SENSIBILITAT DELS PRONÒSTICS DEL WRF A LA PARAMETRITZACIÓ DE LA CONVECCIÓ I LA MICROFÍSICA DE NÚVOLS

Jordi Mercader i Carbó

Treball del Màster en Meteorologia, Universitat de Barcelona Barcelona, 11 d'octubre de 2007

> Tutor del treball: **Dr. Bernat Codina Sánchez**

Índex

1. Introducció	5
1.1. Justificació i motivacions del treball	5
1.2. El Weather Research and Forecasting Model (WRF)	6
1 2 1 Característiques del model WRE-ARW	6
1.2.2. El sistema preprocessador del W/RE (W/PS)	8
1.2.2. El sistema preprocessador del WRF (W1.5)	0
1.2.5. El sistema d'assimilació de dades	8
1.2.4. Plans de futur	9
1.3. Descripció general del treball	9
2. Les parametritzacions de la convecció	10
2.1. Esquema de Betts-Miller-Janjić (BMJ)	11
2.2. Esquema de Grell-Dévényi (GD)	14
2.3. Esquema de Kain-Fritsch (KF)	16
3 Mètodes de verificació	19
31 Verificació punt a punt	19
3.1. Venneaelo punt a punt	17
4. Metodologia	23
4.1. Disseny de les configuracions	23
4.1.1. Domini	23
4.1.2. Configuració de les simulacions	
i descripció del "downscaling"	24
4.2. Casos d'estudi escollits	25
5. Resultats	27
5.1 Temperatura	27
5.1.1 ME	27
5.1.2 RMSE	30
5.1.2. RIVISE	30
5.2. Altura geopolencial	35 25
5.2.1. ME	35
5.2.2. RMSE	38
5.2.3. \$1	40
5.3. Pressió atmosfèrica a nivell del mar	43
5.3.1. ME	43
5.3.2. RMSE	44
5.3.3. S1	45
5.4. Humitat relativa i proporció de mescla	46
5.4.1. ME	46
5.4.2. RMSE	49
5.5. Vent	53
6. Conclusions	57
Keterencies	59
ANNEX	63
Figures A1-A28	

1. Introducció

1.1. Justificació i motivacions del treball

La meteorologia de mesoescala és un camp que encara presenta molts reptes, i que al llarg de les darreres dècades, ha esdevingut objecte d'interès d'una part cada vegada més àmplia de la societat.

Qualsevol entitat que ofereixi serveis de predicció meteorològica necessita disposar d'un model numèric de previsió mesoescalar, configurat adequadament a les zones o regions a les quals presta els seus serveis.

Un model òptim ha d'incloure els resultats de les investigacions més recents en meteorologia mesoescalar, i a la vegada ha de tenir un programari adaptat a les creixents capacitats de càlcul dels sistemes informàtics. També és desitjable que disposi d'una potent comunitat d'usuaris estesa arreu del món, de manera que permeti l'intercanvi d'experiències en la utilització del model, la comparació de simulacions de diferents casos d'estudi i, a més, doni la possibilitat d'establir un *feedback* entre usuaris i desenvolupadors que permeti disposar d'un model meteorològic ben ajustat a les necessitats dels usuaris.

Actualment, el model numèric que compleix millor aquestes característiques és el WRF (Weather Research and Forecasting Model), un model de domini públic i de distribució lliure que s'ha desenvolupat sota la coordinació del National Center for Atmospheric Research (NCAR), dels Estats Units, i en el qual hi participen de manera contínua centres de recerca d'arreu del món.

El WRF pren el relleu del MM5 (PSU/NCAR Mesoscale Model), que durant els darrers anys ha estat el model de distribució lliure de referència a nivell mundial. La darrera i definitiva actualització de l'MM5 fou al desembre de 2004; a partir de llavors, el model restà "congelat" i els científics que l'havien desenvolupat van passar a dedicar els seus esforços al WRF.

El Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), principal organisme meteorològic oficial del país, l'any 2006 disposava de tres models mesoescalars operatius: el MASS (Mesoescale Atmospheric Simulation System), l'MM5 i el Lokal Model. Davant l'oportunitat de disposar de les previsions d'un model d'última generació com el WRF, des de la Universitat de Barcelona s'està realitzant un estudi de viabilitat per la utilització operativa d'aquest model al SMC.

Aquest estudi contempla, en primer lloc, la verificació contrastada dels resultats que dóna el model per a diferents configuracions de les seves opcions físiques, amb l'objectiu d'escollir una configuració per a pronòstics operatius, i en segon lloc, la comparació dels pronòstics del WRF amb els dels models que, en l'actualitat, funcionen operativament al SMC.

En el present treball es mostren resultats preliminars corresponents a la primera fase d'aquest estudi que està realitzant la Universitat de Barcelona pel SMC, amb data de finalització prevista pel gener de 2008. Com s'explicarà més endavant, les configuracions que s'han verificat corresponen a diferents opcions de la parametrització de la convecció i de la microfísica de núvols, de manera que els resultats obtinguts esdevenen una mesura de la sensibilitat dels pronòstics del WRF a les diferents opcions per a la parametrització d'aquests processos físics. De fet, les conclusions finals de l'estudi, serviran de base per un projecte a més llarg termini amb l'objectiu d'ajustar una parametrització de la convecció per a millorar els pronòstics de precipitació sobre l'àrea de Catalunya, mitjançant la utilització del model WRF.

1.2. El Weather Research and Forecasting Model (WRF)

El WRF es va començar a desenvolupar amb la intenció de proporcionar un model de pronòstic mesoescalar de nova generació i un sistema d'assimilació de dades per avançar en la comprensió i la predicció de la meteorologia mesoescalar i accelerar la transferència dels avanços en recerca a dins de les operacions (Klemp, 2006).

El model està dissenyat per millorar l'encert dels pronòstics al llarg del rang d'escales comprès entre l'escala sinòptica i la dels núvols, amb especial èmfasi en les resolucions horitzontals d'entre 1 i 10 km (Klemp, 2006).

Un dels punts forts del WRF és la seva doble condició de model de recerca i de pronòstic: pot fer des de simulacions de recerca idealitzades fins a pronòstics operatius.

El juny de 2007, el WRF comptava amb més de 5100 usuaris registrats, dels quals uns 2100 eren dels Estats Units i la resta de 94 països diferents. A més, el model ja funcionava operativament a Corea del Sud, Taiwan, l'Índia, Israel o la Xina, i també en importants centres de predicció dels Estats Units, com ara el NCEP (National Center for Environmental Prediction), que l'utilitza com a base pel seu North American Meso Model (NAM Model).

1.2.1. Característiques del model WRF-ARW

Una de les característiques del sistema de modelització del WRF és que ofereix dos models de resolució dinàmics: el Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM), desenvolupat pel NCEP com una millora del model operatiu Eta (Klemp, 2006) i l'Advanced Reserarch WRF (ARW), desenvolupat pel NCAR.

En el moment d'iniciar el treball es va optar pel model WRF-ARW, perquè va ser el primer a incorporar l'opció de simulacions amb dominis niats i també era el més utilitzat per la comunitat científica. Posteriorment, alguns estudis comparatius entre l'encert dels models ARW i NMM mostraren que les diferències entre ambdues versions no eren massa importants, però que el WRF-ARW funcionava lleugerament millor (Brown, 2007). La darrera versió d'aquest model, actualitzada el desembre de 2006, és la 2.2.

El sistema del WRF-ARW consta del model de resolució dinàmic "ARW" juntament amb altres components del sistema de modelització del WRF necessaris per a produir una simulació. Per tant, també inclou esquemes físics, rutines d'inicialització i un sistema d'assimilació de dades (Skamarock, 2005). Les equacions de l'ARW són totalment compressibles, no-hidrostàtiques (amb la possibilitat de fer simulació hidrostàtica si s'indica) i conservatives per les variables escalars. Utilitza una malla horitzontal de tipus Arakawa C-grid staggering, i una coordenada vertical "eta". Permet niaments de tipus *one-way*, *two-way* i mòbils.

La integració temporal utilitza un esquema de Runge-Kutta de 3r odre, amb un pas de temps més petit pels modes d'ones acústiques i gravitatòries. En la discretització espaial es pot escollir una advecció d'entre segon i sisè ordre. Permet tres projeccions de la Terra: estereogràfica polar, Lambert-conformal i Mercator.

El model permet escollir diferents esquemes per a cada parametrització física. Per a la parametrització de la microfísica de núvols, hi ha fins a 8 esquemes disponibles, des dels més senzills per a gran escala fins als més complicats per a resolucions de l'escala dels núvols. La física de la superfície també es pot parametritzar amb esquemes de diferent complexitat: des de senzills models tèrmics fins a d'altres més complets que inclouen processos de la vegetació. També hi ha diversos esquemes de radiació, per a ona llarga i per a ona curta, i fins a tres parametritzacións de la convecció. A la taula 1.1 hi ha la relació dels diferents esquemes de parametrització que es poden escollir per a les simulacions amb la versió 2.2 del model WRF-ARW.

PROCESSOS FÍSICS	Parametritzacions disponibles al WRF-ARW, versió 2.2
Microfísica de núvols	 Kessler (3 espècies) Purdue Lin (6 espècies) WSM3 (3 espècies) WSM5 (5 espècies) WSM6 (6 espècies) Eta GCP (2 espècies) Thompson (7 espècies)
Convecció	Kain-FritschBetts-Miller-JanjicGrell-Devenyi ensemble
Capa superficial	Teoria semblança (del MM5)Teoria semblança (del Eta)
Capa fronterera planetària	 MRF Model PBL Yonsei University (YSU) PBL Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) PBL
Model superficial	 Difusió tèrmica en 5 capes Noah Land-Surface Model (4 capes) RUC Model LSM (6 capes)
Radiació d'ona llarga	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)Eta Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
Radiació d'ona curta	 Eta Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Dudhia Goddard

Taula 1.1. Parametritzacions de processos físics disponibles al WRF-ARW, versió 2.2.

Per altra banda, el software s'ha dissenyat amb una estructura modular i jeràrquica, que permet una bona portabilitat i eficiència en un gran ventall d'arquitectures informàtiques simples o paral·leles.

1.2.2. El sistema preprocessador del WRF (WPS)

El WPS és un conjunt de programes que té com a objectiu preparar les dades per a començar una simulació amb dades reals. Les seves principals funcions són la definició de dels dominis de la simulació i la interpolació de les dades (tant geogràfiques com meteorològiques) als punts de la malla de cada domini.

Les dades geogràfiques estàtiques s'interpolen quan es creen els dominis de les simulacions. Aquestes dades comprenen categories del sòl, usos del sòl, altitud del terreny, temperatura mitjana anual del sòl profund, fracció de vegetació mensual, albedo mensual, albedo màxim de la neu i categoria del pendent. La resolució dels conjunts de dades proporcionats amb el model oscil·la entre 1° per les dades de categoria del pendent o temperatura profunda del sòl i els 30 segons d'arc en l'altitud del terreny, usos del sòl i categories del sòl; a més, el WPS permet que l'usuari utilitzi el seu propi conjunt de dades.

Amb els dominis definits, es pot procedir a la interpolació horitzontal de les dades meteorològiques. El WPS ofereix una gran flexibilitat en aquest procés, i permet escollir un mètode d'interpolació diferent per a cada variable, interpolar camps meteorològics procedents de pronòstics o anàlisis de diferents models o utilitzar valors constants per algunes variables, com ara la temperatura superficial de l'aigua del mar o la cobertura de gel.

La possibilitat de combinar dades de diferents models, per exemple, permet complementar les variables d'un model amb les d'un altre per tenir un conjunt complet de variables apte per inicialitzar el model, o bé utilitzar dades d'un model de cobertura més gran quan les dades d'un model regional són insuficients per cobrir el domini de simulació sencer.

La interpolació vertical de les variables meteorològiques és efectuada per un programa inclòs en el cos principal del WRF-ARW, que també s'encarrega de crear els arxius amb les condicions inicials i de contorn de la simulació.

1.2.3. El sistema d'assimilació de dades

El WRF incorpora un sistema d'assimilació de dades, el WRF-3DVAR, que combina les dades observacionals amb el producte d'un pronòstic numèric (normalment el *first guess*) i la seva respectiva estadística d'errors per proporcionar una estimació millorada (l'anàlisi) de l'estat atmosfèric. Això ho realitza mitjançant la minimització iterativa d'una funció cost determinada.

Després d'actualitzar les condicions inicials de la simulació, es pot procedir a actualitzar les condicions de contorn.

1.2.4. Plans de futur

Durant l'any 2007 es treballa per actualitzar el WRF a la versió 3.0, amb la previsió que estigui enllestida el març de 2008 (Dudhia, 2007). D'entre les noves característiques, destaquen la incorporació de la possibilitat de fer simulacions globals amb el WRF-ARW, una renovació extensa del software i una extensió i actualització del sistema d'assimilació de dades (WRF-Var).

A la nova versió també s'hi trobaran diversos esquemes físics importats del model CCSM (Community Climate System Model) que seran útils per a simulacions amb pas de malla gran (entre 10 i 100 km) o per treballs de regionalització climàtica, com ara la microfísica de núvols de Morrisson, l'esquema convectiu de Neale-Richter, o el model de superfície CLM (Community Land Model).

L'esquema superficial de Noah serà actualitzat amb una nova versió, i també s'incorporaran el model SiB (Simple Biosphere) de l'UCLA (Universitat de Califòrnia a Los Àngeles), diversos esquemes físics utilitzats actualment als models operatius del National Center for Environmental Prediction (NCEP), a la vegada que també es treballa amb nous esquemes (Galperin, Gilliam) de capa fronterera plantetària.

També és possible que la versió 3.0 incorpori la possibilitat de treballar amb un pas d'integració variable.

1.3. Descripció general del treball

En aquest treball s'han verificat, de manera contrastada, els pronòstics del WRF per a diferents configuracions de les opcions de parametrització de la convecció i de la microfísica de núvols. D'aquesta manera, s'avalua la sensibilitat de les previsions del WRF a la parametrització d'aquests processos físics, i es pot determinar, a partir dels resultats obtinguts, la configuració que proporciona uns pronòstics més satisfactoris i que pot ser utilitzada per als pronòstics operatius.

Per la importància que prenen en aquest treball les diferents parametritzacions de la convecció que es poden escollir a l'hora d'engegar les simulacions, es dedica el segon apartat del treball a descriure aquests esquemes.

Al tercer apartat es descriuen les eines de verificació utilitzades en l'estudi, i a l'apartat següent, s'explica com s'han escollit els dominis sobre els quals treballarà el model, es descriuen les configuracions i la metodologia utilitzada per engegar les diferents simulacions i, finalment, es descriuen els casos d'estudi que han sigut objecte d'aquest treball.

Tot seguit es fa una descripció exhaustiva dels resultats de les simulacions, distingint els obtinguts a una resolució més baixa o escala sinòptica d'aquells corresponents a simulacions efectuades sobre un domini niat amb un pas de malla més petit. Finalment, en el darrer apartat, es plantegen les conclusions.

2. Les parametritzacions de la convecció

Els models meteorològics de mesoescala han de tenir en compte els efectes de la convecció, ja que es tracta d'un procés físic de gran importància en la meteorologia. La convecció és responsable d'importants intercanvis i redistribucions verticals d'energia i humitat, a més de ser un dels factors desencadenants de la pluja. Si la convecció és prou intensa pot generar circulacions atmosfèriques amb influència en zones allunyades respecte l'indret on s'ha originat.

Si s'utilitza un domini amb un pas de malla massa gran per resoldre els fluxos convectius de manera explícita, és necessari parametritzar la convecció per restablir l'estabilitat a la columna atmosfèrica en una escala de temps realista. Per aquest motiu, els esquemes convectius estan dissenyats per utilitzar-se quan es treballa amb un pas de malla generalment superior als 10 km.

Segons s'explica a la nota tècnica del WRF (Skamarock et al., 2005), malgrat que amb passos de malla inferiors a 10 km la convecció pot deixar de ser estrictament un procés de sub-malla, en ocasions s'ha trobat que aquests esquemes han ajudat a iniciar la convecció quan s'han aplicat a dominis d'entre 5 i 10 km de pas de malla.

Malgrat els nombrosos esquemes convectius desenvolupats els darrers anys, la parametrització de la convecció encara és un repte (Grell and Dévényi, 2002; Kain, 2004). Malgrat l'increment constant de la capacitat de càlcul dels sistemes informàtics, amb la possibilitat que això comporta de realitzar simulacions d'alta resolució i, per tant, de prescindir dels esquemes convectius en aquestes simulacions, encara no hi ha acord en quin és el límit per la seva utilització. Per exemple, mentre alguns experts (Jascourt, 2004) el situen a 1 o 2 km, d'altres, com Kuell (2007) estan desenvolupant un esquema convectiu per ser utilitzat en simulacions d'alta resolució mentre el pas de malla no sigui de l'ordre dels 100 metres. En el cas del WRF i de les parametritzacions de la convecció que inclou, Skamarock i altres (Skamarock et al., 2005) proposen deixar d'utilitzar-les per a passos de malla inferiors als 5 km.

Abans de descriure els diferents esquemes convectius disponibles al WRF, cal insistir en el propòsit principal d'aquestes parametritzacions: reduir la inestabilitat en una columna d'aire del model, en una escala de temps prou ràpida, amb la finalitat d'evitar els efectes adversos que comportaria l'aparació d'un flux convectiu d'escala massa gran (l'escala d'una cel·la en una malla de baixa resolució); la precipitació, per tant, només és un producte que sorgeix com a conseqüència d'aquest restabliment de l'estabilitat (UCAR, 2000; Jascourt, 2004; Kuell, 2007).

2.1. Esquema de Betts-Miller-Janjić (BMJ)

Aquest esquema és el més senzill de tots els que disposa el WRF. La versió primitiva va ser ideada per Betts i Miller (BM) l'any 1986, i més tard, el 1994, Janjić va modificar-lo, donant lloc a la versió actual.

L'esquema original de BM va néixer en un moment en què s'havien realitzat pocs progressos en la parametrització de la convecció des de la publicació de l'esquema d'Arakawa i Schubert (AS) l'any 1974, degut a la impossibilitat d'integrar un model de l'escala dels núvols en cada un dels punts de malla d'un model global (Betts, 1986). L'esquema proposat per Betts i Miller té com a objectiu bàsic assegurar que les estructures verticals locals de temperatura i humitat, variables lligades a la convecció, siguin realistes. Per a aconseguir-ho, suggereix relaxar simultàniament els perfils verticals de temperatura i humitat cap a perfils típics de quasi equilibri, determinats empíricament, i no es preocupa d'explicar quins processos nuvolosos o mesoescalars hi donen lloc.

L'ajust convectiu es pot representar amb les relacions següents

$$\left(\frac{\partial \overline{T}}{\partial t}\right)_{C} = \frac{T_{R} - \overline{T}}{\tau}$$

$$(2.1)$$

$$\left(\frac{\partial \overline{q}}{\partial t}\right)_{C} = \frac{q_{R} - \overline{q}}{\tau}$$
[2.2]

on T, q són els perfils de temperatura i humitat en la columna convectiva, T_R i q_R els perfils de referència i τ el temps d'ajust. Els perfils de referència seran diferents en funció de si la convecció és superficial o profunda.

En el cas de convecció no profunda, només s'efectua una redistribució d'energia entre la base i el cim del núvol, i no s'origina precipitació. Per a la convecció profunda, el perfil de referència es construeix de manera que l'entalpia total en el núvol es conservi

$$\int_{p_B}^{p_T} (H_R - \overline{H}) dp = 0$$
 [2.3]

on $H=c_PT + Lq$, i p_T i p_B són les pressions al cim i a la base del núvol, respectivament.

Llavors, la precipitació és igual a

$$PR = \int_{p_B}^{p_T} \left(\frac{q_R - \overline{q}}{\tau} \right) \frac{dp}{g} = -\frac{c_P}{L} \int_{p_B}^{p_T} \left(\frac{T_R - \overline{T}}{\tau} \right) \frac{dp}{g}$$
[2.4]

per tant, l'esquema no emmagatzema aigua líquida, i la precipitació se suprimeix si PR<0.

Per a construir el perfil de referència, en una primera aproximació s'especifica la humitat en tres nivells: base, cim i nivell de congelació, i s'estableix un gradient lineal entre ells. A continuació, es calculen la temperatura i la proporció de mescla a partir dels perfils de temperatura potencial i s'aplica una correcció al perfil de referència per complir l'equació [2.3].

Posteriorment es van introduir algunes modificacions (Janjić, 1994) ja que s'observava que amb el model de BM, es produien excessos de precipitació residual sobre zones d'aigua càlida i precipitació dèbil i molt escampada sobre els oceans. En els casos de convecció profunda, a més, l'ajust convectiu podia portar a canvis negatius de l'entropia, aspecte que calia solucionar. El canvi en l'entropia, donat per l'expressió

$$\Delta S = \sum \left(\frac{c_P \Delta T + L_{wv} \Delta q}{T} \right) \Delta p$$
[2.5]

serà una mesura de la intensitat dels transports verticals d'energia i humitat, també anomenats barreja convectiva.

Janjić també postula que les característiques bàsiques dels règims convectius vénen caracteritzades pel paràmetre anomenat "eficiència del núvol"

$$E = const_1 \frac{T\Delta S}{c_P \sum \Delta T\Delta p}$$
[2.6]

on const₁ és una constant adimensional i T la temperatura mitjana del núvol.

L'eficiència del núvol mesura l'habilitat de la columna convectiva de transportar verticalment entalpia i, al mateix temps, produir tan poca precipitació com sigui possible. Aquest esquema assumirà que el forçament convectiu és proporcional a una funció creixent de E.

A més, es defineix un nou temps de relaxació

$$\tau_1 = \frac{\tau}{F(E)}$$
[2.7]

de manera que és inversament proporcional a l'eficiència del núvol.

Malgrat tot, la principal diferència respecte la versió de BM és l'establiment d'un rang d'estats d'equilibri als quals la columna d'aire serà forçada al llarg de la seva història convectiva. Concretament, es predefineixen dos perfils que compleixen les següents característiques:

- a) Perfil sec, ràpid, amb predomini de l'estat de barreja (E elevada)
- b) Perfil lent, humit i mador, amb predomini de la producció de pluja (E baixa)

i la transició dels diferents perfils entre aquests dos es controla mitjançant l'eficiència.

Per altra banda, si amb aquests càlculs surt un canvi d'entropia negatiu o precipitació negativa, s'engeguen els càlculs corresponents a la convecció superficial.

Les darreres modificacions a aquest esquema s'han produït al NCEP, al llarg dels anys en què s'ha utilitzat per a parametritzar la convecció en el seu model operatiu Eta. Algunes d'aquestes modificacions inclouen (Skamarock et al, 2005).

- El canvi d'entropia ha de superar un valor mínim per iniciar la convecció profunda.
- En la cerca del cim del núvol, la partícula ascendent es barreja amb aire de l'ambient, i
- El treball de la força d'empenta en la partícula ascendent ha de superar un cert llindar positiu.



Figura 2.1. Perfils verticals de temperatura i humitat (línies vermella i verda) abans de l'ajust convectiu, juntament amb els perfils de referència (en blau). Al dibuix de l'esquerra, en la meitat de la dreta es representa el canvi en humitat després de l'ajust, mentre que a la meitat esquerra es mostra la humitat abans de l'ajust convectiu (Font: UCAR, 2000)

Una característica típica de l'esquema de BMJ és la forma dels radiosondatges resultants, que tenen una gran semblança amb els perfils de referència utilitzats en aquest esquema.

D'entre els seus avantatges, destaquen l'eficàcia en la reducció de la inestabilitat i el baix cost computacional, però com a inconvenients es troba que la utilització d'uns perfils de referència basats en dades observacionals provoca l'eliminació de les característiques de l'estructura vertical, i que sovint, quan la convecció s'inicia, produeix massa precipitació i impedeix que en instants de temps posteriors, o en zones situades en el sentit del vent, no n'hi caigui tanta (UCAR, 2000).

Per a disparar la convecció, es requereixen (UCAR, 2000):

- un valor mínim de CAPE,
- un gruix mínim pel núvol, i
- existència d'un perfil vertical humit.

2.2. Esquema de Grell-Dévényi (GD)

L'esquema de Grell-Dévényi tracta la parametrització de la convecció des d'una perspectiva diferent a la dels esquemes convencionals. Els autors parteixen de la base que les parametritzacions desenvolupades fins aleshores diferien, fonamentalment, en les hipòtesis de clausura i en els paràmetres utilitzats per a resoldre el problema de la interacció, donant lloc a una gran disparitat i incertesa en les possibles solucions (Grell i Dévényi, 2002).

La proposta de Grell i Dévényi consisteix en aprofitar totes les hipòtesis de clausura i varietat de paràmetres existents en les diferents parametritzacions dels cúmulus utilitzades en diversos models tridimensionals per desenvolupar una parametrització que les utilitzi a totes en conjunt. El nou esquema es basa en la parametrització desenvolupada per Grell (1993).

Grell planteja l'equació pel flux convectiu ascendent

$$\mu_{u} = \mu_{ue}(z,\lambda) - \mu_{ud}(z,\lambda) = \frac{1}{m_{u}(z,\lambda)} \frac{\partial m_{u}(z,\lambda)}{\partial z}$$
[2.8]

on μ_{ue} és el ritme d'entrada d'aire al flux ascendent (*entrainment*), μ_{ud} el ritme de sortida d'aire del flux ascendent (*detrainment*), m_u és el flux ascendent i λ representa el tipus de núvol. Pel flux descendent, l'expressió és anàloga. Els primers membres del conjunt de paràmetres als quals es donaran diferents valors són μ_{ud} (4 variacions), μ_{ue} (6 variacions), i μ_{dd} (6 variacions).

Seguint l'esquema de Grell, el flux en cada tipus de núvol es normalitza pel valor de flux a la base del núvol $m_b(\lambda)$, de manera que

$$m_u(z,\lambda) = m_b(\lambda)\eta_u(z,\lambda)$$
[2.9]

on $\eta_u(z,\lambda)$ és el flux normalitzat.

Si se suposa que part de l'aigua condensada s'evapora en el corrent descendent, es pot expressar aquest corrent com a funció del corrent ascendent mitjançant l'expressió

$$m_o(\lambda) = \beta(\lambda) \frac{I_1(\lambda)}{I_2(\lambda)} m_b(\lambda)$$
[2.10]

on $(1-\beta(\lambda))$ és l'eficiència de la precipitació, m_o el flux a l'origen del corrent descendent, i I₁(λ) i I₂(λ) són la fracció d'aigua condensada i evaporada dels fluxos ascendent i descendent dels núvols de tipus λ . A partir d'aquí, es pot utilitzar $\beta(\lambda)$ com a nou paràmetre al qual donar-li diferents valors (fins a 6), de tal manera que esdevé un nou subconjunt.

Tots els subconjunts definits abans pertanyen al control estàtic i al *feedback*, termes que Grell (1993) utilitza per referir-se, respectivament, a l'efecte del model de núvol a l'hora de determinar-ne les seves propietats i a la modulació de l'ambient mitjançant la convecció. Els altres subconjunts de paràmetres, en canvi, pertanyen al control dinàmic, és a dir, el control que fa l'ambient sobre la convecció.

Arakawa i Schubert (1974) defineixen la funció de treball del núvol, que és una mesura integral de l'empenta associada a un tipus λ de núvol. L'esquema de Grell suposa un equilibri entre el forçament a gran escala i la resposta del núvol, expressat segons

$$-\frac{A'(\lambda) - A(\lambda)}{dt} = \frac{A''(\lambda) - A(\lambda)}{m_b'(\lambda)dt} m_b(\lambda)$$
[2.11]

on A' (λ) és la funció de treball del núvol, calculada mitjançant camps termodinàmics que han estat modificats per termes de forçament, i A" és la funció de núvol que ha estat calculada utilitzant camps termodinàmics modificats per un núvol amb una massa unitària a la seva base de valor arbitrari m_b (λ) dt.

Calculant A de manera local, utilitzant les tendències de forçament donades per les variables a gran escala, i variant el seu valor 3 vegades, queda constituit el primer subgrup associat al control dinàmic. Un segon subgrup s'obté imposant a la funció de treball del núvol (A) 4 valors diferents extrets de la climatologia.

Per definir un tercer subconjunt en el marc de referència del control dinàmic, es pot assumir que l'estabilitat simplement s'elimina mitjançant la convecció, de manera que es compleix

$$-\frac{A(\lambda)}{(dt)_{c}} = \frac{A^{\prime\prime}(\lambda) - A(\lambda)}{m_{b}^{\prime}(\lambda)dt}m_{b}(\lambda)$$
[2.12]

que té l'efecte de fer $m_b(\lambda)$ suficientment fort per eliminar la inestabilitat en el període de temps especificat (dt)_c. Variant 3 vegades aquest període, s'obtenen els tres membres d'aquest tercer subconjunt.

Un altre subconjunt es basa en la idea introduïda per Kuo, on se suposa que la pluja total és proporcional a la integració vertical de l'advecció d'humitat M_{tv}

$$R = M_{tv} (1 + f_{emp}) (1 - b)$$
[2.13]

on b és el paràmetre d'humitat de Kuo i f_{emp} és una constant empírica. Si es combina aquesta expressió amb la que defineix la pluja donada pel conjunt format pels núvols de tipus λ (segons Grell)

$$R(\lambda) = I_1(\lambda)(1 - \beta)m_b(\lambda)$$
[2.14]

es pot calcular $m_b(\lambda)$ en termes de M_{tv}. Donant 3 valors diferents al paràmetre *b* de Kuo s'obtenen els tres membres del quart subconjunt.

Finalment, es pot utilitzar la hipòtesi de clausura introduïda per Brown el 1979 i modificada per Frank i Cohen el 1987, segons la qual, el flux a la base del núvol és proporcional al flux de l'ambient M a algun nivell troposfèric inferior l_t (per exemple, el cim de la capa fronterera planetària), de manera que

$$m_{h}(\lambda) = m_{u}(l_{t},\lambda) = M(l_{t}) - m_{d}(l_{t},t-\Delta t)$$
[2.15]

i donant 3 valors diferents a lt es configura el cinquè subgrup del control dinàmic.

Els 5 subconjunts del control dinàmic donen lloc a un total de 16 hipòtesis de clausura, i cada una d'elles es deixa interactuar amb qualsevol de les altres hipòtesis contemplades per al control estàtic i el feedback.

Com a resultat, el model proporciona un valor final del flux a la base del núvol m_b . Aquest valor s'obté com la mitjana ponderada dels m_b donats per les diferents hipòtesis de clausura contemplades, de manera que permet la possibilitat d'entrenar el model per donar pesos diferents a cada una de les hipòtesis de clausura. Malgrat això, en les implementacions actuals d'aquest esquema convectiu, cada opció té associada el mateix pes.

Per a inicialitzar la convecció, tots els membres del conjunt requereixen una CAPE positiva en els primers 4 km de la troposfera. A més, cada membre en particular pot tenir requeriments específics.

2.3. Esquema de Kain-Fritsch (KF)

La primera versió de l'esquema de Kain-Fritsch aparegué publicada el 1990, i estava basada en la parametrització de Fritsch i Chappell, publicada el 1980. Des de la primera versió de la parametrització de KF, s'han succeït diverses modificacions, motivades per l'intercanvi d'informació amb els usuaris de l'esquema, com ara modelitzadors o predictors meteorològics (Kain, 2004).

Per a determinar si s'activa la convecció en una determinada parcel·la, s'efectua la barreja de l'aire de les capes verticalment adjacents fins que l'altura de l'estrat és d'uns 60 hPa, i a continuació es calculen les característiques termodinàmiques de la barreja, així com l'altura i la temperatura de l'estrat al seu nivell de condensació per ascens (LCL). Com que normalment la temperatura de la parcel·la al LCL serà més baixa que la temperatura de l'ambient (amb la conseqüent empenta negativa), s'imposa una pertorbació de la temperatura relacionada amb la velocitat vertical resolta per l'escala de la malla w_g, segons l'expressió

$$\delta T_{VV} = k (w_g - c(z))^{\frac{1}{3}}$$
 [2.16]

on c(z) és una velocitat llindar que depèn de l'altitud del LCL. Si es compleix que $T_{LCL} + \delta$ $T_{VV} < T_{ambient}$, es descarta la parcel·la com a possible origen d'un corrent ascendent convectiu.

Kain i Fritsch (1990) proposen un model unidimensional de núvol, amb *entrainment* i *detrainment*. En aquest model, estableixen que el ritme d'entrada d'aire ambient en el corrent ascendent (conegut com *entrainment*) vé donat per la fórmula

$$\delta M_{e} = M_{u0} - \frac{0.03\delta p}{R}$$
 [2.17]

on R i M_{u0} són el radi de l'ascendència i el flux de massa a la base del núvol, respectivament. A continuació, es determina el flux total δM_t que entra a la regió de transició entre l'aire "net" i l'aire "nuvolós"

$$\delta M_t = \delta M_e + \delta M_u \tag{2.18}$$

on δM_u és la part corresponent a l'ascendència.

La partició entre δM_e i δM_u es realitza mitjançant una distribució de probabilitat f(x), i finalment, si x_e és la fracció de flux ambiental que dóna lloc a una barreja amb energia d'empenta neutral, el ritme net d'entrada d'aire ambiental és

$$M_{ee} = \delta M_t \int_0^{xc} x f(x) dx \qquad [2.19]$$

En la versió actual, no es permet que aquest ritme net baixi per sota del 50% del total d'aire ambiental que es barreja en l'ascendència. Això implica una dilució del flux ascendent.

Un altre dels requisits necessaris per activar la convecció profunda era l'existència d'un llindar constant pel mínim gruix potencial del núvol. Diverses observacions van mostrar que, amb temperatures properes als 0°C, la precipitació és possible per a núvols convectius relativament poc profunds. Això motivà que aquest llindar deixés de ser constant i fos funció de la temperatura del LCL.

Precisament, en l'esquema original, si no s'assolia el gruix mínim del núvol, l'esquema de parametrització de la convecció no actuava. En les versions recents, en canvi, es permet parametritzar també la convecció poc profunda, que s'inicia quan es compleixen tots els requisits per a l'activació de la convecció profunda excepte la superació del llindar de gruix del núvol mínim.

Finalment, una darrera modificació important pel model de núvol és la dependència de R (radi del núvol) en la magnitud de la velocitat vertical al nivell LCL.

Per altra banda, també es modifica la versió original de la formulació del flux descendent. Se suposa que les descendències s'originen en la capa a 150-200 hPa sobre la base del núvol, i que surten cap a fora sobre una capa profunda sota de la base del núvol. El flux de massa descendent s'estima com a funció de la humitat relativa i de l'estabilitat just a sobre de la base del núvol, però no es relaciona a la cisalla vertical del vent, com s'havia fet anteriorment.

En referència a la hipòtesi de clausura, l'esquema de KF estableix els fluxos verticals necessaris perquè almenys desapareixi almenys el 90% de la CAPE. En les primeres versions, la CAPE era determinada de la manera "tradicional", utilitzant una parcel·la d'aire en ascens sense diluir. Les versions recents d'aquest esquema calculen la CAPE a partir del camí que segueix una parcel·la que experimenta entraining, és a dir, que es dilueix. Això corregeix els excessos de CAPE que es trobaven abans, i evita les quantitats de precipitació massa elevades degudes a la necessitat de reduir més quanitat de CAPE.

Els perfils verticals de temperatura i humitat després d'aplicar-hi el model convectiu de Kain-Fritsch (veure figura 2.2) no mostren un patró característic, com seria el cas de l'esquema de BMJ, i generalment no donen massa canvis. De totes maneres, poden mostrar algunes característiques pròpies, com ara un lleuger escalfament i assecament de tota la columna d'aire, excepte als nivells baixos, on es pot produir un refredament significatiu. Com a conseqüència d'aquests canvis, una vegada ha actuat l'esquema de KF l'atmosfera esdevé molt estable.



Figura 2.2. A l'esquerra, representació del perfil vertical de temperatura i temperatura del punt de rosada per als estats pre-convectiu (línia discontínua) i post-convectiu (línia contínua). A la dreta, exemple conceptual dels processos produïts per l'activació de l'esquema de KF (UCAR, 2000).

D'entre els avantatges de l'esquema de KF destaquen (UCAR, 2000) que la hipòtesi de consum de la CAPE és adequada per escales de temps i espai curtes, que pot funcionar bé en casos de convecció severa i que la seva resposta varia en funció de l'escenari de pronòstic. La principal limitació és que tendeix a produir capes profundes saturades de manera no realista, amb la possibilitat que això comporta de què s'activi la precipitació explícita, donant com a resultat una pluja estratiforme que no s'observa en la realitat.

3. Mètodes de verificació

En aquest treball s'ha aplicat la verificació "punt a punt" per avaluar l'error dels pronòstics obtinguts amb cada una de les configuracions del WRF per als casos d'estudi escollits.

Aquests mètodes proporcionen un conjunt d'estadístics sobre el comportament del WRF segons la configuració utilitzada, i configuren la base per a determinar la sensibilitat dels pronòstics del model a les característiques de cada configuració. En aquest sentit, la configuració amb els valors estadístics més òptims es podrà considerar com la més adequada per a realitzar pronòstics operatius.

3.1. Verificació punt a punt

Per cada una de les simulacions en el domini més extern, de 36 km de pas de malla, s'han comparat punt a punt els camps previstos i analitzats de temperatura, geopotencial, vent i humitat relativa. Per a aquesta finalitat és necessari que el pronòstic i l'anàlisi estiguin projectats sobre la mateixa malla.

Els anàlisis que s'han comparat són els de les 00 i les 12 Z, per als horitzons de pronòstic compresos entre les 12 i les 72 hores des de l'inici de la simulació. Els anàlisis s'han generat mitjançant simulacions de 3 hores amb el WRF, sobre el domini de 36 km de pas de malla, inicialitzades amb l'anàlisi del GFS, i assimilant les mateixes dades convencionals (dades de superfície i radiosondatges) que s'utilitzen per a millorar el *first guess* de les simulacions.

La comparació entre camps pronosticats i analitzats consisteix en el càlcul de l'error del pronòstic:

$$E(i, j) = F(i, j) - A(i, j)$$
 [3.1]

on l'error E(i,j) és la diferència entre el camp previst F(i,j) i el camp analitzat A(i,j) al punt de malla (i,j).

Amb aquests valors, per a cada simulació, i per a cada nivell, horitzó de pronòstic i configuració, s'han calculat diversos estadístics sobre tots els punts del domini.

L'error mitjà (ME) sobre els punts d'un mapa

$$ME = \frac{1}{NxM} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \left[F(i,j) - A(i,j) \right] = \frac{1}{NxM} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} E(i,j)$$
[3.2]

serveix per determinar si el model, en conjunt, presenta algun biaix (si subestima o sobreestima) en el pronòstic de diverses variables, i l'arrel quadrada de l'error quadràtic mitjà (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{NxM} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} E(i, j)^{2}}$$
[3.3]

es pot interpretar com la magnitud típica de l'error (Wilks, 1995), ja que manté les unitats de la variable pronosticada.

Posteriorment, s'ha calculat la mitjana d'aquests índexs sobre totes les simulacions realitzades al domini de 36 km. D'aquesta manera es disposa d'una relació de l'error mitjà i del valor mitjà de RMSE comès en el pronòstic de cada variable segons l'horitzó de pronòstic, el nivell i la configuració utilitzada en la simulació.

Per altra banda, en cada un dels punts de la malla també s'ha calculat l'error mitjà i el RMSE sobre totes les simulacions, amb l'objectiu de detectar possibles característiques en la distribució espacial de l'error. Aquest mètode és comú en tasques de verificació de models operatius, quan principalment interessa conèixer l'habilitat d'un model en un punt o punts concrets (Drodowsky et al, 2003).

La distribució espacial de l'error també permet detectar en quina mesura els índexs globals responen a un comportament homogeni sobre totes les àrees o bé a una compensació de zones amb errors de magnitud baixa per altres amb errors de gran magnitud, o en el cas de l'error mitjà, la compensació de zones amb biaix positiu per altres amb biaix negatiu.

En aquest cas, les expressions de ME i de RMSE es diferencien de [3.2] i de [3.3], respectivament, en què els càlculs es realitzen sobre totes les simulacions:

$$ME(i,j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} E_k(i,j)$$
[3.4]

i

$$RMSE(i, j) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} E_k(i, j)^2}$$
 [3.5]

on *n* és el nombre total de simulacions considerades en aquest treball i $E_k(i,j)$ és l'error en el punt (i,j) de la simulació *k*.

Per a les magnituds vectorials també es pot calcular el mòdul del vector error, que en el cas del vent segueix l'expressió

$$VWE(i,j) = \sqrt{\left[u_F(i,j) - u_A(i,j)\right]^2 + \left[v_F(i,j) - v_A(i,j)\right]^2}$$
[3.6]

on u(i,j) i v(i,j) són els components del vent al punt (i,j) i els subíndexs F i A fan referència, respectivament, als camps pronosticat i analitzat. Com s'ha comentat anteriorment amb els índexs de magnituds escalars, també es pot determinar el valor mitjà del vector error sobre tots els punts del domini:

$$MVWE = \frac{1}{NxM} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} VWE(i, j)$$
[3.7]

o bé el valor mitjà de VWE per a cada punt, calculat sobre tot el conjunt de simulacions

$$MVWE(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} VWE_k(i, j)$$
 [3.8]

Finalment, per a certes magnituds escalars com el geopotencial o la temperatura, es pot calcular l'índex S1, que en lloc d'operar sobre valors pertanyents a un únic punt de malla, opera sobre les diferències entre els valors de punts de malla adjacents. El càlcul de S1 es realitza segons l'expressió

$$S1 = \frac{\sum_{Parells \ adjacents} |\Delta f - \Delta a|}{\sum_{parells \ adjacents} \max(|\Delta f|, |\Delta a|)} x100$$
[3.9]

Aquest índex serveix per comparar el gradient del camp meteorològic previst amb el gradient del camp analitzat. Es podria interpretar com una mesura de la similitud entre els sistemes meteorològics pronosticats i els observats. Valors baixos de S1 indiquen un bon acord (S1 = 0 significa un acord perfecte), mentre que un S1 elevat indica que els camps pronosticat i analitzat tenen gradients molt diferents.

Malgrat tot, aquest índex actualment s'utilitza poc, degut a alguns desavantatges, com el fet de no tenir en compte la magnitud de l'error, i de presentar una forta dependència en la mida del domini de pronòstic o en la situació meteorològica, concretament en la mida i la intensitat dels sistemes meteorològics (Wilks, 1995).

4. Metodologia

4.1. Disseny de les configuracions

4.1.1. Domini

Les malla de punts que s'ha utilitzat per a les simulacions del model WRF coincideix amb el domini que es fa servir per als pronòstics operatius del model MM5 al SMC. S'ha optat per aquesta malla perquè, a part de cobrir prou bé l'àrea d'interès, pel fet de ser la mateixa que utilitza l'MM5, la comparació del funcionament dels diferents models serà més clara i directa.

El domini té un pas de malla horitzontal de 36 km i es tracta d'una graella formada per 94x102 punts en cada nivell vertical. Engloba gran part de l'Europa Occidental i del nordoest d'Àfrica.

De cara a l'estudi que s'està realitzant per al SMC, s'han definit dos dominis niats, donant lloc a un conjunt final de tres dominis. D'aquests tres, el segon domini, niat al més extern, té un pas de malla tres vegades més petit que el del primer (12 km) i un nombre de punts substancialment inferior: 70x70. Engloba una part important de l'est de la Península Ibèrica i gran part de l'extrem nord occidental del Mediterrani.

Tots tres dominis tenen 31 nivells verticals, repartits de manera que la resolució vertical als nivells baixos és més elevada que en els nivells propers al cim de la troposfera. En aquest sentit s'han respectat els nivells verticals establerts per defecte pels desenvolupadors del WRF (Skamarock et al., 2005).



Figura 4.1. Domini utilitzat en aquest treball, juntament amb els altres dos utilitzats en l'estudi de viabilitat per a la utilització operativa del WRF al SMC.

4.1.2. Configuració de les simulacions i descripció del "downscaling"

El model WRF-ARW, en la seva versió 2.2, es pot inicialitzar amb diversos models globals (Global Forecast System, European Center for Medium-range Weather Forecast, etc) i permet la ingestió de dades observacionals convencionals de superfície i d'alçada (METAR i radiosondatges). Durant la simulació es pot escollir un ampli ventall de parametritzacions físiques de la radiació, capa fronterera planetària, convecció, processos del subsòl o microfísica de núvols.

En aquest estudi, cada una de les simulacions s'ha repetit mantenint les mateixes condicions inicials i de contorn (taula 4.1) i les mateixes parametritzacions físiques, excepte les de la convecció, que s'han anat canviant per determinar quin era el seu efecte en el funcionament del model (taula 4.2).

De totes maneres, no s'ha volgut perdre de vista que un dels objectius del treball futur serà millorar les previsions de la precipitació. Com que la parametrització de la microfísica de núvols juga un paper important en els pronòstics d'aquesta variable, s'ha optat per fer les simulacions provant també dos esquemes de microfísica.

DOMINI	Pas de malla horitzontal	Dimensions	Pas d'integració	Condicions inicials	Condicions de contorn
1	36 km	94 x 102 x 31	216 s	GFS 1° Pronòstic 12h	Sortida del GFS 1º - Freqüència: 6 hores
2	12 km	70 x 70 x 31	72 s	GFS 1° Pronòstic 12h	Sortida del domini 1 - Freqüència: 216 s
3	4 km	88 x 88 x 31	24 s	GFS 1° Pronòstic 12h	Sortida del domini 2 - Freqüència: 72 s

Taula 4.1. Característiques dels dominis (pas de malla horitzontal, dimensions) i de les simulacions que s'hi efectuen (pas d'integració temporal, condicions inicials i de contorn). El domini 1 és l'utilitzat en els resultats que es presenten en el treball, i els dominis 2 i 3 es faran servir al llarg de les properes fases de l'estudi en desenvolupament per al SMC.

Parametritzacions variables	Parametritzacions fixes				
 Microfísica de núvols: WSM5 (5 espècies) Thompson (7 espècies) Convecció: Kain-Fritsch (KF) Betts-Miller-Janjic (BMJ) Grell-Dévényi (GD) 	Radiació: Ona curta: Dudhia Ona llarga: Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) Capa fronterera planetària: Yonsei University (YSU) Capa superficial: Monin-Obukhov (MM5) Superfície: Noah-Land Surface Model				
	(4 capes)				

Taula 4.2. Parametritzacions físiques (fixes i variables) utilitzades en les simulacions.

Per a escollir les parametritzacions que s'han deixat fixes, s'han tingut en compte les parametritzacions anàlogues que s'utilitzen en les simulacions operatives al SMC amb el model MM5 i les opcions que han escollit diversos investigadors que han treballat amb el WRF i han publicat els seus resultats en revistes especialitzades o congressos.

D'aquesta manera, tenint en compte que hi ha 3 parametritzacions de la convecció disponibles en el WRF-ARW (versió 2.2) i que s'han combinat amb dos esquemes de microfísica anomenats WSM5 i de Thompson, s'obtenen 6 configuracions del model. D'aquesta manera, cada simulació s'ha repetit un total de 6 vegades.

Els estudis realitzats per a dos episodis convectius recents (Mercader et al., 2007) van constatar que els pronòstics en els dominis niats eren sensibles a les parametritzacions escollides en els dominis exteriors dels quals provenien, efecte que es pot anomenar "influència del domini mare".

Això implica que, per a un anàlisi exhaustiu de la influència de les parametritzacions de la convecció en el funcionament del WRF, totes les simulacions en els dominis niats s'haurien de repetir per a cada una de les simulacions del domini mare del qual provenen.

Davant la complicació que suposaria processar un volum tan gran d'informació, amb la conseqüent dificultat d'extreure'n conclusions clares, s'optà per seguir un procediment més pràctic.

Com que l'objectiu del projecte que la UB porta a terme pel SMC és l'estudi de la possibilitat d'implementar el WRF com a model operatiu, i com que els recursos informàtics que es destinen a tasques operatives no permetrien fer córrer diverses simulacions de manera simultània, en primer lloc s'escull la millor combinació de parametritzacions de microfísica i de la convecció per al domini exterior.

Partint d'aquesta configuració, ja amb unes parametritzacions fixades de la convecció i la microfísica de núvols comunes per a tots els casos d'estudi, es fan les diverses simulacions per al seu domini niat.

Finalment, cal destacar que les condicions de contorn en els dominis niats a partir dels respectius dominis mare seran generats mitjançant *one-way nesting*, amb una freqüència igual al pas d'integració utilitzat pel domini mare.

4.2. Casos d'estudi escollits

Per a estudiar la sensibilitat dels pronòstics del WRF a la parametrització de la convecció, s'han escollit diversos casos d'estudi en els quals es van registrar precipitacions, tots ells compresos entre el juny de 2006 i el març de 2007 (taula 4.3). Dins d'aquest conjunt de casos, hi ha uns quants episodis en què les pluges van tenir un caràcter clarament convectiu, mentre que la resta corresponen simplement a situacions de pluja abundant, definició que s'aplicarà per fer referència a casos sense una presència clara de la convecció.

Presència de convec	cció	Precipitació abundant			
5 i 6 de juliol de 2006	(4 sim)	15 i 16 de juny de 2006	(4 sim)		
23 – 25 d'agost de 2006	(6 sim)	24 de setembre de 2006	(2 sim)		
12 – 16 de setembre de 2006	(9 sim)	11 i 12 d'octubre de 2006	(3 sim)		
17 – 20 d'octubre de 2006	(7 sim)	8 de febrer de 2007	(2 sim)		
7 de març de 2007	(2 sim)	17 de febrer de 2007	(2 sim)		
16 de març de 2007	(2 sim)				

Taula 4.3. Casos d'estudi escollits i, entre parèntesi, nombre de simulacions efectuades per a cada cas d'estudi.

5. Resultats

5.1. Temperatura

Com a característica general, la magnitud de l'error disminueix des dels 850 hPa a 300 hPa en totes les configuracions, i augmenta amb l'horitzó de pronòstic.

En molts nivells resulta difícil distingir una configuració que funcioni millor que les altres, així com determinar característiques específiques del funcionament d'una configuració concreta.

Realment, és necessari un anàlisi acurat dels valors dels diferents índexs, tan globals (valor mitjà sobre tots els punts de la malla) com distribuïts sobre el mapa (índex per a cada punt del domini) per extreure alguna tendència discernible que caracteritzi la sensibilitat dels pronòstics de temperatura a cada configuració.

5.1.1. ME

Amb els valors de l'error mitjà sobre tots els punts de la malla (figura 5.1), es pot constatar com el WRF tendeix, a sobreestimar la temperatura al nivell de 300 hPa i a subestimar-la als 850 i 950 hPa. Als 500 i 700 hPa es detecten biaixos lleugerament positius i negatius, respectivament, però la seva magnitud és molt més petita.

En general, el caràcter positiu o negatiu del biaix s'incrementa amb l'horitzó de pronòstic. Una verificació anterior del model MM5 sobre el mateix domini (però amb un pas de malla de 45 km) també detectava subestimació de la temperatura a 850 hPa, i un biaix proper a zero als 500 i 300 hPa (RAM, 2005).

S'observa, a més, com el biaix té dependència amb l'hora del dia. En aquest sentit, per a les hores diürnes (horitzons de 12, 36 i 60 hores en les simulacions de les 00Z i els horitzons de 24, 48 i 72 h en les simulacions de les 12Z) l'error mitjà tendeix clarament cap als valors positius a 500 hPa (figures 5.1g,h) i menys negatius a 700 hPa (figures 5.1e,f), mentre que al nivell més baix aquest comportament es troba invertit (figures 5.1a,b), i a les hores diürnes la subestimació és més destacada que a les hores nocturnes, de manera que es pot interpretar que el WRF no escalfa prou els nivells més baixos de l'atmosfera, especialment durant el dia.

La comparació dels resultats obtinguts amb les diferents configuracions mostra com les simulacions que han utilitzat l'esquema de BMJ per a la convecció presenten un comportament més esbiaixat respecte les altres a gairebé tots els nivells, excepte a 950 hPa, on esdevenen les simulacions amb ME de menor magnitud. De fet, l'esquema convectiu de BMJ és el que té menys punts en comú amb els altres dos, de manera que no és estrany que els resultats obtinguts amb les simulacions que l'han utilitzat presentin diferències importants respecte les simulacions realitzades amb els esquemes de KF o GD.

En general, les configuracions que han utilitzat la parametrització de la convecció de KF donen un biaix de menor magnitud; però concretament als nivells de 850 i 300 hPa, destaca especialment amb un biaix més proper a zero la configuració que, juntament amb KF, ha utilitzat l'esquema microfísic WSM5.



Figura 5.1. Error mitjà de la temperatura corresponent a cada configuració segons l'horitzó de pronòstic (nivells i hores d'inicialització especificades a sota de cada gràfica).

Precisament, en referència als esquemes de microfísica, es detecta que les configuracions que han fet servir Thompson tendeixen a pronosticar temperatures més elevades de les que s'obtenen amb les configuracions que utilitzen WSM5.

La distribució espacial de l'error mitjà mostra que la localització de les zones on apareixen els errors de més magnitud, siguin de signe positiu o negatiu, no varia molt entre les diferents configuracions pel conjunt de casos d'estudi que s'han tingut en compte. La variació que es pot detectar en l'error mitjà entre diferents configuracions es dóna en la magnitud del seu valor.

La representació espacial a 300 hPa (figures A1) mostra diferències entre les simulacions de les 00Z i de les 12Z: en les primeres el ME és més homogeni, mentre que les segones presenten valors de ME més contrastats. Les zones muntanyoses, com els Pirineus o els Alps, tenen un biaix més desplaçat cap a valors negatius respecte el biaix positiu predominant; concretament, per a horitzons de pronòstic curts, apareix subestimació de la temperatura en aquestes zones, mentre que en els horitzons més llargs (a partir de 36 hores) el biaix es manté negatiu als Alps i esdevé positiu, però de magnitud inferior al de les zones properes, als Pirineus.

Al nivell de 500 hPa, i en totes les configuracions, s'observa un fort contrast entre zones amb biaix de diferent signe en les simulacions inicialitzades a les 00Z, fet que no es dóna amb tanta intensitat en les simulacions de les 12Z. A sobre de Catalunya, la configuració que utilitza KF i WSM5 (figures A2) és la que dóna el ME més proper a zero en un nombre més gran de casos. Per altra banda, en aquest nivell no s'observa la influència dels sistemes muntanyosos que s'havia vist a 300 hPa.

Als 700 hPa (figures A3), destaquen d'una banda, el comportament clarament diferenciat respecte les altres configuracions d'aquelles que utilitzen BMJ (amb una subestimació de la temperatura molt marcada, veure figures 5.2 a i d) i de l'altra banda, el contrast entre zones amb biaix positiu i negatiu, de manera que l'error mitjà global, que surt proper a zero, no respon a un valor homogeni sobre tot el domini. En la zona més propera a Catalunya destaca la diferència entre els biaixos al nord i al sud dels Pirineus, de manera que al nord la temperatura sempre és sobreestimada i al sud, no tant sobreestimada o fins i tot, subestimada. La configuració que proporciona els biaixos menys contrastats, almenys a la zona propera a Catalunya, és KF i WSM5.

Finalment, a 850 hPa (figures A4) destaca la subestimació de la temperatura a pràcticament tot el domini tal com s'havia detectat, també, per a l'MM5 (i no per al MASS) en el treball de verificació dels models operatius al SMC (RAM, 2005). Tanmateix, hi ha zones amb sobreestimació de la temperatura, i el contrast entre aquestes àrees i aquelles on es produeix subestimació de la temperatura és més marcat a les hores diürnes que a les nocturnes, tal com és d'esperar en aquest nivell, que al ser relativament baix, rep més directament les conseqüències de l'escalfament del sòl. De nou, les simulacions amb la parametrització de KF proporcionen els resultats amb menys biaix a l'àrea propera a Catalunya.



Figura 5.2. Distribució geogràfica del ME per al pronòstic (inicialitzat a les 00Z) a 24 hores de la temperatura a 850 hPa, amb les configuracions especificades en cada imatge.

5.1.2. RMSE

Només en els dos nivells més baixos i a 300 hPa es poden distingir algunes diferències entre els valors de RMSE de les diferents configuracions. S'aprecia, a més, un error lleugerament superior en les simulacions inicialitzades a les 12Z. Aquest fet pot estar causat per les condicions inicials a aquesta hora del dia, ja que l'escalfament diürn provoca que els camps meteorològics tinguin estructures més complexes al migdia que no pas a la nit.

Concretament, a 300 hPa les configuracions amb la microfísica de núvols de WSM5 donen millor resultat que les que han utilitzat Thompson, de manera que per aquest nivell es pot afirmar que la sensibilitat de les prediccions de temperatura a la microfísica de núvols és superior a la sensibilitat a la parametrització de la convecció. Als 850 hPa, el RMSE més petit correspon a les simulacions que han utilitzat KF i WSM5, i en canvi, als 950 hPa, el millor resultat el proporcionen les configuracions amb la parametrització de la convecció de BMJ, seguides de la configuració de KF amb WSM5.

Els RMSE obtinguts segons la configuració, per a cada nivell i per als horitzons de pronòstic des de 12 a 48 hores, es representen a les taules 5.1 a 5.5. També es proporcionen els valors de RMSE obtinguts en un estudi de verificació dels models MASS i MM5 (amb pas de malla de 45 km, ambdós operatius al SMC) entre el juny de 2003 i el maig de 2004 (RAM, 2005). Els valors màxims i mínims de RMSE per les configuracions del WRF s'han representat amb els colors vermell i blau, respectivament, en els casos en què aquests extrems mostren una diferència més notable.

A partir d'aquestes taules es poden veure clarament les característiques del RMSE per al pronòstic de la temperatura comentades més amunt, com ara la poca diferència entre els RMSE produïts per les diferents configuracions als nivells de 500 i 700 hPa, o els valors més baixos que proporcionen les simulacions de les 00Z respecte les inicialitzades a les 12Z.

Es pot comparar la magnitud dels RMSE obtinguts pel WRF en aquests casos d'estudi amb els respectius índexs determinats en la verificació del MASS i el MM5 al SMC entre 2003 i 2004. S'aprecia que el RMSE del WRF és més petit que el RMSE del MASS als nivells de 850 i 500 hPa, mentre que als 300 hPa els RMSE d'ambdós models tenen valors similars. Respecte l'MM5, el WRF dóna un RMSE lleugerament inferior per algunes configuracions als 850 hPa, però als 500 i 300 hPa, el dóna més gran en tots els casos.

RMSE de la temperatura a 950 hPa (°C)										
Horitzó	+ 1	2 h	+ 24 h		+ 36 h		+ 48 h			
Inicialització	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z		
KF.wsm5	1.27	1.31	1.48	1.52	1.66	1.65	1.70	1.78		
GD.wsm5	1.32	1.34	1.61	1.68	1.89	1.85	1.95	2.06		
BMJ.wsm5	1.28	1.30	1.45	1.44	1.60	1.58	1.70	1.74		
KF.thom	1.25	1.31	1.47	1.51	1.66	1.66	1.73	1.81		
GD.thom	1.31	1.35	1.60	1.69	1.91	1.86	1.97	2.09		
BMJ.thom	1.28	1.32	1.46	1.45	1.60	1.59	1.70	1.74		

Taula 5.1. RMSE sobre totes les simulacions del pronòstic entre 12 i 48 hores de la temperatura al nivell de 950 hPa, obtingut per a cada una de les configuracions. En blau es representen els valors mínims de RMSE, i en vermell els màxims.

RMSE de la temperatura a 850 hPa (°C)									
Horitzó	+ 1	2 h	+ 2	+ 24 h		+ 36 h		+ 48 h	
Inicialització	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	
KF.wsm5	1.05	1.15	1.27	1.32	1.43	1.49	1.55	1.63	
GD.wsm5	1.08	1.19	1.33	1.38	1.51	1.60	1.68	1.73	
BMJ.wsm5	1.08	1.17	1.31	1.35	1.50	1.55	1.62	1.71	
KF.thom	1.06	1.16	1.30	1.35	1.47	1.54	1.60	1.68	
GD.thom	1.09	1.19	1.34	1.39	1.52	1.61	1.68	1.75	
BMJ.thom	1.08	1.17	1.31	1.36	1.49	1.55	1.62	1.71	
MASS*			1.56	1.57					
MM5*			1.34	1.35					

Taula 5.2. RMSE sobre totes les simulacions del pronòstic entre 12 i 48 hores de la temperatura al nivell de 850 hPa, obtingut per a cada una de les configuracions, i (*)RMSE del pronòstic a 24 hores obtingut en els treballs de verificació del MASS i l'MM5 al SMC. En blau es representen els valors mínims de RMSE, i en vermell els màxims.

RMSE de la temperatura a 700 hPa (°C)										
Horitzó	+ 1	2 h	+ 24 h		+ 36 h		+ 48 h			
Inicialització	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z		
KF.wsm5	0.81	0.83	0.97	1.00	1.10	1.13	1.26	1.21		
GD.wsm5	0.82	0.84	0.98	1.00	1.10	1.14	1.27	1.22		
BMJ.wsm5	0.82	0.86	0.99	1.00	1.09	1.15	1.27	1.22		
KF.thom	0.81	0.83	0.97	1.00	1.10	1.13	1.26	1.22		
GD.thom	0.81	0.83	0.98	0.99	1.10	1.14	1.27	1.22		
BMJ.thom	0.81	0.85	0.98	0.99	1.09	1.15	1.26	1.22		

Taula 5.3. RMSE sobre totes les simulacions del pronòstic entre 12 i 48 hores de la temperatura al nivell de 700 hPa, obtingut per a cada una de les configuracions.

RMSE de la temperatura a 500 hPa (°C)									
Horitzó	+ 1	2 h	+ 2	4 h	+ 3	6 h	+ 48 h		
Inicialització	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	
KF.wsm5	0.73	0.76	0.92	0.90	0.98	1.08	1.18	1.27	
GD.wsm5	0.74	0.77	0.93	0.92	0.99	1.09	1.18	1.26	
BMJ.wsm5	0.75	0.76	0.93	0.90	0.99	1.09	1.18	1.26	
KF.thom	0.72	0.76	0.91	0.90	0.98	1.07	1.17	1.25	
GD.thom	0.73	0.76	0.92	0.91	0.98	1.08	1.18	1.25	
BMJ.thom	0.73	0.75	0.92	0.89	0.98	1.08	1.18	1.25	
MASS*			1.14	1.12					
MM5*			0.85	0.82					

Taula 5.4. RMSE sobre totes les simulacions del pronòstic entre 12 i 48 hores de la temperatura al nivell de 500 hPa, obtingut per a cada una de les configuracions, i (*)RMSE del pronòstic a 24 hores obtingut en els treballs de verificació del MASS i l'MM5 al SMC.

RMSE de la temperatura a 300 hPa (°C)										
Horitzó	+ 1	2 h	+ 2	+ 24 h		+ 36 h		+ 48 h		
Inicialització	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z	00 Z	12 Z		
KF.wsm5	0.79	0.83	0.96	1.01	1.10	1.18	1.27	1.33		
GD.wsm5	0.79	0.83	0.97	1.01	1.10	1.19	1.26	1.34		
BMJ.wsm5	0.80	0.83	0.97	1.00	1.12	1.18	1.27	1.34		
KF.thom	0.82	0.85	0.99	1.03	1.13	1.20	1.30	1.38		
GD.thom	0.82	0.85	1.00	1.02	1.13	1.21	1.30	1.39		
BMJ.thom	0.83	0.85	1.01	1.02	1.15	1.20	1.31	1.39		
MASS*			1.03	1.03						
MM5*			0.87	0.86						

Taula 5.5. RMSE sobre totes les simulacions del pronòstic entre 12 i 48 hores de la temperatura al nivell de 300 hPa, obtingut per a cada una de les configuracions, i (*)RMSE del pronòstic a 24 hores obtingut en els treballs de verificació del MASS i l'MM5 al SMC. En blau es representen els valors mínims de RMSE, i en vermell els màxims.

Cal destacar que als nivells de 850 i 950 hPa, la relació entre els RMSE globals de les diferents configuracions es manté al llarg de tots els casos d'estudi (vegeu figures 5.3 i 5.4); és a dir, les configuracions que, globalment, han donat un RMSE més baix o més elevat, també han produït el RMSE més baix o més elevat en la majoria de simulacions particulars.

Aquest fet, que també s'observa per a certs nivells i horitzons de pronòstic en els valors de ME, és de gran importància, ja que en pocs casos els valors globals de ME i RMSE obtinguts en cada configuració són significativament diferents dels respectius índexs donats per les altres configuracions, degut a la pròpia fluctuació de l'error al llarg de tots els casos d'estudi. D'aquesta manera, el fet que determinades configuracions ofereixin els resultats més òptims en la majoria de simulacions en particular, ajuda a concloure quina d'elles pot esdevenir una bona candidata per a realitzar els pronòstics operatius.



Figura 5.3. RMSE del pronòstic de la temperatura a 850 hPa per a cada una de les 23 simulacions inicialitzades a les 00Z (a, b, c) i per cada una de les 20 simulacions de les 12Z.



Figura 5.4. RMSE del pronòstic de la temperatura a 950 hPa per a cada una de les 23 simulacions inicialitzades a les 00Z (a, b, c) i per cada una de les 20 simulacions de les 12Z.

Pel que fa a la distribució espacial, a 300 hPa (figura A5) s'observa una zona amb RMSE elevat limitada sobre el sector occidental del Mediterrani, mentre que a l'àrea propera als Pirineus, l'error és relativament més baix. A sobre de Catalunya, les configuracions amb RMSE més petit són les que fan servir KF o GD per a la convecció juntament amb l'esquema microfísic WSM5.

En canvi, als 500 hPa (figura A6), per a horitzons de pronòstic de 12 o 24 hores, els millors resultats sobre Catalunya es donen amb les configuracions de BMJ, però per a horitzons llargs, hi ha menys error en les configuracions que també funcionen millor als 300 hPa (KF amb WSM5 i GD amb WSM5). Als 500 hPa, a més, s'observen dos màxims d'error al nord, que podrien estar associats al pas de depressions fredes i als errors en la seva localització.

A 850 hPa (figura A8), destaca la diferència en RMSE entre les simulacions inicialitzades a les 00Z i a les 12Z, molt més elevat en aquestes darreres, sobretot a la zona de la Península Ibèrica. L'error més elevat es troba, en general, sobre les àrees continentals. A Catalunya, la configuració que dóna un RMSE més baix és la que utilitza la convecció de KF, sobretot per als horitzons de pronòstic de 48 i 72 hores.

Per altra banda, les simulacions de les 00Z mostren, per a tots els nivells entre 850 i 500 hPa, un màxim d'error centrat a la Península Ibèrica (figures A6-A8), i un altre de secundari més a l'oest, davant la costa de Portugal. Si es compara amb les figures del ME (figures A2-A4) es detecta com aquest error correspon a una sobreestimació de la temperatura a 500 hPa i una subestimació a 850 hPa. Aquest fet pot ser degut a una activació massa intensa dels esquemes convectius durant les hores diürnes, que explicaria l'escalfament als nivells superiors i el refredament als nivells baixos que dóna el model.

5.2. Altura geopotencial

Els pronòstics del WRF d'altura geopotencial es verifiquen a partir dels índexs ME, RMSE i S1. Aquest darrer índex, com ja s'ha dit a la secció 3.1, dóna compte de l'encert del model en el pronòstic dels gradients, i pràcticament només s'utilitza per la verificació dels camps de geopotencial i de pressió atmosfèrica a nivell del mar.

L'error comès en l'estimació del geopotencial creix amb l'horitzó de pronòstic, tal com és d'esperar, però a diferència del que s'ha observat en la temperatura, és més elevat en els nivells més alts que en els més baixos. Les principals diferències entre configuracions es troben en l'índex de l'error mitjà i, en menor intensitat, en S1; en el RMSE no s'observen diferències notables entre els valors donats per les diferents configuracions. Tal com passava amb la temperatura, es detecta un error més elevat en les simulacions inicialitzades a les 12 Z.

5.2.1. ME

L'error mitjà del pronòstic del geopotencial varia poc amb l'alçada, i és sempre negatiu; és a dir, en qualsevol de les configuracions analitzades, el WRF subestima sempre l'altura geopotencial.

En les corbes que representen el ME en funció de l'horitzó de pronòstic (figures 5.5a-i) hi ha un aspecte que destaca clarament: totes les corbes tenen la mateixa forma a tots els nivells. Això indica que el comportament del WRF en el pronòstic de l'altura geopotencial és homogeni en totes les capes de la troposfera.

Una altra característica que crida l'atenció, en aquestes corbes, és el mínim que assoleix a tots els nivells l'error mitjà al voltant de l'horitzó de pronòstic de 36 hores en les simulacions de les 00 Z i entre els horitzons de 24 i 36 hores en les simulacions de les 12Z. Aquest fet no es pot atribuir a l'efecte d'uns casos d'estudi en particular que hagin desviat el ME cap a valors tan baixos, ja que el ME sobre el domini calculat per a cada una de les simulacions (figura 5.6) als horitzons de pronòstic afectats per aquesta anomalia dóna un conjunt de valors molt similars en magnitud, tots ells més baixos que els ME corresponents als horitzons de pronòstic més curt i més llarg.

Comparant les diferents configuracions, aquelles que han utilitzat la microfísica de núvols de Thompson donen el biaix de menor magnitud a 300 hPa, tal com s'observava també en el cas de la temperatura. Als nivells de 500 i 700 hPa, el biaix més reduït s'ha obtingut amb la configuració que combina KF i WSM5, a 850 hPa, amb la configuració de BMJ i WSM5, i a 950 hPa, la configuració amb biaix més proper a zero ha estat la de GD i WSM5. De fet, exceptuant el nivell de 300 hPa, en cada parella de configuracions que utilitzen la mateixa parametrització de la convecció, aquelles que utilitzen la microfísica de WSM5 no subestimen tant l'altura geopotencial.



Figura 5.5. Error mitjà de l'altura geopotencial corresponent a cada configuració segons l'horitzó de pronòstic (nivells i hores d'inicialització especificades a sota de cada gràfica).


Figura 5.6. Error mitjà de l'altura geopotencial a 500 hPa per a totes les simulacions inicialitzades a les 00Z (a, b, c) i per a les simulacions del mateix nivell inicialitzades a les 12Z (d,e.f). Cada gràfica correspon a l'horitzó de pronòstic especificat a sota de la imatge.

La distribució espacial del ME, als 300 hPa (figures A9), no és homogènia, sinó ben contrastada: al nord d'Àfrica s'hi localitza una extensa zona amb una marcada subestimació del geopotencial, mentre a l'extrem oriental del domini hi trobem gairebé sempre una sobreestimació. A sobre de Catalunya el biaix oscil·la entre valors positius i negatius, de valor absolut reduït (0-20 metres geopotencials). Les configuracions de GD i KF amb la microfísica de WSM5 donen els biaixos més propers a zero sobre Catalunya.

Tant a 500 hPa com a 700 hPa (figures A10 i A11), en canvi, la distribució espacial del biaix és més homogènia, i la subestimació del geopotencial és present, en menor o major intensitat, a tot el domini. Tan sols les zones amb sistemes muntanyosos importants (Alps, Pirineus) i la zona situada a l'extrem oriental del domini sobresurten amb valors positius del ME, fet que coincideix amb els resultats trobats per a l'estiu a 500 hPa en un treball de verificació previ de l'MM5 sobre el mateix domini (RAM, 2005). A Catalunya, en totes les configuracions, per la presència dels Pirineus, el biaix oscil·la entre valors positius i negatius, en general de menor magnitud que els produïts a 300 hPa.

A 850 hPa (figures A12), el ME encara és més homogeni sobre tot el domini que en els nivells superiors, amb la majoria d'àrees amb biaix negatiu, o positiu i de poca magnitud. La configuració que presenta un biaix més proper a zero a Catalunya és BMJ amb WSM5. Tant en aquest nivell com als 700 hPa es detecta, per a les simulacions inicialitzades a les 12Z, una àrea al mig del mar amb subestimació de l'altura geopotencial. Aquesta àrea coincideix també amb una sobreestimació de la temperatura en els mateixos nivells (veure figures A3 i A4); sembla, doncs, que en algun dels casos d'estudi, el WRF ha assignat en aquesta zona alguna depressió que, en cas de produir-se, no va ser tan intensa com la va predir el model.

També es pot destacar que la diferència entre els camps pronosticat i analitzat a les hores diürnes (pronòstics a 24, 48 i 72 hores inicialitzats a les 12Z) tenen un patró molt més complex que els mapes corresponents al mateix horitzó de pronòstic però vàlids per a les hores nocturnes. Això respon al fet que ja s'ha comentat abans en relació a la complexitat dels camps meteorològics a les hores centrals del dia.

5.2.2. RMSE

Tal com s'havia detectat en la temperatura, els valors de RMSE de les diferents configuracions són molt semblants entre ells (veure figura 5.7), de manera que no es pot determinar clarament quina d'elles dóna un millor resultat en aquest índex.

El RMSE presenta una evolució creixent amb l'horitzó de pronòstic. La magnitud de l'error varia molt poc amb l'alçada en els nivells més baixos (entre 950 i 700 hPa), però augmenta als nivells més elevats, a diferència de la tendència que s'ha mostrat per a la temperatura.

Per il·lustrar aquest comportament, a la taula 5.6 es mostren els valors de RMSE donats per la configuració de KF i WSM5 (els resultats obtinguts amb les altres són bastant similars). Respecte els resultats de la verificació del MASS i el MM5 portada a terme al SMC (RAM, 2005), el WRF ha donat uns RMSE més baixos que els del MASS, i també lleugerament més baixos que els del MM5 per a les simulacions de les 00Z; per a les simulacions de les 12Z són lleugerament superiors als del MM5.

RMSE de l'altitud geopotencial (m) : WRF										MM5*		MASS*	
Horitzó	+ 1	2 h	+ 24 h		+ 36 h		+ 48 h		+ 24 h		+ 24 h		
Inicialització	00	12	00	12	00	12	00	12	00	12	00	12	
950 hPa	9.9	10.5	12.1	13.8	15.9	16.0	16.1	18.3					
850 hPa	10.0	10.5	11.7	13.8	15.8	16.0	15.6	17.9	13.5	12.5	14.0	14.2	
700 hPa	10.2	11.1	12.1	14.4	16.6	17.4	17.0	19.3					
500 hPa	10.9	12.6	14.3	16.0	18.7	20.4	20.8	23.2	14.8	15.1	17.4	18.7	
300 hPa	13.1	15.0	17.8	19.3	22.1	25.9	28.3	31.9	18.8	19.3	21.3	22.6	

Taula 5.6. RMSE sobre totes les simulacions del pronòstic entre 12 i 48 hores de l'altura geopotencial als diferents nivells, amb la configuració de KF i WSM5, i (*)RMSE del pronòstic a 24 hores obtingut en els treballs de verificació del MASS i l'MM5 al SMC.



Figura 5.7. RMSE de l'altura geopotencial corresponent a cada configuració segons l'horitzó de pronòstic (nivells i hores d'inicialització especificades a sota de cada gràfica).

La distribució espacial del RMSE mostra, al nivell de 300 hPa (figures A13), un màxim d'error que se situa en diferents posicions segons l'horitzó de pronòstic i l'hora de simulació: per al pronòstic a 24h inicialitzat a les 00Z es troba sobre el Golf de Lleó, i per a les 36 hores de la mateixa simulació, sobre la costa d'Argèlia. A partir de les 48 hores de pronòstic, independentment de l'hora d'inicialització, el RMSE màxim augmenta de valor i agafa zones més extenses del domini, amb un fort contrast entre els errors molt elevats al nord i més baixos al sud.

Als 500 hPa (figures A14), pels horitzons de pronòstic més curts, les simulacions inicialitzades a les 00Z tenen un RMSE més baix que les inicialitzades a les 12Z, que presenten un error màxim molt marcat al nord d'Àfrica i estès a bona part del Mediterrani. Pels horitzons més llargs (60 i 72 hores), sobretot en les simulacions inicialitzades a les 00Z, comença a augmentar notablement l'error pel nord del domini, mentre al sud queda un RMSE més petit. A sobre del Pirineu, el RMSE presenta un mínim respecte el seu entorn.

Als 700 hPa (figures A15), es pot destacar que, a sobre de Catalunya, per a les simulacions de les 00Z, les configuracions amb BMJ són les que donen un resultat pitjor. En canvi, en les simulacions inicialitzades a les 12Z, les configuracions amb un error més gran han estat les de GD. L'augment del RMSE pel nord a partir dels horitzons de pronòstic més llargs també es detecta en aquest nivell en la simulació de les 00Z. Precisament, aquest error elevat al nord està causat pel pas de depressions sobre aquesta zona, ja que petits desplaçaments entre la localització prevista i la observada dels centres d'aquests sistemes atmosfèrics, al presentar gradients de geopotencial molt marcats, donen lloc a quantitats elevades de RMSE.

Finalment, als 850 hPa (figures A16), en les simulacions de les 00Z, l'augment del RMSE amb la latitud ja es deixa notar a partir dels pronòstics a 24 hores, mentre que en les simulacions de les 12Z, apareix el màxim d'error al mig del Mediterrani que s'ha detectat abans en la distribució espacial de ME.

5.1.2.3. S1

Observant les gràfiques de l'índex S1 (figura 5.8) podem destacar certs aspectes interessants. En primer lloc, l'índex S1 corresponent a les dues configuracions que utilitzen la parametrització de GD és clarament més alt que el de les altres quatre. Aquesta diferència és molt marcada als nivells més baixos, i es va atenuant amb l'altitud, però es pot detectar fins als 300 hPa. Això indica que aquestes configuracions que utilitzen GD són les que pronostiquen uns camps de geopotencial amb un gradient menys semblant al del camp analitzat.

En segon lloc, es pot veure com els valors de S1 disminueixen amb l'altitud (a partir dels 850 hPa). Aquest resultat no és sorprenent, ja que els camps de geopotencial se suavitzen amb l'altura, i per tant, és més factible que als nivells més elevats els gradients dels camps analitzat i pronosticat siguin més semblants.

I finalment, també es detecta una oscil·lació de l'índex S1 segons l'horitzó de pronòstic, amb un desfasament de 12 hores entre els pronòstics inicialitzats a les 00Z i a les 12Z. Això implica l'existència d'una relació entre l'índex S1 i l'hora de validesa del pronòstic.



Figura 5.8. S1 per l'altura geopotencial corresponent a cada configuració segons l'horitzó de pronòstic (nivells i hores d'inicialització especificades a sota de cada gràfica).

Concretament, en els casos estudiats, aquesta dependència implica que per a un mateix horitzó temporal, l'acord entre els gradients dels camps analitzat i pronosticat és millor per als pronòstics vàlids a les 00Z que per als pronòstics vàlids a les 12Z. I també provoca que l'índex S1 per a les simulacions inicialitzades a les 00Z sigui més baix per als pronòstics a 24 hores que a 12 hores, i per a les simulacions inicialitzades a les 12Z, hi hagi millor acord entre els gradients analitzat i pronosticat en l'horitzó de 36 hores que en el de 24.

Aquest comportament és degut, com ja s'ha comentat abans, a la diferent configuració dels camps meteorològics segons l'hora del dia: a les 00Z més suaus, i a les 12Z amb més complexitat, a causa de l'activitat atmosfèrica diürna.

5.3. Pressió atmosfèrica a nivell del mar

5.3.1. ME

A les gràfiques de la figura 5.9 destaca novament la forma de la corba, amb un mínim d'error mitjà pels pronòstics a 36 hores de les simulacions de les 00Z i les 12Z.

Per a tots els horitzons de pronòstic, el WRF subestima lleugerament la pressió atmosfèrica a nivell del mar, i la configuració que menys la subestima és la que utilitza GD i WSM5 en tots els horitzons de pronòstic, contrastant amb el comportament de les configuracions de BMJ i Thompson, amb la màxima subestimació per horitzons inferiors a 36 hores, i KF i Thompson, també amb la subestimació màxima a partir de les 48 hores.



Figura 5.9. ME per a la pressió a nivell del mar corresponent a cada configuració segons l'horitzó de pronòstic.

La taula 5.7 recull els ME per als horitzons de pronòstic entre 12 i 48 hores, i també dóna els valors corresponents trobats en el treball de verificació del MASS i l'MM5 entre els anys 2003 i 2004 (RAM, 2005). Sobre el valor de ME obtingut en aquest treball del SMC, destaca el signe diferent en el biaix que s'ha trobat al WRF respecte l'MM5.

ME de la pressió atmosfèrica a nivell del mar (hPa)										
Horitzó	+ 12 h		+ 24 h		+ 3	6 h	+ 48 h			
Inicialització	00 Z	12 Z	00 Z 12 Z		00 Z	12 Z	00 Z	12 Z		
KF.wsm5	-0.27	-0.35	-0.33	-0.56	-0.77	-0.77	-0.22	-0.41		
GD.wsm5	-0.25	-0.31	-0.24	-0.48	-0.66	-0.63	-0.06	-0.26		
BMJ.wsm5	-0.31	-0.37	-0.32	-0.53	-0.73	-0.72	-0.16	-0.33		
KF.thom	-0.28	-0.37	-0.35	-0.56	-0.78	-0.77	-0.23	-0.41		
GD.thom	-0.28	-0.34	-0.29	-0.51	-0.70	-0.67	-0.11	-0.30		
BMJ.thom	-0.34	-0.40	-0.37	-0.57	-0.79	-0.77	-0.23	-0.39		
MASS*			0.10	-0.09						
MM5*			0.49	0.41						

Taula 5.7. ME sobre totes les simulacions del pronòstic entre 12 i 48 hores de la pressió a nivell del mar, amb totes les configuracions, i (*)ME del pronòstic a 24 hores obtingut en els treballs de verificació del MASS i l'MM5 al SMC.

5.3.2. RMSE

A partir de les gràfiques de RMSE en funció de l'horitzó de pronòstic (veure figura 5.10), es fa difícil determinar quina configuració proporciona els millors resultats (tal com ha passat en els casos del geopotencial i la temperatura).

Mirant detalladament els valors de la taula 5.8, els millors resultats s'obtenen amb les configuracions que fan servir GD per a la parametrització dels cúmulus, tot i que les diferències amb les altres configuracions no són significatives. Per aquesta variable, també es detecta un RMSE lleugerament més baix per a les simulacions inicialitzades a les 12Z respecte les simulacions de les 00Z. En comparació amb els resultats de la verificació del MASS i l'MM5 entre 2003 i 2004, el RMSE dels pronòstics a 24 hores del WRF és substancialment més baix.

RMSE de la pressió atmosfèrica a nivell del mar (hPa)										
Horitzó	+ 12 h		+ 24 h		+ 36 h		+ 4	8 h		
Inicialització	00 Z	12 Z	00 Z 12 Z		00 Z	12 Z	00 Z	12 Z		
KF.wsm5	1.18	1.16	1.46	1.43	1.81	1.72	1.93	1.84		
GD.wsm5	1.18	1.15	1.45	1.41	1.75	1.67	1.92	1.81		
BMJ.wsm5	1.20	1.17	1.48	1.42	1.82	1.72	1.95	1.85		
KF.thom	1.18	1.16	1.47	1.43	1.81	1.72	1.94	1.84		
GD.thom	1.18	1.15	1.45	1.42	1.77	1.69	1.92	1.82		
BMJ.thom	1.20	1.18	1.46	1.43	1.84	1.75	1.96	1.87		
MASS*			1.71	1.76						
MM5*			1.75	1.70						

Taula 5.8. RMSE sobre totes les simulacions i per a cada configuració del pronòstic entre 12 i 48 hores de la pressió atmosfèrica a nivell del mar, i (*)RMSE del pronòstic a 24 hores obtingut en els treballs de verificació del MASS i l'MM5 al SMC.



Figura 5.10. RMSE per a la pressió a nivell del mar corresponent a cada configuració segons l'horitzó de pronòstic.

5.3.3. S1

L'evolució dels valors de S1 en funció de l'horitzó de pronòstic (figura 5.11), situa la configuració que ha utilitzat l'esquema de KF per a la convecció i WSM5 per a la microfísica de núvols com la que millor reprodueix els gradients de pressió atmosfèrica a nivell del mar que es troben en els anàlisis, i novament, la configuració que fa servir GD i Thompson com una de les que produeix pitjor acord entre aquests gradients.

Resulta interessant veure l'evolució de l'índex S1 al llarg de les simulacions efectuades en aquest treball (figura 5.12) ja que es pot apreciar un clar descens entre els primers casos d'estudi i els darrers. Com que les simulacions estan ordenades temporalment, la primera correspon al 15 de juny de 2006 (estiu) i la darrera al 16 de març de 2007 (primavera), i per tant, permet afirmar que S1 dóna els valors més elevats a l'estiu i els més baixos entre l'hivern i la primavera.

Aquest comportament és habitual per a l'índex S1 (Drodowsky, 2003), ja que els camps de pressió a nivell del mar a l'estiu presenten gradients molt més dèbils que a les altres èpoques de l'any. En aquesta evolució també es detecta com la configuració de GD i Thompson dóna els valors de S1 més elevats en cadascuna de les simulacions estudiades, mentre que la configuració de KF i WSM5 obté els S1 més baixos en la majoria de simulacions.



Figura 5.11. S1 per a la pressió a nivell del mar corresponent a cada configuració segons l'horitzó de pronòstic.



Figura 5.12. Evolució de S1 per a la pressió a nivell del mar en els pronòstics a 24 i 48 hores de les 23 simulacions estudiades en el treball amb inicialització a les 00Z (entre el 15 de juny de 2006 i el 16 de març de 2007).

5.4. Humitat relativa i proporció de mescla

La humitat és una de les variables més sensibles a la parametrització de la convecció, tal com es veurà en aquest apartat. Cal tenir en compte que un bon pronòstic de la humitat a gran escala és molt important per als pronòstics de la precipitació, la millora dels quals és un dels principals objectius del projecte al qual s'emmarca aquest treball.

Tanmateix, a causa de la configuració típica del camp d'humitat, amb grans contrastos entre àrees humides i seques, com pot ser el cas dels sistemes frontals i les masses d'aire contigües, és habitual que els índexs d'error donin valors molt elevats en cas que es produeixin petites diferències entre la localització o l'extensió previstes i observades de les àrees amb elevada humitat.

5.4.1. ME

La magnitud de l'error mitjà (veure figura 5.13) decreix entre 950 i 700 hPa, però augmenta entre els 500 i 300 hPa (nivell on té el valor absolut més elevat). Segons l'horitzó de pronòstic, mostra una marcada dependència de caràcter oscil·latori, de manera que per a les hores diürnes el ME apareix desplaçat cap a valors més grans que a les hores nocturnes. Per altra banda, no es detecten grans diferències entre els ME de les simulacions inicialitzades a les 00Z i a les 12Z.

El signe del biaix depèn del nivell i de la configuració utilitzada: a 950 hPa, les configuracions que fan servir BMJ subestimen la humitat, mentre que les que utilitzen KF i GD la sobreestimen; a 850 i a 700 hPa, el biaix donat per les diferents configuracions té un valor absolut petit (fins a un 3% en els horitzons de pronòstic més llargs) que es troba lleugerament desplaçat cap a valors positius als 850 hPa i cap a valors negatius als 700 hPa. Al nivell de 500 hPa, també predominen valors de biaix proper a zero excepte per les configuracions que utilitzen BMJ, amb una sobreestimació de la humitat més elevada. I als 300 hPa la humitat és subestimada en tots els casos, arribant a valors absoluts màxims d'un 8%.

Comparant els valors de ME entre les diferents configuracions, es detecta com en cada parella de les que fan servir la mateixa parametrització de cúmulus, la configuració amb la microfísica de núvols de Thompson dóna valors més elevats de ME (pronostica més humitat) que la configuració amb WSM5.

Més concretament, a 950 hPa s'observen errors mitjans significativament diferents: amb la parametrització de cúmulus de BMJ s'obté l'error mitjà de menor magnitud, mentre que GD dóna el ME més apartat del zero. Als 850 hPa, per a horitzons de pronòstic de 36 hores i més llargs, la configuració de KF i WSM5 és la que produeix un biaix més petit i significativament diferent del corresponent a la configuració amb un biaix més gran. A 700 hPa no hi ha diferències significatives entre els errors de les diferents configuracions, però sí als 500 hPa, on l'error de menor magnitud s'obté amb les que utilitzen GD per a la convecció. Al nivell més alt, com ja s'ha observat per a les altres variables, l'error mitjà de la humitat és més sensible a la parametrització de la microfísica de núvols que no pas a la parametrització de la convecció, produint-se la subestimació més gran en les configuracions que han fet servir WSM5.



Figura 5.13. ME de la humitat relativa de les diferents configuracions segons l'horitzó de pronòstic, per als nivells i hores d'inicialització especificats a sota de cada gràfica.

En la verificació dels models MASS i MM5 realitzada entre 2003 i 2004 al SMC (RAM, 2005), es detectà que l'MM5 sobreestimava la humitat a 850 hPa i que el MASS la subestimava. El WRF, com ja s'ha dit, per aquest nivell produeix un biaix molt proper a zero, lleugerament desplaçat cap a valors positius. Cal destacar que la variable verificada en el treball del SMC per avaluar els pronòstics d'humitat va ser la proporció de mescla, i per poder comparar els resultats d'ambdós treballs (veure taula 5.9) també s'han calculat els respectius índexs de ME i RMSE amb aquesta variable per a la verificació del WRF.

ME de la proporció de mescla en previsions a 24 hores (g/kg)										
NIVELL	NIVELL 850 hPa		500	hPa	300 hPa					
Inicialització	00 Z 12 Z		00 Z	12 Z	00 Z	12 Z				
KF.wsm5	-0.07	-0.04	-0.01	0.02	-0.02	-0.01				
GD.wsm5	-0.11	-0.08	-0.03	-0.02	-0.02	-0.01				
BMJ.wsm5	-0.13	-0.09	0.05	0.07	-0.02	-0.01				
KF.thom	-0.02	0.02	0.01	0.04	-0.01	-0.01				
GD.thom	-0.10	-0.06	-0.02	0.01	-0.01	0.00				
BMJ.thom	-0.13	-0.08	0.07	0.08	-0.01	0.00				
MASS*	-0.30	-0.04	0.06	0.09	0.02	0.03				
MM5*	0.08	0.10	0.00	0.00	-0.01	-0.01				

Taula 5.9. ME sobre totes les simulacions i per a cada configuració del pronòstic a 24 hores de la proporció de mescla, i (*)ME del pronòstic a 24 hores obtingut en els treballs de verificació del MASS i l'MM5 al SMC.

En la distribució espacial de l'error mitjà, per a les hores diürnes, als 300 hPa (figures A17) s'observen àrees amb sobreestimació de la humitat, localitzades principalment en zones continentals o properes a les línies de costa. En les hores nocturnes, en canvi, s'aprecien àrees als extrems NW i SE del domini amb un biaix sec molt marcat. Totes aquestes zones de sobreestimació o subestimació de la variable no varien la seva localització entre les diferents configuracions, només la seva magnitud.

Al nivell de 500 hPa (figures A18), el comportament de les configuracions que parametritzen la convecció amb l'esquema de BMJ és molt diferent de la resta (veure figura 5.14), ja que sobreestimen molt més la variable. En les altres configuracions, durant les hores diürnes, la sobreestimació de la variable augmenta amb l'horitzó de pronòstic, tant en magnitud com en extensió, en coherència amb la tendència mostrada pels resultats globals de ME (figures 5.13g i 5.13h). En les hores nocturnes, apareix un biaix sec al nord dels Pirineus en els pronòstics de 12 i 24 hores, que desapareix per a horitzons de pronòstic més llargs al mateix temps que guanya intensitat un biaix humit davant la costa catalana.

També en el nivell de 700 hPa (figures A19) les configuracions amb BMJ es destaquen mostrant un comportament més diferenciat, amb predomini d'un biaix humit. Les altres configuracions, durant les hores nocturnes, produeixen el biaix sec més intens a l'oest dels Alps i davant de la costa valenciana, i els biaixos humits màxims es localitzen, en els horitzons de pronòstic més llargs, al NW de França i a Catalunya. En les hores diürnes, amb l'increment de l'horitzó de pronòstic també augmenta la magnitud del biaix sec al nord d'Àfrica, mentre que les zones amb subestimació de la humitat que, entre els horitzons de 24 i 48 hores, s'observen sobre la Península Ibèrica, es difuminen (sobretot amb la configuració de KF i WSM5) i en el seu lloc aquesta variable passa a ser sobreestimada. Finalment, als 850 hPa, en hores diürnes es detecta un biaix positiu (que s'incrementa amb l'horitzó de pronòstic) a la zona oest de la Península Ibèrica i al nord dels Alps. Per a les hores nocturnes, el biaix sobre la Península Ibèrica tendeix a ser positiu, mentre que sobre el Mediterrani pren valors pràcticament nuls. Les configuracions amb valors de ME més homogenis i propers a zero en tots els horitzons de pronòstic són les que fan servir BMJ.



Figura 5.14. Distribució espacial de l'error mitjà de la humitat relativa, a 500 hPa, per als pronòstics a 24h inicialitzats a les 00Z (a, b i c) i a les 12Z (d, e, f) de manera que els tres primers mapes corresponen a hores nocturnes i els altres tres a hores diürnes, per a les configuracions especificades a sota de cada mapa.

5.4.2. RMSE

El RMSE de la humitat relativa augmenta amb l'alçada i amb l'horitzó de pronòstic. Com ja s'havia vist en tractar l'error mitjà d'aquesta variable, el RMSE tampoc presenta variacions importants entre les simulacions inicialitzades a les 00 i a les 12Z.

Al nivell més baix (950 hPa) la configuració amb resultats més òptims és la que utilitza els esquemes convectius de KF (figura 5.16, a i b), mentre que els pitjors resultats els donen les configuracions amb l'esquema de GD. De fet, en aquest nivell, els millors i pitjors valors de RMSE arriben a ser significativament diferents.

Tant a 850 com a 700 hPa (figura 5.15, c-f), les configuracions amb l'esquema convectiu de BMJ són les que proporcionen els resultats més favorables, mentre que les configuracions amb GD són, de nou, les que ofereixen els RMSE més elevats.

Als 500 hPa, en canvi, la configuració amb un error RMSE més baix és la que utilitza KF i WSM5, mentre que la configuració amb els esquemes de BMJ i Thompson produeix els errors més elevats. Als 300 hPa, com ja s'ha assenyalat al parlar del ME, l'error és més sensible als canvis en la parametrització de la microfísica de núvols que en la parametrització de la convecció, i els RMSE més baixos els dóna l'esquema de Thompson.



Figura 5.15. RMSE de la humitat relativa de les diferents configuracions segons l'horitzó de pronòstic, per als nivells i hores d'inicialització especificats a sota de cada gràfica.

Si es comparen els resultats obtinguts en aquest treball per al WRF amb els obtinguts en la verificació del MASS i l'MM5 (RAM, 2005) entre 2003 i 2004 (taula 5.10), el WRF mostra un error de magnitud similar a la del MASS però superior a la del MM5 en el nivell de 850 hPa, superior als dos models al nivell de 500 hPa i de magnitud similar a 300 hPa.

RMSE de la proporció de mescla en previsions a 24 h (g/kg)										
NIVELL	850	hPa	500	hPa	300 hPa					
Inicialització	00 Z 12 Z		00 Z	12 Z	00 Z	12 Z				
KF.wsm5	1.16	1.16	0.52	0.52	0.09	0.09				
GD.wsm5	1.20	1.20	0.52	0.52	0.09	0.09				
BMJ.wsm5	1.14	1.12	0.54	0.53	0.09	0.09				
KF.thom	1.15	1.15	0.52	0.52	0.09	0.09				
GD.thom	1.20	1.20	0.53	0.53	0.09	0.09				
BMJ.thom	1.15	1.12	0.55	0.54	0.09	0.09				
MASS*	1.22	1.12	0.38	0.38	0.05	0.06				
MM5*	0.94	1.10	0.35	0.35	0.05	0.05				

Taula 5.10. RMSE sobre totes les simulacions i per a cada configuració del pronòstic a 24 hores de la proporció de mescla, i (*)RMSE del pronòstic a 24 hores obtingut en els treballs de verificació del MASS i l'MM5 al SMC.

Al nivell de 500 hPa (figures A22), es distingeix una zona al SW de la Península Ibèrica, sobre l'oceà Atlàntic, amb un mínim de RMSE que es manté amb valors baixos al llarg de tots els horitzons de pronòstic. Un dels màxims de RMSE que apareix a partir del pronòstic a 24 hores se situa a sobre de Catalunya i s'estén cap al nord i cap a l'est. També es distingeixen traces amb un elevat RMSE associades a diferències en la localització de les depressions de latituds altes.

Als 700 hPa (figures A23) es detecta, a mesura que s'incrementa l'horitzó de pronòstic, un màxim molt marcat al nord del domini, mentre que les zones situades al sud i sobre l'Atlàntic, tal com s'observava al nivell superior, mantenen un RMSE reduït en tots els horitzons de pronòstic.

Finalment, als 850 hPa (figures A24), la zona amb RMSE màxim s'estén clarament de nord a sud, bàsicament sobre la meitat occidental del domini, a mesura que augmenta l'horitzó de pronòstic (vegeu figura 5.16). Mitjançant els mapes de les figures A24 també s'aprecia clarament com les configuracions amb l'esquema de GD acumulen més zones amb un error elevat.



Figura 5.16. Distribució espacial del RMSE de la humitat relativa, a 850 hPa, per als pronòstics inicialitzats a les 00Z amb la configuració de BMJ i Thompson. Es pot observar com, a mesura que augmenta l'horitzó de pronòstic, el màxim del RMSE s'estén de nord a sud per la meitat oest del domini.

Per verificar l'encert del vent en les simulacions del WRF, al tractar-se d'una magnitud vectorial, s'utilitza l'índex anomenat "valor mitjà del vector error del vent" (MVWE), definit segons les expressions [3.6] i [3.7]. Aquest índex dóna compte de les discrepàncies tant en el mòdul com en la direcció d'aquesta variable.

Tal com s'aprecia a les gràfiques de la figura 5.17, el valor d'aquest índex presenta un mínim als 700 hPa, i per tant, disminueix des dels 950 hPa als 700 i augmenta dels 700 als 300 hPa. En general, els valors de MVWE augmenten amb l'horitzó de pronòstic, però en els nivells més baixos, l'augment es dóna principalment entre les 12 i les 00Z i no entre les 00Z i les 12Z (on fins i tot apareixen lleugeres disminucions del seu valor a 950 hPa) fet que porta a pensar que en aquests nivells, el vent pronosticat i el vent analitzat mostren un acord millor a les 12 Z que a les 00Z.

També es pot apreciar com la sensibilitat del pronòstic del vent (avaluada amb aquest índex) a la parametrització de la convecció i/o de la microfísica de núvols és molt feble. Només en els nivells més baixos es pot detectar alguna diferència sensible entre els valors globals de MVWE produïts per les diferents configuracions. Els valors de la taula 5.11 permeten apreciar millor que als gràfics aquestes petites diferències entre els MVWE de les diferents configuracions.

MVWE: Error mitjà del vector vent, dels pronòstics a 24 h (m/s)											
NIVELL	950 hPa		850 hPa		700 hPa		500 hPa		300 hPa		
Inicialització	00 Z	12 Z									
KF.wsm5	4.32	3.91	4.01	3.86	3.82	3.76	4.11	4.08	5.61	6.03	
GD.wsm5	4.30	3.90	4.04	3.87	3.86	3.77	4.11	4.09	5.58	6.00	
BMJ.wsm5	4.40	3.97	4.09	3.92	3.87	3.80	4.13	4.08	5.60	5.98	
KF.thom	4.34	3.91	4.02	3.86	3.84	3.76	4.11	4.07	5.62	6.04	
GD.thom	4.30	3.90	4.04	3.87	3.87	3.78	4.10	4.08	5.59	6.00	
BMJ.thom	4.39	3.97	4.09	3.91	3.87	3.80	4.12	4.07	5.61	5.98	
MASS*			3.20	2.97			3.63	3.63	4.82	4.80	
MM5*			2.87	2.77			3.36	3.40	4.67	4.71	

Taula 5.11. MVWE sobre totes les simulacions i per a cada configuració del pronòstic a 24 hores del vent, i (*)MVWE del pronòstic a 24 hores obtingut en els treballs de verificació del MASS i l'MM5 al SMC. En blau es representen els valors mínims de MVWE, i en vermell els màxims.

Per altra banda, els valors de MVWE obtinguts pel WRF són molt alts comparats amb els obtinguts en la verificació prèvia del MASS i l'MM5 (RAM, 2005).

En els casos en què el MVWE de les diferents configuracions dóna valors sensiblement diferents entre ells, en la majoria d'horitzons de pronòstic el valor més òptim és produït per les configuracions que utilitzen les parametritzacions de KF i WSM5.



Figura 5.17. MVWE de les diferents configuracions segons l'horitzó de pronòstic, per als nivells i hores d'inicialització especificats a sota de cada gràfica.

En els mapes amb la distribució espacial del MVWE, a 850 hPa s'aprecien una sèrie de màxims durant les hores nocturnes, localitzats al voltant dels Alps i de l'Atlas i al sud dels Pirineus en els pronòstics a 24 hores. Amb horitzons de pronòstic més llargs, apareixen nous màxims a diverses zones del domini, com a la zona de l'estret de Gibraltar i a les illes de Còrsega i Sardenya. En les hores diürnes apareixen menys punts amb màxims de MVWE.

Als 700 hPa, els màxims d'error apareixen inicialment al voltant dels Alps i de l'Atlas, però a mesura que s'allarga l'horitzó de pronòstic, s'estenen ràpidament per la meitat oriental del domini. Els valors mínims es troben en la part del domini que agafa l'oceà Atlàntic. Als 500 hPa, en canvi, l'àrea amb MVWE màxim en els primers horitzons de pronòstic s'estén, pràcticament, des de l'Atlas als Alps, passant per sobre el mar Mediterrani i ocupant la meitat oriental del domini. En els horitzons més llargs, el MVWE s'incrementa notablement pel nord.

En general, els valors de MVWE obtinguts en la verificació dels casos d'estudi escollits són realment molt elevats, sobretot si els comparem amb aquells que es van obtenir en la verificació del MASS i l'MM5 al SMC. De totes maneres, en aquest punt cal tenir en compte que per realitzar una comparació fiable entre diferents models, tots ells han de simular els mateixos casos d'estudi. A més, en el present treball s'han escollit casos en els quals les configuracions del geopotencial eren molt variables en el temps, amb la conseqüent facilitat per trobar canvis importants en la direcció del vent en zones properes. Amb aquesta premissa, petites diferències en la localització dels tàlvegs poden provocar valors elevats de MVWE, ja que aquest índex penalitza molt els vents intensos que bufen en direccions diferents (RAM, 2005).

6. Conclusions

En aquest treball s'han presentat els resultats de la verificació de diferents configuracions del model WRF-ARW, caracteritzades per la utilització d'una combinació d'esquemes convectius i de microfísica de núvols, sobre un domini de 36 km de pas de malla, centrat sobre Catalunya. D'aquesta manera s'ha avaluat la sensibilitat dels pronòstics del model a la parametrització d'aquests dos processos físics.

La finalitat d'aquest estudi és establir la configuració del model que funciona millor sobre aquest domini per tal de ser utilitzada per proveir de condicions de contorn els dominis niats i realitzar pronòstics operatius amb el model WRF-ARW al Servei Meteorològic de Catalunya.

A partir dels resultats obtinguts, es pot concloure que els pronòstics de les diferents variables analitzades (temperatura, altura geopotencial, humitat relativa, vent i pressió atmosfèrica a nivell del mar) presenten més sensibilitat a la parametrització de la convecció als nivells baixos (950 i 850 hPa) que als nivells més elevats, on resulta difícil distingir la configuració que proporciona resultats més satisfactoris. Als 300 hPa, s'ha detectat que els pronòstics són més sensibles a l'esquema de microfísica de núvols que a la parametrització de la convecció.

En els pronòstics de la temperatura, s'ha observat que la variable és subestimada als nivells de 850 i 950 hPa, i sobreestimada als 300 hPa, mentre que a 500 i 700 hPa s'hi detecten biaixos lleugerament positius i negatius, respectivament, però de magnitud molt petita. L'error tendeix a augmentar amb l'altitud i amb l'horitzó de pronòstic. En general, les configuracions amb millors resultats han estat les que utilitzaven l'esquema convectiu de KF, tot i que als nivells baixos també han funcionat bé les configuracions amb BMJ.

S'ha mostrat com el WRF sempre subestima l'altura geopotencial, independentment de la configuració utilitzada en les simulacions; de totes maneres, les configuracions amb l'esquema microfísic WSM5 no subestimen tant la variable. Mitjançant l'índex S1 s'ha comprovat com les configuracions amb l'esquema de GD donen el pitjor acord entre els gradients dels camps analitzat i pronosticat, mentre que la configuració amb KF i WSM5 ha donat els resultats globalment més satisfactoris. Aquests resultats concorden amb els que s'han trobat per a la pressió atmosfèrica a nivell del mar.

S'ha comprovat com la humitat relativa és la variable més sensible a la parametrització de la convecció, sobretot als nivells més baixos, on es detecten diferències estadísticament significatives entre els resultats de les diferents configuracions. El signe del biaix dels pronòstics d'aquesta variable depèn, en alguns casos, de la configuració utilitzada, però tendeix a ser positiu a 950 i 850 hPa, i negatiu a 700 i 300 hPa. S'observa com, en general, la microfísica de Thompson dóna pronòstics més humits que la microfísica WSM5. Les configuracions que pronostiquen millor la humitat són les que utilitzen KF als 950 i 500 hPa i les que utilitzen BMJ als 850 i 700 hPa.

Finalment, el pronòstic del vent, avaluat segons l'índex MVWE, resulta ser un dels menys sensibles a la configuració de la simulació. Malgrat tot, s'han trobat uns resultats sensiblement més bons amb la configuració que utilitza KF i WSM5, mentre que les configuracions amb BMJ han donat la pitjor puntuació en la majoria de casos. Amb la distribució espacial dels diferents índexs d'error, s'ha pogut detectar que, en general, els valors globals de l'índex no responen a una distribució homogènia sobre el territori, sinó que hi ha contrastos entre errors de magnitud diferent (i biaixos de diferent signe) en tota l'extensió del domini. També s'ha constatat que la localització de les zones amb màxims i mínims d'error no depèn gaire de la configuració, sinó més aviat de l'hora de validesa del pronòstic i del seu horitzó temporal. En aquest sentit, només representen una petita excepció les configuracions que utilitzen l'esquema convectiu de BMJ, que sovint donen patrons d'error clarament diferenciats dels obtinguts amb les altres quatre configuracions.

Alguns dels índexs trobats en aquest estudi s'han comparat amb els que es van obtenir en un treball de verificació dels models MASS i MM5 al SMC, realitzat al llarg de 12 mesos entre 2003 i 2004. D'aquesta comparació es conclou que els errors donats pel WRF en el present treball i els errors d'aquest dos models operatius al SMC són de magnitud similar, excepte en el cas del vent, en què l'error donat pel WRF és sensiblement superior.

Finalment, considerant els errors avaluats per totes aquestes variables i tenint en compte el comportament de cada configuració, es proposa utilitzar la configuració de KF i WSM5 per a efectuar les simulacions en aquest domini, tant per al pronòstic operatiu com per proporcionar les condicions de contorn al domini niat per efectuar-hi les corresponents proves de sensibilitat a la parametrització de la convecció.

D'aquesta manera, com a treball immediat, s'avaluarà la sensibilitat dels pronòstics de diverses variables (incloent, en aquest cas, la pluja) en el domini de 12 km de pas de malla, al mateix temps que es realitzarà una verificació dels pronòstics a temps real del WRF al domini de 36 km, amb la configuració de KF i WSM5, contrastada amb els pronòstics operatius dels models MASS i MM5, per poder comparar els índexs d'error de cada model aplicat sobre un període de temps comú.

Agraïments: Vull agrair a Bernat Codina la confiança dipositada en mi per encarregar-me aquest treball, així com el suport dels companys del grup de Recerca Aplicada i Modelització del SMC: Jordi Cunillera, Montse Aran, Manel Bravo, Toni Barrera, Txell Pagès, Jordi Toda, Jordi Moré, JR Miró i especialment, l'Abdel Sairouni pels nombrosos consells i explicacions a l'hora d'encarrilar adequadament el treball i interpretar els resultats de les verificacions. Personalment, també vull donar les gràcies a l'Anna pel seu suport incondicional a tots els meus projectes i per la seva paciència, i tant a la meva família com a la seva pel recolzament donat en tot moment.

Referències

Arakawa, A., Schubert, W.H., 1974. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. J. Atmos. Sci., **31**, 674-701.

Betts, A. K., 1986. A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 677–691.

Betts, A. K., Miller, M.J., 1986. A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 693–709.

Brown, J. et al., 2007. Rapid-refresh core test: aspects of WRF-NMM and WRF-ARW forecast performance relevant to the rapid-refresh application. *Preprints for the Eighth WRF Users' Workshop*, Boulder, Colorado (EUA).

Drodowsky, W., Zhang, H., 2003. Verification of Spatial Fields, dins de Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science (Editors: Jolliffe, I.T., Stephenson, D.B.). *Ed. John Wiley and Sons Ltd*, Chichester, England.

Dudhia, J., 2007. The Weather Research and Forecasting Model: 2007 annual update. *Preprints for the Eighth WRF Users' Workshop*, Boulder, Colorado (EUA).

Grell, G. A., 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 764–787.

Grell, G. A., and Dévényi, D., 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(14), Article 1693.

Janjić, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes, *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927–945.

Jascourt, S., 2004. Convective weather refresher: Convective Parameterizations in the NCEP Operational Models and Some Convective Guidance Products. COMET NWP resource.

Kain, J. S., 2004. The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. J. Appl. Meteor., 43, 170-181.

Kain, J. S., Fritsch, J. M., 1990. A one-dimensional Entraining/Detraining plume model and its application in convective parameterization. J. Atmos. Sci., 47, 2784 – 2802.

Klemp, J.B., 2006. Advances in the WRF model for convection-resolving forecasting. *Advances in Geosciences*, **7**, 25-29.

Kuell, V., Gassmann, A. and Bott, A., 2007. Towards a new hybrid cumulus parameterization scheme for use in non-hydrostatic weather prediction models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **133**, 479-490.

Mercader, J., Codina, B., Sairouni, A., Cunillera, J., 2007. Sensitivity of precipitation forecasts to cumulus parameterizations in Catalonia (NE Spain). *Preprints for the Eighth WRF Users' Workshop*, Boulder, Colorado (EUA).

RAM, 2005. Verificació dels models operatius de mesoescala al SMC. Nota tècnica interna de l'Àrea de Recerca Aplicada i Modelització. Servei Meteorològic de Catalunya. 54 pp.

Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., et al., 2005. A Description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR TECHNICAL NOTES. 100 pp.

UCAR, 2000. How models produce precipitation and clouds. *NWP Distance Learning Course*, COMET, UCAR.

Wilks, D.S., 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction. *Academic Press*, 467 pp.

ANNEX Figures A1-A28



Figura A1.1. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 300 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A1.2. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 300 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A1.3. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 300 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A2.1. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 500 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A2.2. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 500 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A2.3. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 500 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A3.1. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 700 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A3.2. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 700 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A3.3. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 700 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A4.1. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 850 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.


Figura A4.2. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 850 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A4.3. ME sobre els casos d'estudi de la temperatura a 850 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A5.1. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 300 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A5.2. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 300 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A5.3. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 300 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A6.1. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 500 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A6.2. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 500 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A6.3. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 500 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A7.1. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 700 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A7.2. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 700 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A7.3. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 700 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A8.1. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 850 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A8.2. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 850 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A8.3. RMSE sobre els casos d'estudi de la temperatura a 850 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A9.1. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 300 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A9.2. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 300 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A9.3. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 300 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A10.1. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 500 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A10.2. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 500 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A10.3. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 500 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A11.1. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 700 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A11.2. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 700 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A11.3. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 700 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A12.1. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 850 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A12.2. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 850 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura 12.3. ME sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 850 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A13.1. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 300 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A13.2. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 300 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A13.3. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 300 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A14.1. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 500 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A14.2. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 500 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A14.3. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 500 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A15.1. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 700 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A15.2. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 700 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A15.3. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 700 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.


Figura A16.1. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 850 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A16.2. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 850 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura 16.3. RMSE sobre els casos d'estudi de l'altura geopotencial a 850 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A17.1. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 300 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A17.2. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 300 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A17.3. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 300 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A18.1. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 500 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A18.2. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 500 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A18.3. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 500 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A19.1. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 700 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A19.2. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 700 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A19.3. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 700 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A20.1. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 850 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A20.2. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 850 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura 20.3. ME sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 850 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A21.1. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 300 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A21.2. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 300 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A21.3. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 300 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A22.1. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 500 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A22.2. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 500 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A22.3. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 500 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A23.1. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 700 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A23.2. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 700 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A23.3. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 700 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A24.1. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 850 hPa prevista a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A24.2. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 850 hPa prevista a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura 24.3. RMSE sobre els casos d'estudi de la humitat relativa a 850 hPa prevista a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A25.1. MVWE sobre els casos d'estudi a 300 hPa, previsió a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A25.2. MVWE sobre els casos d'estudi a 300 hPa, previsió a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d, e, f són anàlogues a a, b i c però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A25.3. MVWE sobre els casos d'estudi a 300 hPa, previsió a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A26.1. MVWE sobre els casos d'estudi a 500 hPa previsió a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A26.2. MVWE sobre els casos d'estudi a 500 hPa, previsió a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A26.3. MVWE sobre els casos d'estudi a 500 hPa, previsió a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A27.1. MVWE sobre els casos d'estudi a 700 hPa, previsió a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A27.2. MVWE sobre els casos d'estudi a 700 hPa, previsió a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A27.3. MVWE sobre els casos d'estudi a 700 hPa, previsió a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.


Figura A28.1. MVWE sobre els casos d'estudi a 850 hPa, previsió a 24 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura A28.2. MVWE sobre els casos d'estudi a 850 hPa, previsió a 48 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.



Figura 28.3. MVWE sobre els casos d'estudi a 850 hPa, previsió a 72 hores, amb la simulació inicialitzada a 00Z i amb les configuracions de a) BMJ i wsm5, b) GD i wsm5, c) KF i wsm5. Les figures d), e), f) són anàlogues a a), b) i c) però corresponen a la simulació inicialitzada a les 12Z.