus amb dies escollits segons un esquema aleatori dins el període [1980-2006]. Aquesta modelització va generar 0.5 TB de dades i va requerir prop de 1100 hores de CPU.
- Per acabar, i amb la finalitat de quantificar l'exactitud i representativitat dels anys tipus, es va modelitzar el període complet [1980-2006], en total 27 anys de simulació que van requerir una capacitat d'emmagatzematge de 7 TB i una capacitat de càlcul per sobre de les 14000 hores de CPU. Utilitzant 56 nodes de simulació, aquest procés que un principi requeriria prop de dos anys per completar-se es va realitzar en poc més de dues setmanes.

3.2 Metodologia de la verificació operativa

Per a l'estudi de precisió del model, s'ha utilitzat el primer dels conjunts de dades explicitats anteriorment, que és la modelització de l'any 2007. Sobre els resultats d'aquestes simulacions, s'esextrauran diversos índexs de verificació sobre múltiples camps que representen variables contínues en el domini de la península Ibèrica. Això suposa una mostra de 12342 punts de malla per 730 prediccions, ja que es van programar anàlisis dels camps utilitzant les observacions disponibles cada 12 hores. En total, el número de dades és aproximadament 10^7 , una mostra molt gran que podria aproximar-se a una població estadística.

Quant a la homogeneïtat estadística de les dades, està en funció de la varietat climàtica dins la regió d'estudi. Tot i que tenim diversos climes a la península Ibèrica, tota l'àrea modelitzada pertany a la zona temperada de latituds mitjanes, la qual cosa representa un cert grau d'homogeneïtat, però també limita l'aplicabilitat dels resultats obtinguts a regions de característiques similars.

Per complir la condició de representativitat meteorològica, el fet de disposar de l'any 2007 complet permet verificar pronòstics per situacions sinòptiques i/o mesoescalars de qualsevol estació de l'any. Idealment, modelitzar un gran número d'anys donaria una mostra més gran i per tant més bona que permetria realitzar una validació climàticament fiable, però també s'ha de tenir en compte el temps de càlcul i la dificultat d'emmagatzemar grans quantitats de dades.

La validació operativa conté una comparació a nivell climatològic amb dades d'observatoris en superfície. Els anys climàtics *tipus* inicialment modelitzats pretenen donar una primera aproximació de les característiques climàtiques de la regió d'estudi. Aquesta modelització és especialment interessant perquè permet obtenir una climatologia i a la vegada estalviar el cost de simular llargs períodes de temps, però té l'inconvenient que la sèrie d'hores modelitzades no és suficientment llarga per assegurar la representativitat climatològica dels punts de malla individuals. Per això, en aquest treball es comparen els anys *tipus* amb la sèrie dels 28 anys

complets, no tan sols en punts concrets sinó també a nivell general per tota la península, la qual cosa permetrà quantificar el nivell de fiabilitat d'aquesta modelització.

La comparació entre els dos tipus de sèries climàtiques és un punt clau per determinar els marges de confiança d'un any *tipus*. En el present estudi, es comparen resultats mensuals i anuals d'aquestes modelitzacions amb estacions oficials de superfície, i també, donat l'interès industrial de les simulacions, amb observacions sobre parcs eòlics peninsulars en funcionament o en projecte.

Com a prova de la representativitat estadística de les sèries de 28 anys, i sabent que una sèrie de dades horàries de vent tendeix per períodes llargs a la distribució de Weibull, es va ajustar aquesta funció a la sèrie modelitzada per un punt, concretament el Prat de Llobregat. L'acord entre les dues corbes, representades a la figura següent, dona un coeficient de correlació $R=0.996$, que confirma la representativitat estadística de la modelització realitzada. En la gràfica, els valors de l'eix d'ordenades corresponen al límit superior de velocitat del vent a la classe corresponent.

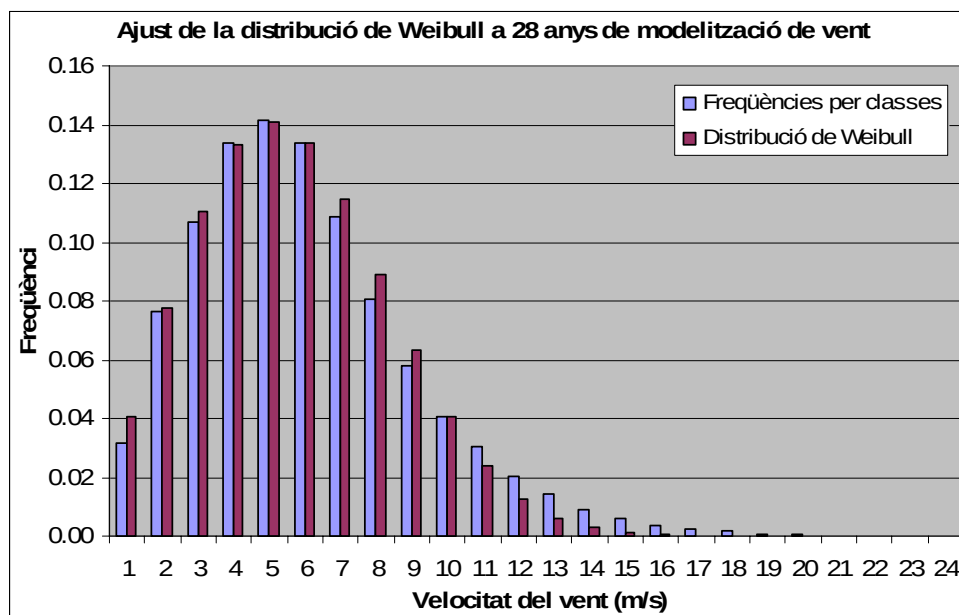


Fig. 3: Classificació de la sèrie de vent simulada pel Prat i comparació amb una distribució de Weibull de paràmetres $c=6.906$, $k=2.385$.

3.3 Consideracions sobre el mètode aleatori de selecció de dates

Per construir l'any climàtic *tipus*, s'ha utilitzat un dels mètodes que fan servir els generadors aleatoris de les llibreries matemàtiques dels programes informàtics. Aquests generadors, que no són recomanables per aplicacions criptogràfiques però encara són satisfactoris pels requisits del present estudi climatològic, generen una sèrie aleatòria amb període de repetició llarg (aproximadament 10^6) a partir d'un número *llavor* inicial.

La fórmula general és $x_{i+1} = \text{Ent}((ax_i + b)/m)$, on a i m són números molt grans que, junt amb b , han de complir una sèrie de condicions de divisibilitat.

4. RESULTATS

4.1 Validació operativa dels pronòstics a dotze hores del model MASS

Variables contínues

En aquest apartat, es presenta la validació de cinc de les variables més interessants des del punt de vista operatiu. Aquestes són la pressió, la temperatura a tres nivells, i el vent a 70 m d'alçada. Pel fet de ser variables contínues, els criteris de verificació més comuns, que seguidament s'apliquen en aquesta primera secció, estan relacionats amb els moments estadístics de primer i segon ordre.

A causa de la no-linealitat dels sistemes meteorològics i les diferències en l'habilitat del model segons l'estat de l'atmosfera, esperem que tots els índexs de validació fluctuin amb certa aleatorietat al voltant d'un valor mitjà. Per aquesta raó, cada validació semidiurna es realitza sobre una mostra gran, formada per 12342 punts de malla sobre els quals es treu un valor mig. Els promitjos dels 732 valors calculats per aquest mètode donaran els valors finals, que són els que es presenten en taules i acceptem com a característics del model.

Una quantitat molt rellevant que s'ha de tractar de quantificar és el biaix del model. En altres paraules, la sobreestimació o subestimació de les variables que es pronostiquen respecte els valors reals, observats o quantificats. Aquesta diferència es pot determinar mitjançant el moment de primer ordre. A tal efecte, s'ha calculat l'error mitjà (*ME*, *Mean Error*) dels camps de totes les variables, que dona directament la mitjana de les diferències entre pronòstic i observació:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - o_i)$$

L'arrel de l'error quadràtic mitjà (*RMSE*) és un dels índexs més extensament utilitzats, donat que qualsevol diferència compta independentment del signe i és una mesura molt sensible a errors grans en punts concrets. Es calcula en funció del moment de segon ordre:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - o_i)^2}$$

L'índex *S1*, introduït per S. Teweles i H.B. Wobus (1954), mesura l'analogia entre l'anàlisi del camp pronosticat i l'observat. Es calcula a partir dels gradients observats entre cada parell de nodes contigus, tant en la direcció *i* com en la direcció *j*. Es defineix de tal manera que pot oscil·lar entre 0 i 100, indicant millor acord mentre més baix. Típicament, un índex *S1* de 70 és molt dolent, mentre que un valor de 20 equival a la diferència entre l'anàlisi del mateix camp realitzat a mà alçada per dos analistes professionals diferents.

$$S1 = 100 \frac{\sum_{i=1}^N |\Delta x_i - \Delta o_i|}{\sum_{i=1}^N \max\{|\Delta x_i|, |\Delta o_i|\}}$$

Una combinació dels dos índexs anteriors, que incorpora a més el valor mitjà dels camps, és l'*IOA* (Index of Agreement). L'*IOA* mesura el grau de semblança entre el mapa corresponent a la predicció i l'anàlisi objectiva del mapa segons les observacions reals. Es calcula segons l'expressió següent:

$$IOA = 1 - \frac{N(RMSE)^2}{\sum_{i=1}^N (|x_i - \bar{x}| + |o_i - \bar{o}|)^2}$$

I finalment, en el cas del vent, aquest estudi fa ús del *WVD* (*Wind Vector Difference*), que té en compte l'acord predicció – observació per les dues components (u, v) del vent er separat, i és per tant una mesura més sensible que els índexs anteriors, calculats sobre el mòdul del vector vent:

$$WVD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(u_i - o_i)^2 + (v_i - p_i)^2}$$

En el càlcul dels índexs anteriors, es fa una distinció entre les prediccions vàlides per les 00 UTC i les 12 UTC, degut al diferent comportament observat en els pronòstics segons l'hora de validesa. També es va observar una anomalia que donava valors notablement dolents per la majoria d'índexs el primer dia de cada mes. Això té el seu origen a la inicialització del model, que té lloc exactament el primer dia de cada mes, i comportava un destacable desacord entre pronòstic i anàlisi. Donada a seva naturalesa aliena al propi funcionament del model, aquestes dades es van eliminar.

A les taules de les pàgines següents, es presenten els valors mitjans, màxims, mínims i percentils de totes aquestes mesures de validació, cadascun dels quals representa una mostra de $12342 \cdot 365 \approx 5 \cdot 10^6$ mesures individuals.

La comparació entre els diferents nivells de temperatura posa de manifest com els intercanvis de calor a la superfície dificulten la precisió dels pronòstics, ja que estem obtenint els màxims valors de *RMSE* i també les majors variàncies en el aquest nivell. Així, la temperatura a 2 m d'alçada registra un error quadràtic mitjà al voltant de 1.2 °C a qualsevol de les hores estudiades, mentre que aquest error es redueix a 0.7 °C en el nivell de 850 hPa, i a 0.5 °C en els nivells superiors. Aquest resultat indica que les previsions de temperatura en superfície són més exactes que altres estudis similars que utilitzen models de mesoescala (*Zhong i Fast, 2003*, 1.41 per RAMS i MesoEta, 1.57 per MM5)

També s'observen biaixos (*ME*) molt semblants entre els tres nivells bàrics, que difereixen dels valors calculats en superfície: a les 00h UTC, tenim un *ME* proper a -0.25 °C en tots els nivells excepte a 2 m, on s'ha determinat un biaix de -0.5°C; i a les 12h UTC, els nivells bàrics tenen un biaix d'uns -0.15 °C, que difereix clarament dels +0.8°C en superfície.

Un altre resultat important en la validació del MASS és que tendeix a sobreestimar la pressió atmosfèrica durant la nit i a subestimar-la durant el dia. L'anàlisi del *RMSE* i el *S1* indica que els pronòstics de pressió són generalment més acurats a la nit que en les hores centrals del dia. Aquesta és l'única variable en què s'observa tal diferència en funció de l'hora del dia, ja que en el cas de la temperatura en superfície el *S1* sembla indicar un millor acord durant el dia, però l'error mitjà donat pel *RMSE* és molt similar a totes dues hores.

		Pronòstics vàlids per les 00h UTC					
		Mitjana	Variança	Percentil 30	Mínim	Màxim	Percentil 70
Pressió en superfície	ME	0.524	0.551	0.240	-1.134	1.920	0.849
	RMSE	0.993	0.297	0.811	0.380	1.926	1.116
	IOA	0.971	0.026	0.965	0.831	0.999	0.988
	S1	30.984	6.955	27.219	13.930	50.939	34.633
Temperatura 2 m	ME	-0.487	0.525	-0.797	-1.971	1.230	-0.220
	RMSE	1.150	0.318	0.934	0.520	2.111	1.290
	IOA	0.976	0.018	0.973	0.890	0.997	0.986
	S1	37.391	7.843	33.554	17.895	56.927	40.698
Temperatura 850 hPa	ME	-0.249	0.395	-0.443	-1.326	0.848	-0.057
	RMSE	0.678	0.227	0.529	0.245	1.384	0.786
	IOA	0.986	0.015	0.985	0.862	0.999	0.995
	S1	32.157	6.561	27.841	19.987	53.707	34.731
Temperatura 700 hPa	ME	-0.248	0.333	-0.411	-1.277	0.669	-0.040
	RMSE	0.535	0.203	0.407	0.140	1.337	0.631
	IOA	0.987	0.014	0.986	0.914	1.000	0.995
	S1	31.498	5.679	28.283	19.745	48.897	33.521
Temperatura 500 hPa	ME	-0.270	0.348	-0.454	-1.429	0.716	-0.090
	RMSE	0.531	0.223	0.407	0.115	1.431	0.605
	IOA	0.977	0.028	0.976	0.832	0.999	0.993
	S1	29.194	7.543	24.306	16.405	55.363	31.977
Vent 70 m	ME	0.416	0.450	0.159	-0.858	2.894	0.580
	RMSE	1.145	0.383	0.898	0.466	3.193	1.317
	WVD	1.789	0.570	1.410	0.776	4.764	2.035
	S1	30.217	6.912	26.289	15.605	53.112	33.411
Humitat Rel. Supf-500hPa	ME	0.559	2.780	-0.855	-7.500	10.480	1.782
	RMSE	4.340	1.475	3.396	1.520	10.623	4.943
	IOA	0.974	0.020	0.968	0.874	0.998	0.986
	S1	26.484	3.969	24.327	15.379	42.570	28.367

Taula 1. Valors mitjans dels índexs de validació dels cinc camps estudiats, pels pronòstics vàlids a les 00h.

		Pronòstics vàlids per les 12h UTC					
		Mitjana	Variança	Percentil 30	Mínim	Màxim	Percentil 70
Pressió en superfície	ME	-0.906	0.595	-1.203	-2.744	0.786	-0.618
	RMSE	1.272	0.377	1.041	0.500	2.744	1.428
	IOA	0.962	0.036	0.957	0.733	0.999	0.981
	S1	34.660	5.111	32.727	17.292	54.310	37.231
Temperatura 2 m	ME	0.807	0.577	0.498	-0.834	2.397	1.113
	RMSE	1.185	0.439	0.895	0.207	2.608	1.368
	IOA	0.972	0.024	0.967	0.872	0.999	0.987
	S1	29.712	7.266	25.409	11.432	52.937	32.863
Temperatura 850 hPa	ME	-0.199	0.434	-0.430	-1.583	1.122	0.018
	RMSE	0.704	0.240	0.550	0.108	1.658	0.792
	IOA	0.984	0.020	0.984	0.808	0.999	0.994
	S1	29.874	7.419	25.154	17.624	56.174	32.333
Temperatura 700 hPa	ME	-0.126	0.372	-0.324	-1.211	0.914	0.051
	RMSE	0.540	0.186	0.426	0.113	1.277	0.622
	IOA	0.985	0.017	0.983	0.873	0.999	0.995
	S1	32.402	5.876	28.793	18.627	58.227	34.762
Temperatura 500 hPa	ME	-0.175	0.398	-0.382	-1.439	1.347	0.016
	RMSE	0.561	0.243	0.407	0.176	1.824	0.637
	IOA	0.972	0.035	0.972	0.772	1.000	0.992
	S1	31.027	8.746	25.916	14.992	65.276	33.834
Vent 70 m	ME	0.129	0.494	-0.081	-1.647	2.139	0.339
	RMSE	1.070	0.386	0.854	0.048	2.646	1.220
	WVD	1.697	0.568	1.376	0.064	3.872	1.920
	S1	29.842	7.390	25.219	2.949	53.061	33.359
Humitat Rel. Supf-500hPa	ME	1.512	2.792	0.117	-8.010	11.559	2.804
	RMSE	4.636	1.599	3.676	0.181	12.206	5.063
	IOA	0.974	0.022	0.973	0.827	1.000	0.986
	S1	24.191	4.392	22.021	1.928	41.001	26.092

Taula 2. Valors mitjans dels índexs de validació dels cinc camps estudiats, pels pronòstics vàlids a les 12h.

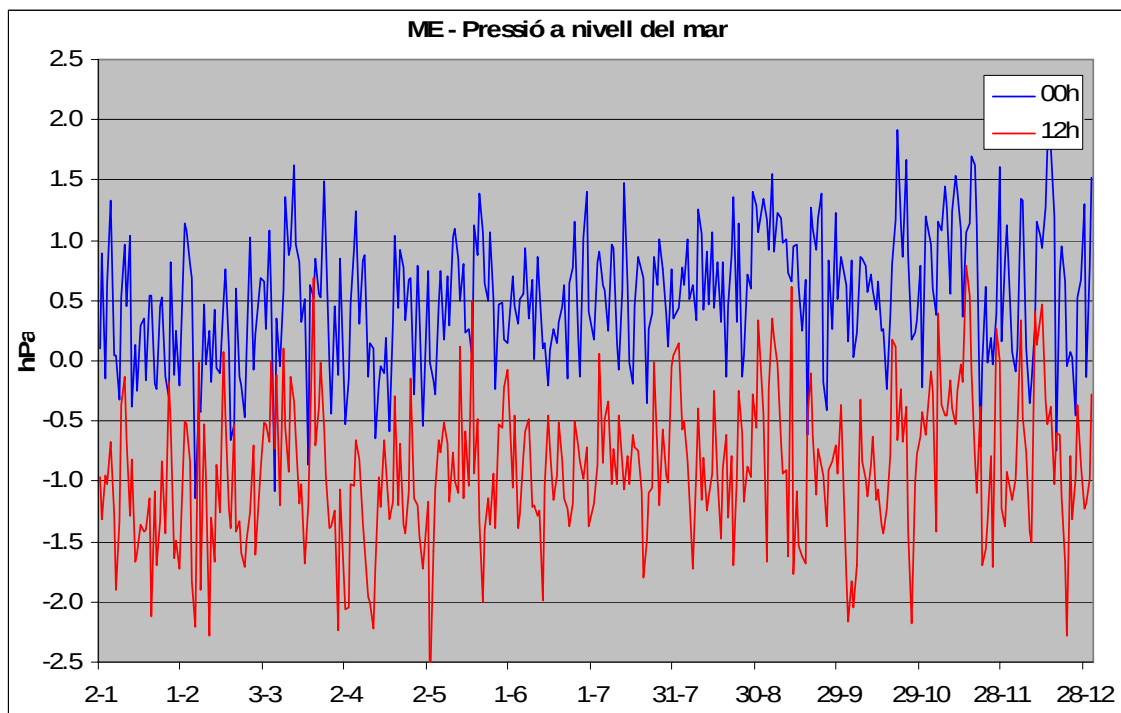


Fig. 4. Mean Error Index de la pressió a nivell del mar, calculat per cada dia de l'any 2007 i separat per hora de validesa.

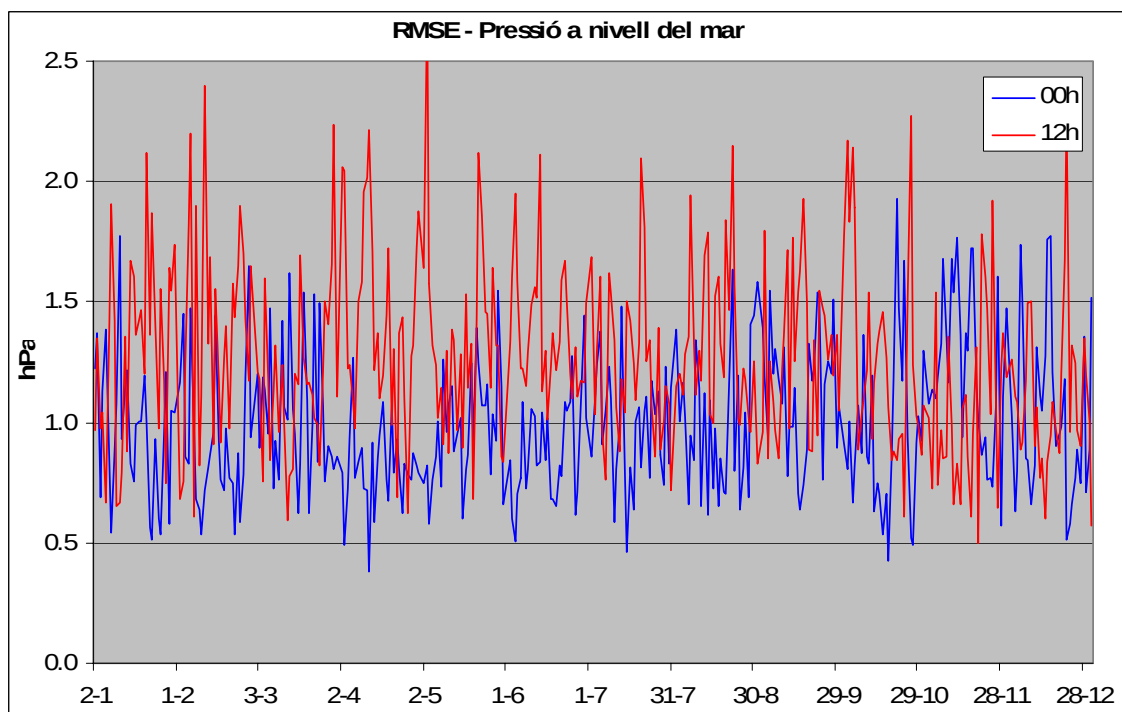


Fig. 5. Root Mean Squared Error Index de la pressió a nivell del mar, calculat per cada dia de l'any 2007 i separat per hora de validesa.

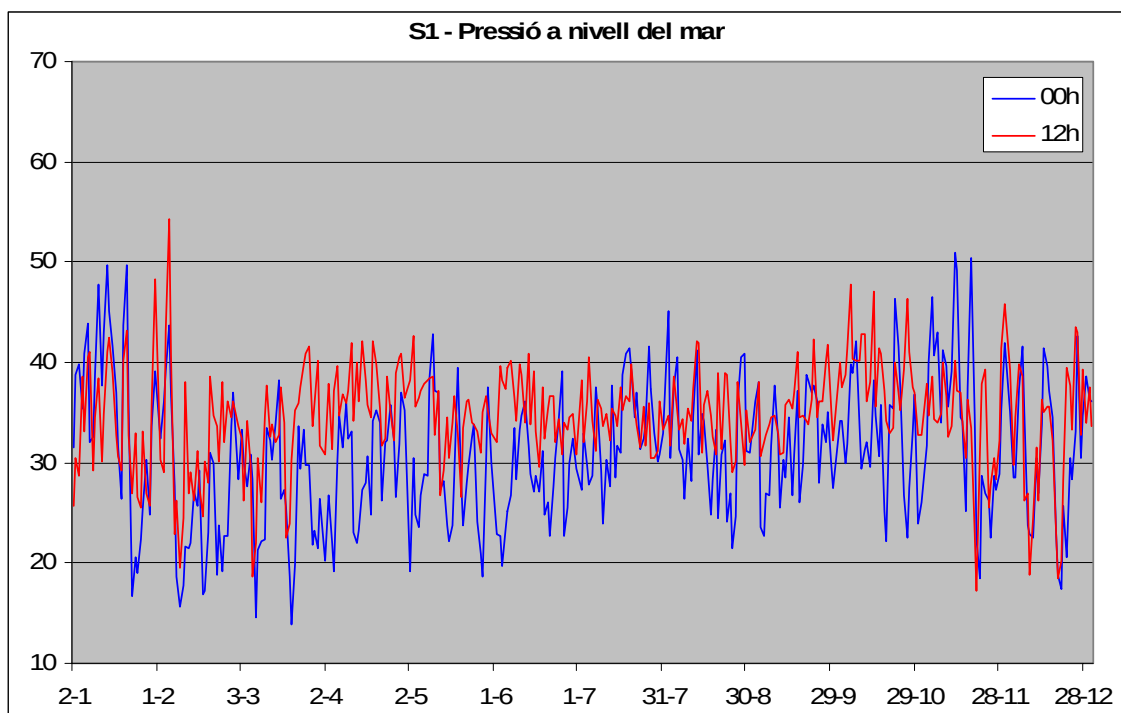


Fig. 6. Index S1 de la pressió a nivell del mar, calculat per cada dia de l'any 2007 i separat per hora de validesa.

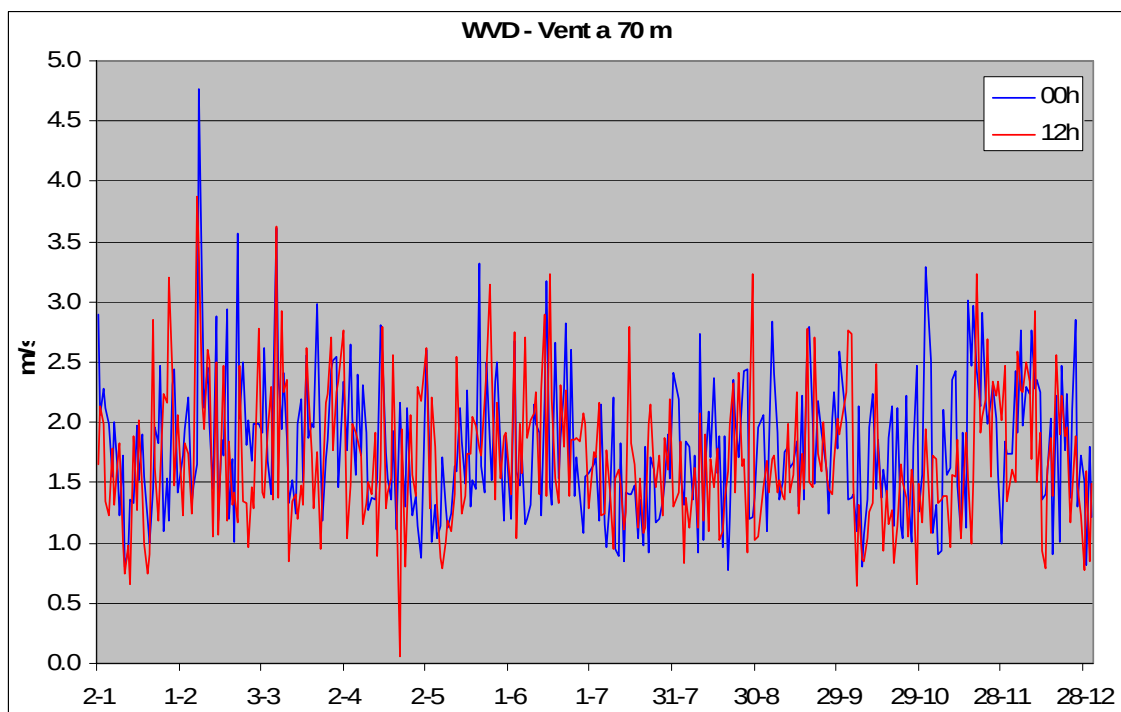


Fig. 7. Wind Vector Difference, calculat per cada dia de l'any 2007 i separat per hora de validesa.

L'índex WVD calculat per al camp de vent dona un satisfactori valor de 1.74 en promig, per sota de l'error del vector vent aconseguit per *Pérez-Landa i Palau* (2.18).

Quant a oscil·lacions anuals, no se n'observen en cap de les variables estudiades, tret de la temperatura a 850 hPa, que registra valors de S1 clarament més grans durant els mesos d'hivern, així com una major variabilitat en aquest període, probablement a causa de la presència del front polar.

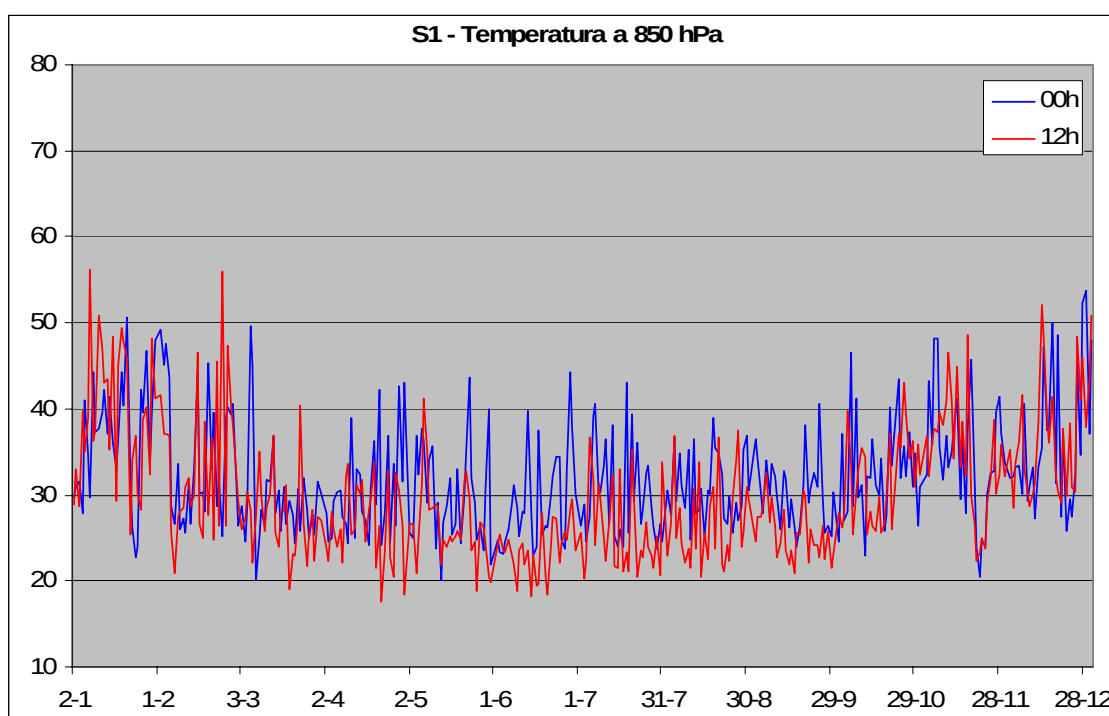


Fig. 8. Índex S1 de la temperatura a 850 hPa, calculat per cada dia de l'any 2007 i separat per hora de validesa.

Events binaris

Certs fenòmens meteorològics, com ara inundacions, glaçades, boires o onades de calor, poden ser estudiats com a events binaris, en què la importància dels pronòstics se centra en predir la seva ocurrència o no-ocurrència, per tal de donar les alertes pertinents.

Un índex interessant per quantificar aquest tipus de pronòstics és el PSS (Peirce's Skill Score), definit com la proporció d'events exitosament pronosticats (Hit rate, H) menys la proporció de falses alarmes (False alarm rate, F). Aquestes quantitats es poden reformular en funció de la classificació d'events donada en la taula més avall:

$$PSS = H - F = \frac{a}{a + c} - \frac{b}{b + d} = \frac{ad - bc}{(a + c)(b + d)}$$

MODEL	OBSERVACIÓ	
	Event SÍ	Event NO
Event SÍ	a	b
Event NO	c	d

Taula 3. Notació de la classificació d'events entre predicció exitosa, falsa alarma, event omès i absència d'event.

En el present estudi, el model està configurat per fer reanàlisi, per tant incorpora dades reals de *Sea Surface Temperature* (SST) i de reanàlisi de models globals. Això és una avantatge respecte les prediccions operatives, les que realment serveixen per donar les alertes i s'inicialitzen en temps present, que només tenen la possibilitat d'incorporar les observacions d'unes hores abans, dades de l'última sortida dels models, i dades climatològiques per substituir per exemple les SST.

De tota manera, és convenient estudiar el comportament del MASS en aquestes situacions extremes, amb la finalitat de testar la capacitat del model per predir-les o almenys reproduir-les. Amb aquest propòsit, s'han estudiat les onades de calor del període [2001-2007] al Prat de Llobregat, prenent com a umbral un valor relacionat amb les alertes operatives: el percentil 98 de les temperatures màximes registrades en els anys [1980-2000], que és $T_{MM} = 27.1$ °C.

La comparació amb les observacions s'ha realitzat amb l'històric de dades de l'estació meteorològica, tot definint l'umbral de l'estació amb el percentil 98 de les màximes observades en els mateixos 21 anys, $T_{MO} = 29.9$ °C. Una dificultat afegida és l'absència de metadades, ja que probablement hi ha hagut alguna modificació en l'instrumental que no està documentada.

Així, la reconstrucció dels últims set estius ha permès comparar els dies de calor extrem segons model i observacions, i per tant quantificar els dies de predicció exitosa, les falses alarmes, i els dies de calor omesos pel MASS.

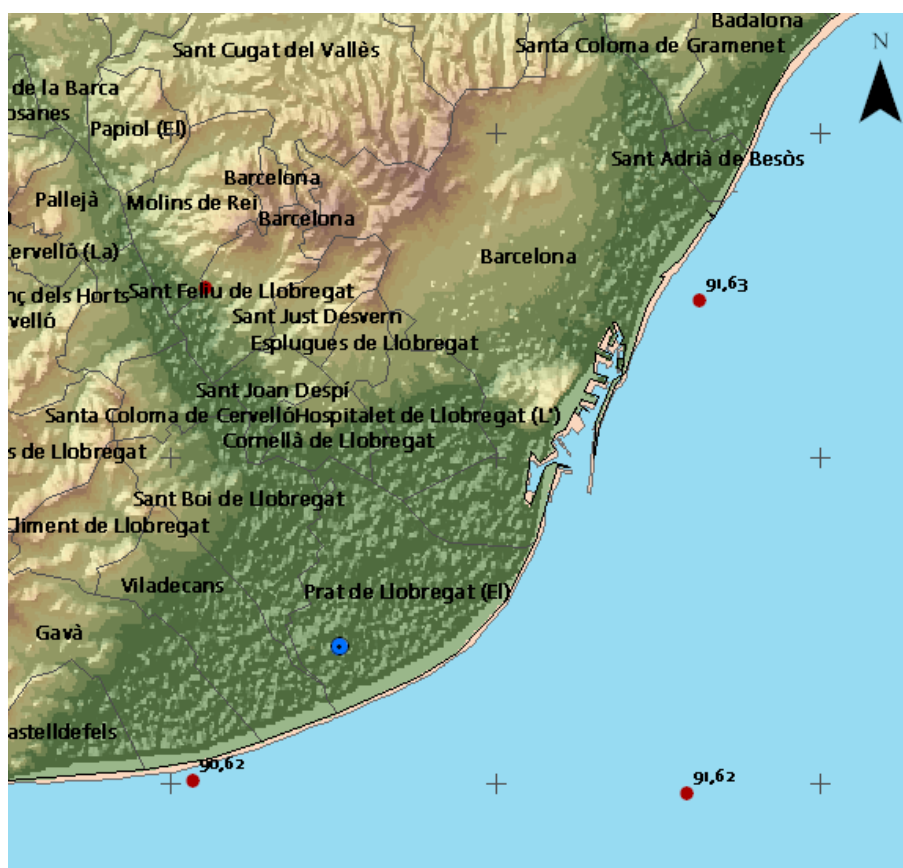


Figura 9. Imatge GIS on es mostra la localització de l'estació del Prat de Llobregat i els quatre punts de malla més propers. La separació entre els punts de malla és d'uns 15 km.

Cal destacar que en el cas de l'any 2003, que va ser el més afectat per cops de calor, el percentatge d'encert és el més alt de tota la sèrie ($H=0.80$), mentre que les més escasses onades de calor de l'any 2002 ó 2005 van passar desapercebudes per al model. En això, com que és un reanàlisi, hi té molt a veure la temperatura del mar, una dada de satèl·lit que no hi seria en el cas de prediccions per les immediates hores, obligant a utilitzar les dades climàtiques. Aquesta és, sembla ser, una de les principals diferències que hi trobaríem en cas que haguéssim de fer la previsió operativa, i que afectaria l'habilitat del model.

	Pronosticats amb èxit (a)	Falses alarmes (b)	No pronosticats (c)	Sense onada de calor (d)
2001	2	1	0	363
2002	0	0	1	364
2003	37	0	9	319
2004	6	0	10	349
2005	0	0	8	357
2006	5	7	5	355
2007	2	1	8	355
TOTAL	52	9	41	2462

Taula 4. Estadística de les prediccions d'onades de calor en el període [2001-2007] al Prat de Llobregat.

El càlcul de l'índex de Peirce dona $PSS=0.56$, que indica una bastant bona qualitat del model davant les onades de calor del període [2001-2007] en aquest punt en concret.

4.2 Verificació de la consistència de les simulacions

Comparació del MASS amb el model GFS

Una altra manera de validar els resultats del MASS és comparar-lo amb un model d'escala major. Aquí, s'ha escollit el model global GFS, ja que és el model d'on s'incorporen les dades de reanàlisi cap a la malla de menor resolució del MASS. Contrastant els resultats dels diferents models, es veu l'aportació d'ampliar la resolució des dels 2.5 graus d'arc del GFS fins a 15 km, i a la vegada es pot estudiar la consistència de les simulacions amb les pautes generals donades pel model global.

En aquesta secció, s'han seleccionat les sortides del MASS a 15 km (*Regional Reanalysis Series*, RRS) cada 6 hores per comparar-les amb les sèries 6-horàries del GFS (*Global Reanalysis Series*, GRS). Les correlacions en pressió, temperatura i vent són els indicadors que s'utilitzaran per quantificar l'acord entre les dues modelitzacions i identificar què aporten les simulacions regionals a 15 km.

S'han realitzat comparacions en punts concrets de la península Ibèrica, per períodes que varien entre un i 28 anys. D'aquests, es mostren els resultats d'un punt d'Andalucía, d'on es van extreure sèries de 22 anys, concretament el període [1986-2007].

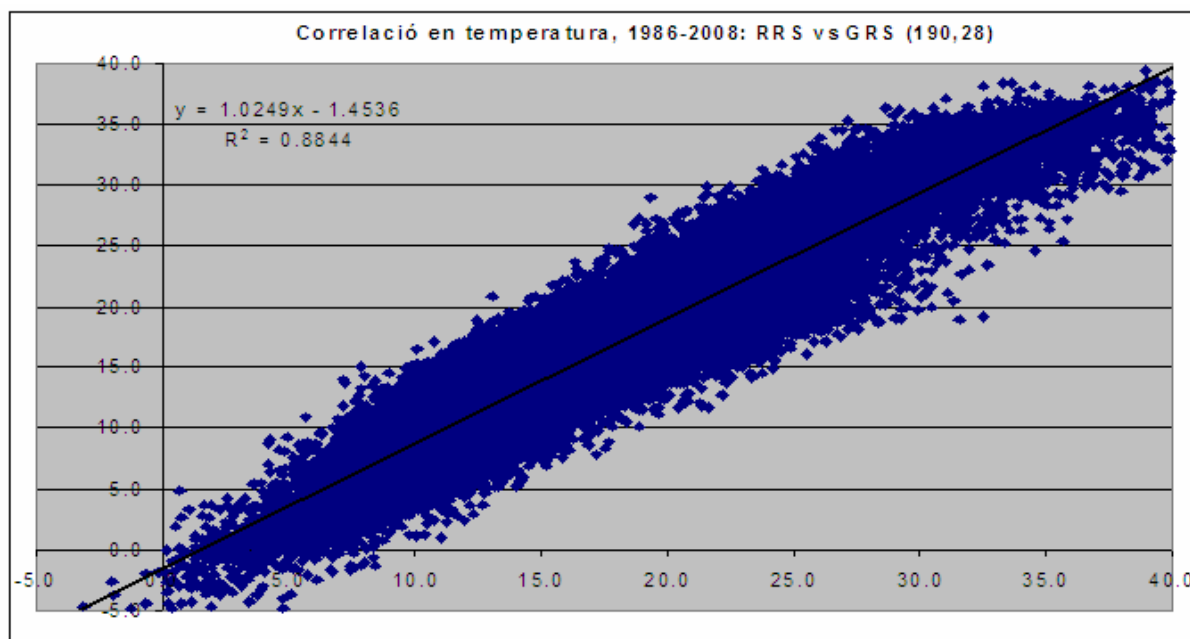


Fig. 10. Correlació entre els valors horaris de temperatura modelitzats amb el GFS i els del MASS, corresponents al període [1986-2007].

Com es veu a la gràfica anterior, la correlació dels dos models en temperatura no és gaire dolenta, amb un coeficient $R=0.940$. El mateix succeeix amb la pressió ($R=0.938$). El fet que l'acord entre els dos models no sigui extraordinàriament bo fa pensar que l'augment de resolució està aportant característiques de les variables meteorològiques amb més detall, i per tant més exactitud, del que pot fer el GFS.

En canvi, per la variable vent, trobem un coeficient de correlació extremadament baix ($R=0.40$), un acord molt dolent, un núvol de punts que fa necessari revisar les sèries per saber a què es deu tan elevada discrepància.

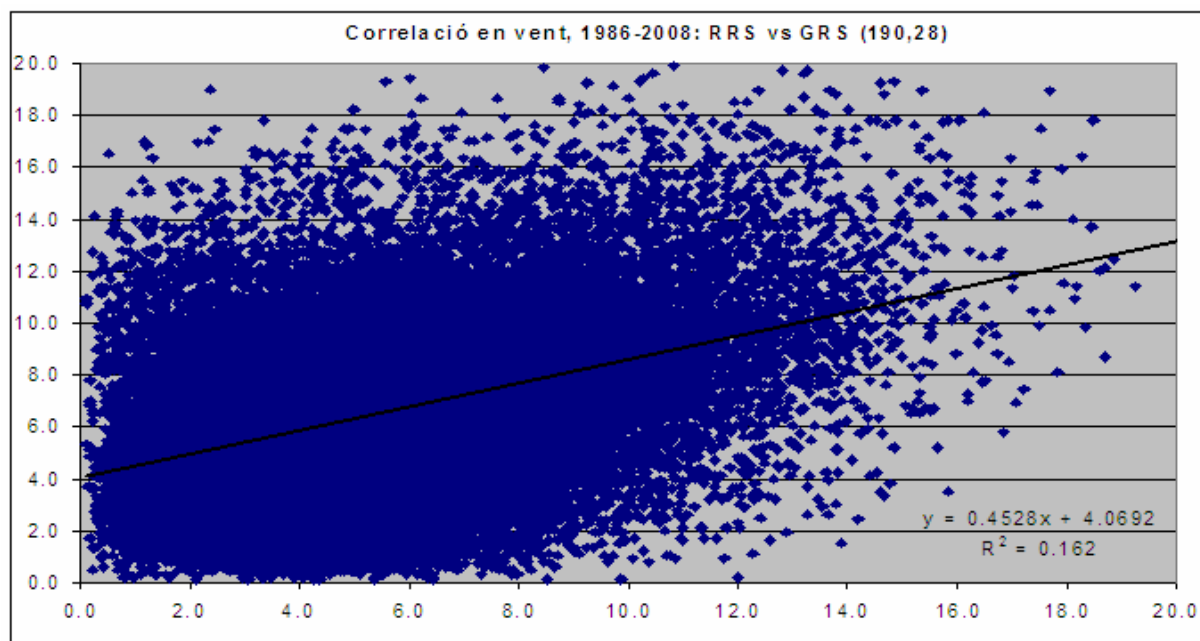


Fig. 11. Correlació entre els valors horaris de vent modelitzats amb el GFS i els del MASS, corresponents al període [1986-2007].

La següent gràfica correspon al vent simulat pels dos últims mesos de 2007 en aquest punt. Veiem com, en general, els dos models reproduïxen les mateixes variacions temporals de vent, amb la diferència que la reanàlisi regional del MASS tendeix a avançar-se una mica respecte al GFS, i també els valors de la velocitat del vent en els màxims i mínims locals sol diferir considerablement. Donat que el MASS a 15 km correlaciona millor amb observacions que el GFS, es pot concloure que el dolent acord entre els dos models vist anteriorment per al vent és degut a efectes de caràcter mesoescalar que el model global no veu.

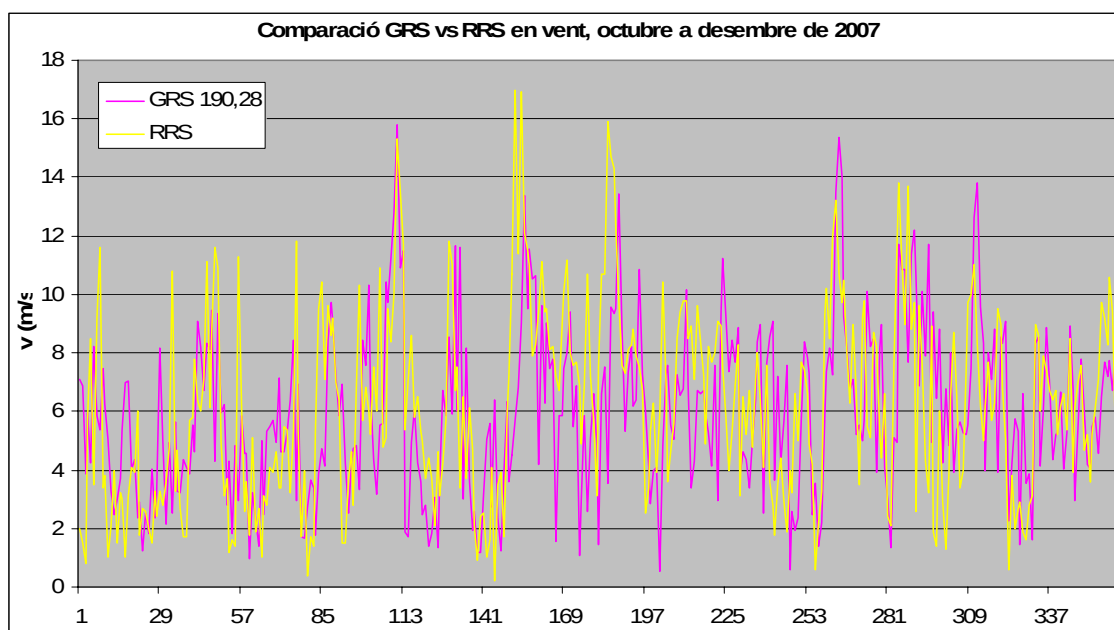


Fig. 12. Gràfica comparativa de la velocitat del vent segons les reanàlisis dels models GFS i MASS.

Pel que fa a les temperatures mitjanes climàtiques, tot i que hi ha diferències segons l'any, la tendència que revelen els dos models és la mateixa, posant de manifest el bon acord entre ells a nivell climatològic.

La següent gràfica representa la mitjana climàtica acumulada des de l'any representat a l'eix x fins el 2007. Ambdues corbes tendeixen a pujar, indicant un augment de temperatura al llarg dels últims 17 anys, que és molt semblant entre les modelitzacions del MASS i el GFS, tot i les puntuals diferències en anys individuals.

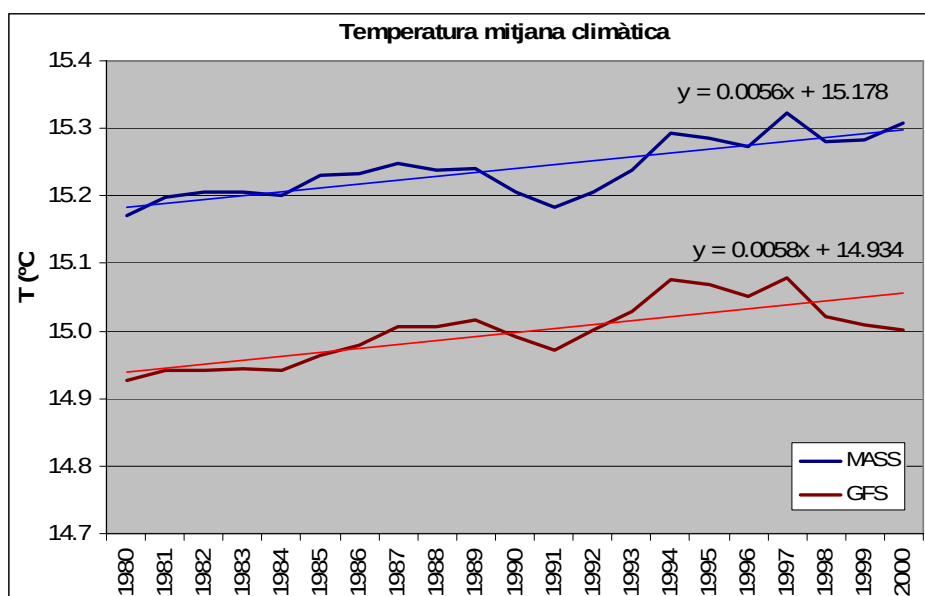


Fig. 13. Comparativa de les temperatures mitjanes climàtiques modelitzades amb el MASS i les del GFS. El període de mostreig comença a l'any que es veu a l'eix d'ordenades i acaba al 2007.

Veiem, doncs, que l'acord del model MASS amb el model global del que incorpora condicions inicials i de contorn és satisfactòria, com és d'esperar en una modelització consistent.

Comparació del MASS amb dades d'observatoris oficials

En un estudi d'aquestes característiques sobre la bondat de les prediccions d'un model, és fonamental utilitzar dades reals, com ara els promitjos climàtics d'observatoris oficials de l'Aemet. Per aquest propòsit, es van calcular les temperatures mitjanes mensuals sobre cada un dels punts on se situen les 56 estacions oficials de l'Estat, i es van comparar amb les taules climàtiques disponibles de l'Aemet.

Tot i que els períodes de mostreig d'ambdós conjunts de dades no són exactament els mateixos, sinó que estan desplaçats uns pocs anys, hi ha un bon acord entre les mitjanes mensuals, si bé el MASS tendeix a subestimar la temperatura mitjana, sobretot a l'estiu. En un principi, es va relacionar aquesta subestimació amb les estacions costaneres, on els punts de malla situats sobre el mar podrien introduir una suavització de les temperatures. Malgrat que aquest efecte s'observa en algunes estacions com Gijón (Astúries), no s'observa una diferència significativa entre l'error de les temperatures mitjanes a les estacions de costa respecte les de l'interior. Per tant, la suavització de temperatures que s'ha detectat s'atribueix al funcionament del model.

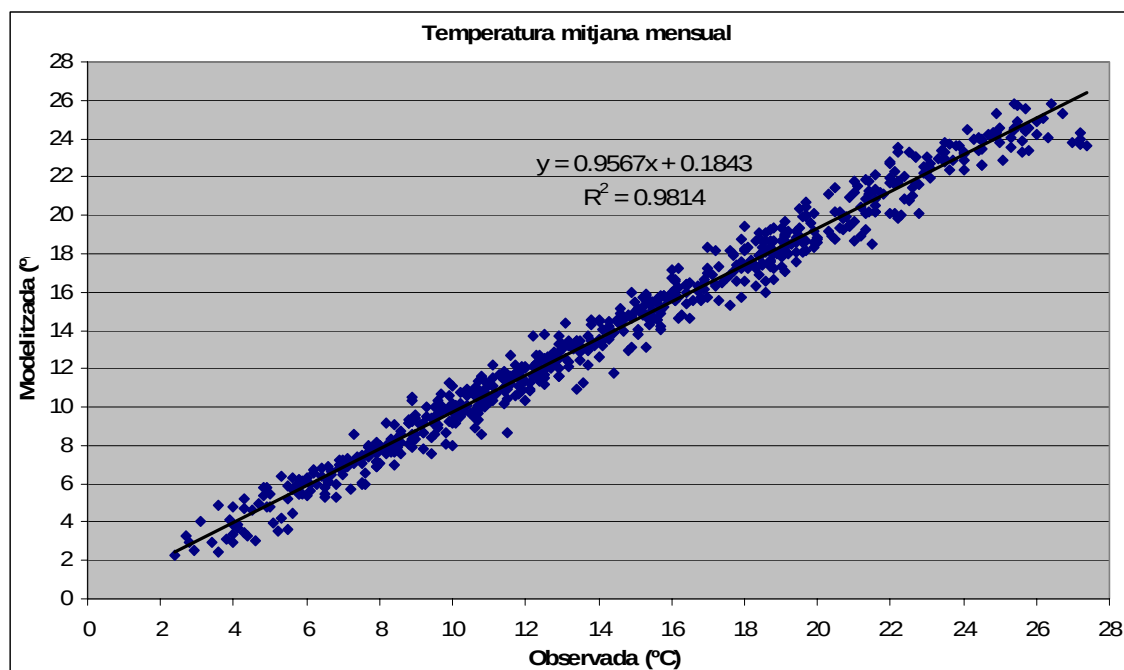


Fig. 14. Correlació entre les temperatures mitjanes mensuals modelitzades amb el MASS i les observacions oficials de l'Aemet.

Com es veu a la gràfica anterior, i també a la taula de valors, el model subestima la temperatura durant l'estiu en major mesura que la resta de l'any. La discrepància mitjana és de 1.0 °C als mesos de juliol, agost i setembre, mentre que als mesos de tardor baixa a 0.3 °C i fins a 0.0 °C el mes de gener.

MESOS	Mitjana	Variança
ene	0.0	0.7
feb	-0.6	0.7
mar	-0.4	0.7
abr	-0.5	0.7
may	-0.4	0.8
jun	-0.1	0.8
jul	-1.0	1.0
ago	-1.1	0.9
sep	-1.0	0.8
oct	-0.3	0.8
nov	-0.3	0.8
dic	-0.3	0.7
ANUAL	-0.5	0.8

Taula 5. Valors mitjans del biaix del MASS respecte la els 56 observatoris peninsulars.

A la figura següent, es representa la temperatura mitjana anual sobre la península segons les estacions oficials i segons la malla de 15 km del MASS. Amb 56 punts situats en poblacions, cal notar que el primer mapa no té suficient nivell de detall com per donar valors realistes als principals sistemes muntanyosos, tot i que reproduïx bé (i en bona concordança amb el MASS) la distribució general de les temperatures i fins i tot es distingeixen elements geogràfics com les dues mesetes, la vall de l'Ebre i la vall del Guadalquivir.

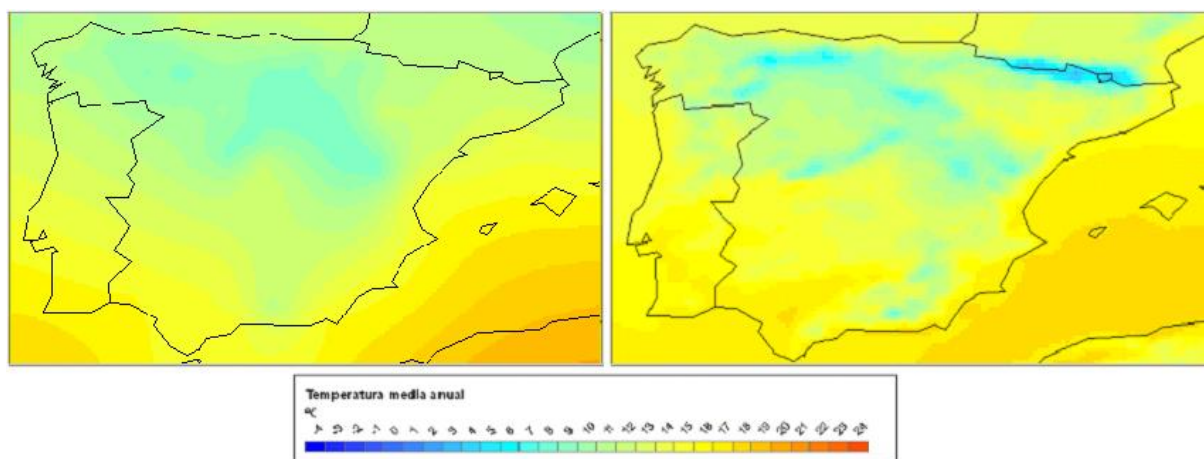


Fig. 15. Temperatura mitjana anual sobre la península Ibèrica, a l'esquerra dibuixada a partir de la xarxa d'observatoris oficials de l'Aemet, i a la dreta segons la reanàlisi del model MASS a 15 km.

4.3 Verificació del realisme de les simulacions

Estudi de processos mesoescalars basats en la teoria i/o observacions

El grau de semblança amb la realitat es comprova, més que amb mesures quantitatives de correlació i errors quadràtics dels camps, seleccionant processos mesoescalars que tenen lloc en l'atmosfera i verificant que el model els reproduceix adequadament.

Per fer un apropament als mètodes de validació científica, s'ha seleccionat un episodi de baixes pressions a sotavent de dos dies de duració, provocat per una forta entrada de tramontana.

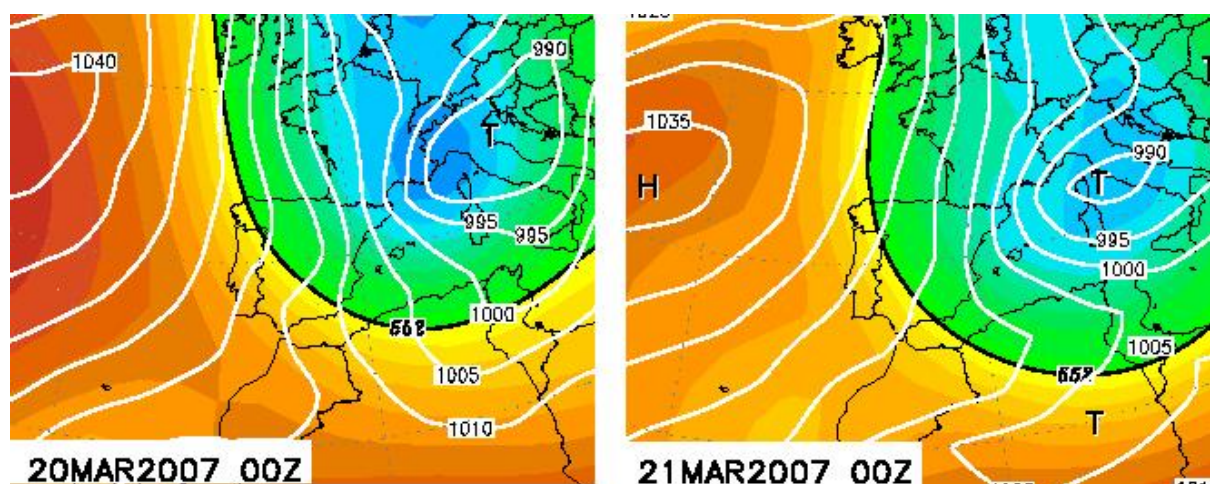


Fig. 16. Reanàlisi NCEP/NCAR en què s'aprecia l'entrada de vents del nord a la península Ibèrica.

Degut a que les observacions disponibles per aquell dia no tenen el nivell de precisió per donar uns índexs de validació coherents amb els que es deriven d'anàlisis i assimilació de dades amb el model, la comparació amb el procés real es presenta de forma qualitativa mitjançant imatges del satèl·lit NOAA. Tant la modelització mesoescalar amb el MASS com les dades de teledetecció indiquen la formació d'un sistema amb gir ciclònic al sud de la serralada pirinenca.

A les figures següents, és visible l'analogia entre els mapes isobàrics i els núvols convectius formats prop de la costa central de Catalunya. El resultat que se'n pot extreure d'aquesta verificació qualitativa és que el MASS sembla simular els processos mesoescalars amb èxit, tal i com s'espera d'un model a 15 km de resolució.

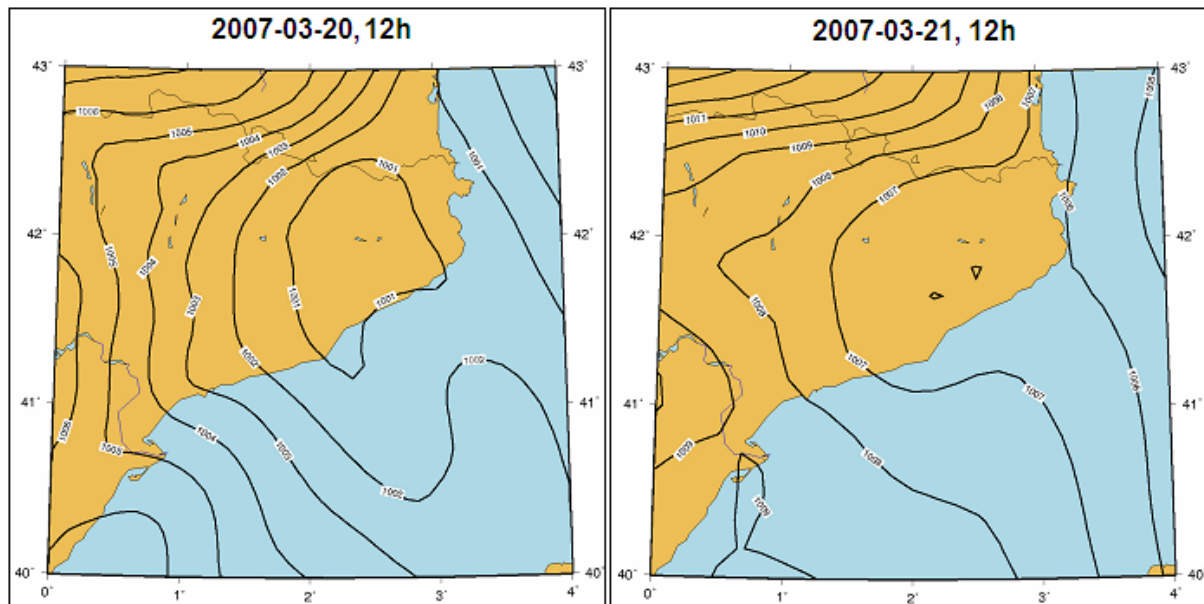


Fig. 17. Camps d'isobares pronosticats pel MASS per als dies 20 i 21 de març de 2007, localitzant una baixa pressió a sotavent.



Fig. 18. Imatges del satèl·lit NOAA captades els dies 20 i 21 de març de 2007 sobre les 13h UTC.

Comparació de sèries horàries del MASS amb observacions

La proximitat de les simulacions als processos mesoescalars que tenen lloc en l'atmosfera és una important font de verificació. Comparacions de la variable vent amb observacions d'estacions en superfície, com la que es mostra a continuació (que té un coeficient de correlació $R=0.644$) suggereixen un bon ajust a l'evolució de les condicions atmosfèriques reals. D'altra banda, la majoria d'estudis de recurs eòlic en punts concrets confirmen la sobreestimació del vent en les simulacions que s'havia detectat mitjançant els índexs de validació.

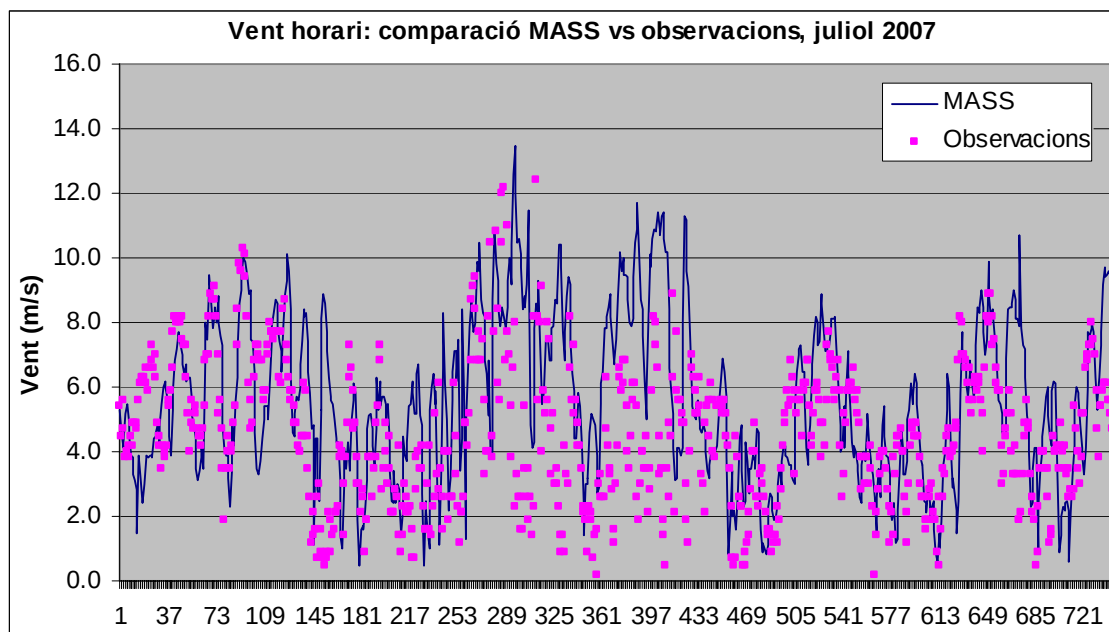


Fig. 19. Correlació entre les sortides horàries del MASS i les observacions de vent en un punt del sud de la península.

S'ha vist que totes les variables modelitzades pel MASS tenen biaixos no negligibles que varien en funció de l'hora del dia, i que en el cas del vent aquest biaix és sempre positiu, és a dir, el model tendeix a sobreestimar el vent. Aquest és un resultat molt important, però quan es tracta d'estudis en punts concrets, sovint els fenòmens d'origen local tenen un efecte sobre la velocitat del vent de major magnitud que la sobreestimació del MASS. Per aquesta raó, tot i que és interessant conèixer bé el funcionament i les tendències del model, en un estudi a llarg termini és important la qualitat i completitud de les observacions.

Assolir un nivell de realisme satisfactori permet confiar en el model per portar a terme algunes aplicacions com la que es comenta més a dalt: estudis a llarg termini. Suposant que disposem d'observacions, és possible donar un pas més enllà de la simple recopilació dels resultats del model. En lloc d'ajustar la interpolació bilineal basada simplement en la distància del punt d'estudi als quatre punts de malla més propers, s'ha fet una interpolació multilíneal, minimitzant les diferències per mínims quadrats. Els coeficients que assignen els diferents pesos als nodes del voltant permeten reconstruir la sèrie, extrapolant la mateixa relació entre els quatre punts de malla cap al passat, i podent així reconstruir la sèrie meteorològica de localitzacions on no hi ha disponibles observacions in situ fins tan enrere en el temps.

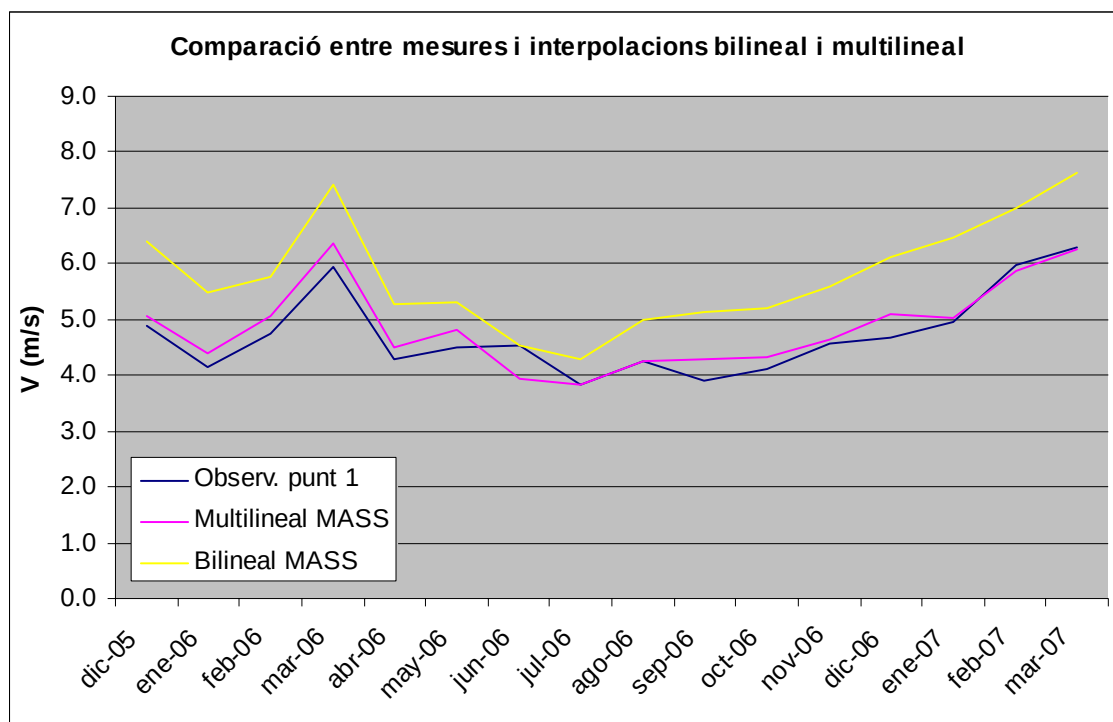


Fig. 20. Comparació d'observacions mensuals in situ amb les interpolacions bilineal i multilinear del MASS sobre el punt en qüestió.

5. APLICACIÓ A UN ESTUDI CLIMATOLÒGIC REGIONAL

Com ja s'ha avançat en seccions anteriors, inicialment es va modelitzar un any climàtic *tipus*, amb dies escollits aleatòriament del període [1980-2007]. Aquestes simulacions pretenien donar una primera aproximació de les característiques climàtiques de la regió d'estudi, i utilitzar-se com a valors de referència en estudis de variabilitat climàtica.

La modelització dels 28 anys complets ha permès construir un any climàtic que al mateix temps és representatiu del període [1980-2007] i constitueix una població estadística significativa. La comparació entre els anys tipus i el promig real del període sencer posa en relleu la bona correlació entre ambdues modelitzacions, si bé els valors més exactes són lògicament els promitjos dels 28 anys complets.

En el cas del vent, que és presumiblement la variable més sensible en aquest estudi per ser la més difícil de predir, veiem a la següent figura com qualsevol dels dos anys tipus modelitzats reproduïx bastant bé el cicle anual descrit pels valors climàtics. Aquests valors corresponen al promig de 116 punts repartits per la geografia de la península Ibèrica, que tenen com a característica comú el seu elevat potencial eòlic. Cal destacar que s'aconsegueix encara una millor correlació prenent la mitjana dels dos anys tipus, ja que el tamany de la mostra es multiplica per dos, tot i que la posició dels màxims anuals encara no coincideix exactament per les dues corbes.

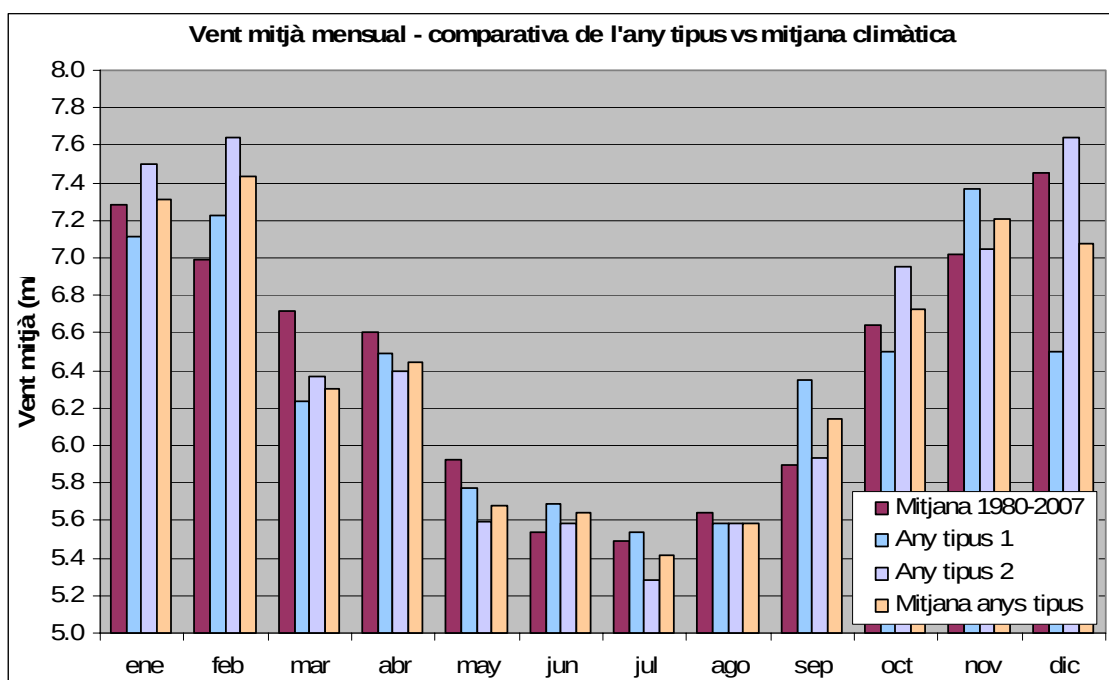


Fig. 21. Gràfica comparativa entre el vent mitjà mensual modelitzat sobre els anys climàtics tipus de 366 dies i les mitjanes climàtiques de la sèrie completa.

Pel que fa als valors de correlació explícitament, els dos anys tipus donen coeficients $R=0.981$ i $R=0.992$ respectivament, si es comparen amb el promig dels 28 anys. Aquests valors són molt satisfactoris per la majoria d'estudis de seguiment del potencial eòlic.

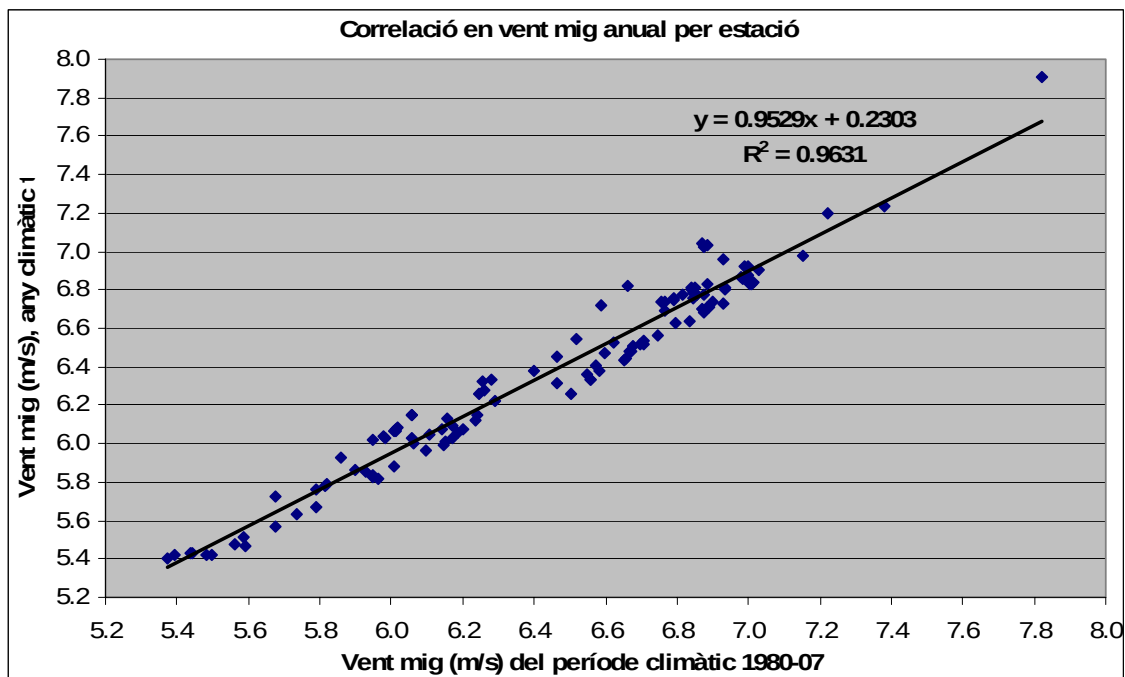


Fig. 22. Correlació entre els valors de vent mitjà mensual corresponents a l'any tipus (1) i els valors climàtics de la modelització del període [1980-2007].

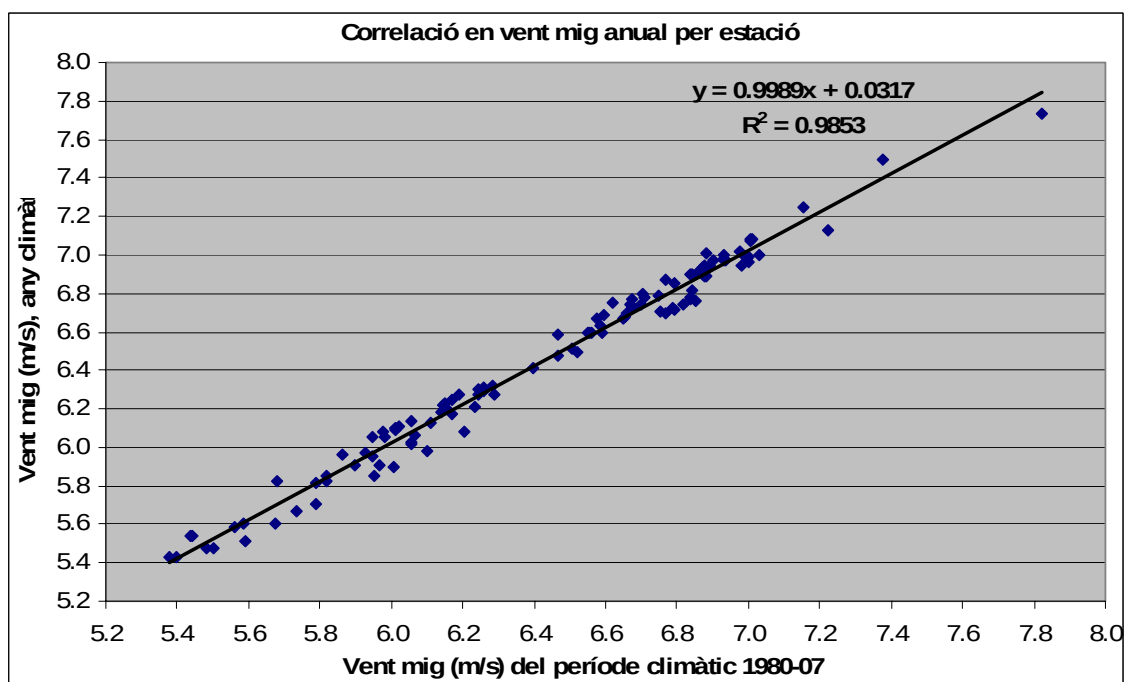


Fig. 23. Correlació entre els valors de vent mitjà mensual corresponents a l'any tipus (2) i els valors climàtics de la modelització del període [1980-2007].

Una correlació més bona s'obté promitjant els dos anys tipus, que eleva el coeficient fins $R=0.993$. Malgrat que encara és possible obtenir una millor correlació, per exemple amb una interpolació multilíneal utilitzant com a predictors els valors mitjans extrems de la sèrie de 28 anys o bé observacions in situ, qualsevol d'aquests predictors no són disponibles a priori, d'aquí la necessitat de fer les simulacions.

A la figura següent, s'exposa la correlació entre aquest nou any tipus promitjat d'una mostra de 732 dies amb el promig real extret dels 10228 dies.

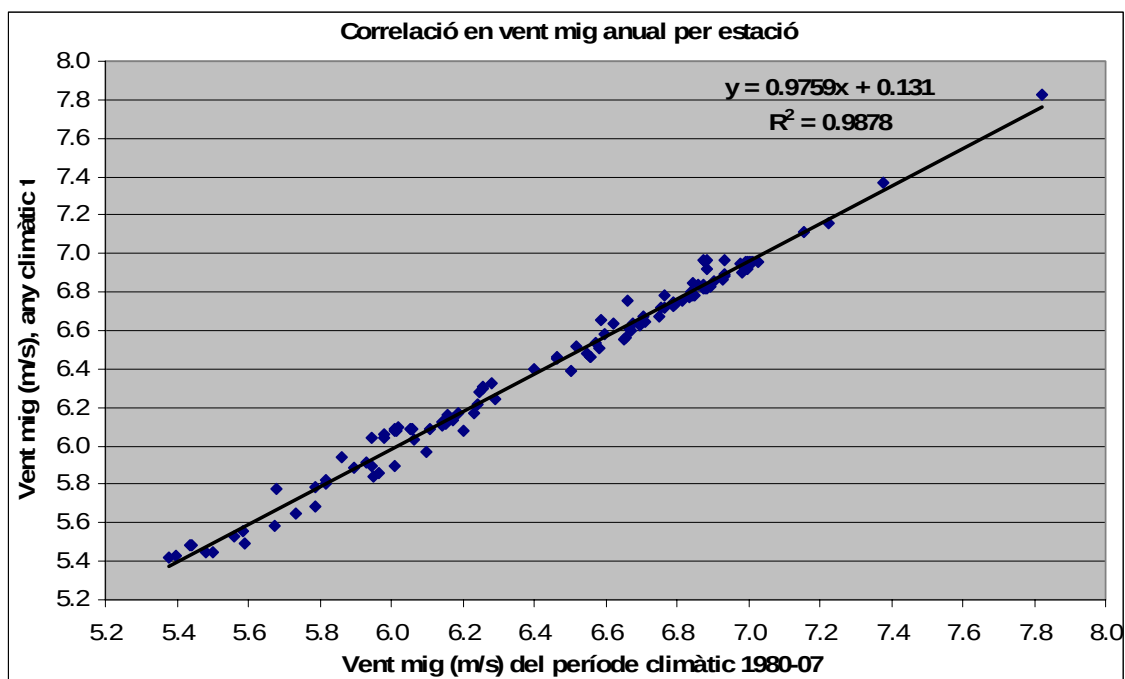


Fig. 24. Correlació entre els valors de vent mitjà mensual corresponents al promig dels dos anys tipus i els valors climàtics de la modelització del període [1980-2007].

Quant a la temperatura, la mesura de l'acord entre les diferents climatologies proposades presenta un comportament molt similar al cas del vent.

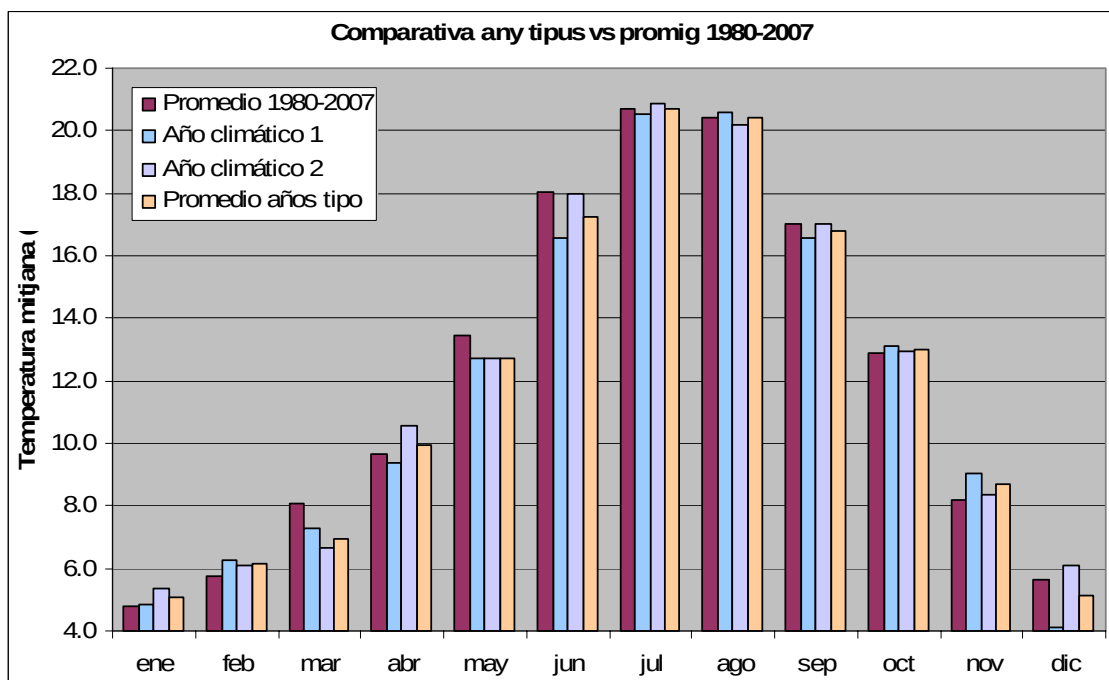


Fig. 25. Gràfica comparativa entre la temperatura mitjana mensual modelitzada sobre els anys climàtics tipus de 366 dies i les mitjanes climàtiques de la sèrie completa.

Sobre el promig dels mateixos 116 punts peninsulars utilitzats per estudiar la climatologia de la variable vent, s'observa que qualsevol dels anys climàtics reproduïx satisfactòriament la oscil·lació anual de la temperatura, en molt bona correlació amb els valors mitjans reals.

En aquest cas, però, la millor correlació correspon a l'any (2), amb un coeficient $R=0.9997$, mentre que la mitjana es queda en $R=0.9994$ i l'any tipus (1) mostra una correlació de $R=0.9982$. Aquest resultat posa de manifest que, amb només dos anys aleatoris, encara hi ha una possibilitat apreciable que un d'ells individualment correlacioni millor que la mitjana dels dos.

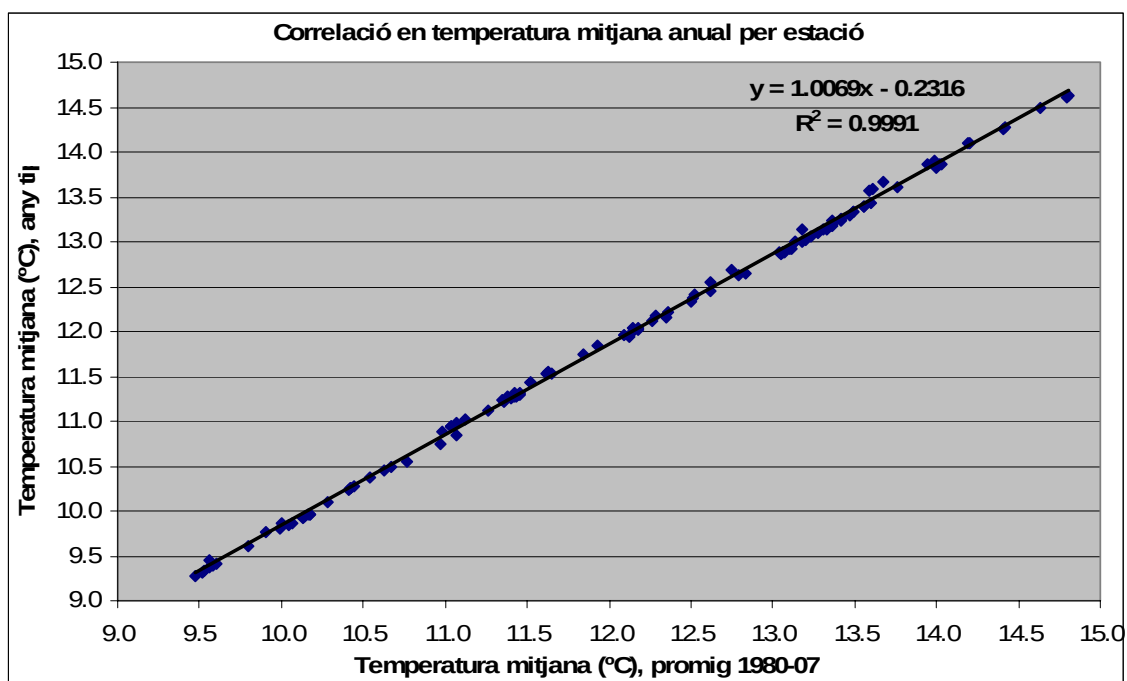


Fig. 26. Correlació entre les temperatures mitjanes mensuals corresponents al promig dels dos anys tipus i els valors climàtics de la modelització del període [1980-2007].

A la vista dels resultats obtinguts, es pot afirmar que modelitzar un any tipus introdueix en la sèrie valors climàticament significatius, encara que el fet de no representar una mostra suficientment gran des del punt de vista estadístic introdueix un component estocàstic. Modelitzar més anys aleatoris implica augmentar el número de successos a la mostra, que tal i com s'ha vist, generalment millora la correlació amb els valors climàtics. Així doncs, com era d'esperar, es posa de manifest el compromís entre el número d'anys que és viable modelitzar des del punt de vista operatiu i el nivell de precisió requerit.

6. RESUM DELS RESULTATS

De l'estudi de verificació de les simulacions del MASS utilitzades en reanàlisi regional a llarg termini, se n'extreuen els següents resultats:

- Els pronòstics a 12 hores del model mesoescalar MASS presenten un bon acord amb les anàlisis del propi model. Això demostra la satisfactòria qualitat de les prediccions.
- Generalment, el MASS a 15 km de resolució subestima la temperatura en relació a les observacions oficials. Aquest resultat, però, depèn de l'hora del dia, com s'ha vist a les taules de verificació per variables contínues.
- Pel que fa al vent, el MASS tendeix a sobreestimar el seu mòdul tant durant el dia com a la nit. Aquest és un resultat molt rellevant a tenir en compte en qualsevol modelització, tot i que l'ajust a dades experimentals depèn també en gran mesura dels fenòmens locals, que poden tenir un efecte de magnitud tant o més gran que el biaix del MASS.
- L'any climàtic que inicialment s'utilitzava, construït a partir de 366 dies aleatoris del període [1980-2006], correlaciona satisfactòriament amb els promitjos climàtics de la sèrie completa [1980-2007], i és climàticament representatiu dels promitjos anuals. Tot i així, mensualment, aquesta *pseudosèrie* no té suficients membres com per ser representativa del llarg termini. Les mitjanes mensuals del vent a llarg termini calculades amb la sèrie completa no tenen aquest problema.

7. CONCLUSIONS

- La validació operativa dels pronòstics del MASS posa en relleu la seva capacitat per realitzar prediccions de manera acurada, tenint en compte les limitacions de qualsevol sistema de predicció numèrica existent en el present. Aquest resultat equipara les prestacions del model amb altres programes de simulació mesoescalars com ara MM5 o RAMS.
- La verificació científica, realitzada a nivell qualitatiu en aquest projecte, suggereix que el MASS simula adequadament els processos de mesoescala. Seria interessant ampliar l'estudi científic, procurant els medis instrumentals necessaris, així com els recursos personals i computacionals requerits per estudiar en més detall els diversos processos i parametritzacions del model.
- Per la seva representativitat espacial i temporal, els resultats de l'estudi climatològic són una font d'informació molt valuosa per a la realització d'estimacions de llarg termini a partir de sèries de mesures d'escassa longitud temporal. La metodologia utilitzada permet replicar l'estudi en qualsevol part del planeta.

8. AGRAÏMENTS

- A la direcció de Meteosim Truewind, per facilitar la realització d'aquest estudi amb el seu suport logístic.
- Als companys de Meteosim Truewind, per la seva ajuda i el seu interès.
- Al professor Bernat Codina, pel seu assessorament i per definir els interessos i les pautes inicials del projecte.
- A la organització del Màster Oficial en Meteorologia, per incloure el projecte dins del seu programa.

9. BIBLIOGRAFIA

Joliffe, I.T. y Stephenson, D.B. (2003), *Forecast Verification: A practitioner's guide in Atmospheric Science*. John Wiley & sons.

Essenwanger, O. (1976), *Applied statistics in Atmospheric Science*. Elsevier Scientific Publications.

Thiébaux, H.J. y Pedder, M.A. (1987), *Spatial objective analysis with applicaions in atmospheric science*. Academic Press.

VV.AA. *A comprehensive model inter-comparison study investigating the water budget during the BALTEX-PIDCAP period*. Meteorology and atmospheric physics, 2001, vol. 77, nº 1-4, pp. 19-43.

Van Meijgaard, E.; Andræ, U. y Rockel, B, *Comparison of model predicted cloud parametres and surface radiation fluxes with observations on 100-km scale*. Meteorology and atmospheric physics, 2001, vol. 77, nº 1-4, pp. 109-130

Pérez-Landa, G. y Palau, J.L. entre d'altres, 2006, *Validación de un modelo de predicción meteorológica en terreno complejo*. Asociación Meteorológica Española.

Zhong, S., i J. D. Fast, 2003, *An evaluation of MM5, RAMS, and Meso Eta at sub-kilometer resolution using the VTMX field campaign data in the Salt Lake Valley*. Mon. Wea. Rev. 131, 1301-1322.