

António Paulo Gonçalves F. Ferreira

Sensibilidade às parametrizações físicas do WRF nas previsões à superfície em Portugal Continental

Estágio em Meteorologia e Oceanografia Física

Trabalho orientado por Doutor José M. Castanheira

Setembro 2007

Agradecimentos

Agradeço ao Doutor José Castanheira a oportunidade magnífica que representou para mim um ano de aprendizagem com o modelo WRF, e os recursos computacionais que prontamente colocou à minha disposição.

Fico também grato ao Doutor Alfredo Rocha pelo incentivo e pelas sugestões que recebi.

Devo agradecer à Doutora Maria de Los Dolores Manso a disponibilidade em relação às dificuldades de recolha de dados meteorológicos.

Este trabalho não seria o mesmo sem a colaboração do Juan Ferreira durante a instalação do sistema WRF. Na fase adiantada do projecto, beneficiei sempre dos seus comentários, do seu espírito positivo e da sua experiência com o modelo.

Ao Martinho Marta Almeida, ao Álvaro Peliz e à Ana Telles-Machado quero exprimir o meu reconhecimento pela camaradagem (às vezes com contornos logísticos), pontuada pelo bom humor.

Sumário

Este trabalho relata uma experiência com o sistema de modelação numérica do tempo WRF, realizado no Departamento de Física da Universidade de Aveiro, no âmbito do Estágio em Meteorologia e Oceanografia Física.

No estádio de desenvolvimento em que o WRF se encontra presentemente, os trabalhos de validação deste modelo concentram-se no ensaio das possibilidades oferecidas pelo vasto leque de opções incluidas: vários esquemas para cada processo físico, diferentes opções na formulação dinâmica, inúmeras alternativas nos próprios métodos numéricos. Essa polivalência do modelo traduz bem a ideia de pesquisa e experimentação contínua que está subjacente à sua criação.

Uma das linhas de acção documentadas no relatório do 2º "NCAR/CAMS Joint Workshop on NWP Model Development" (Jason Knievel, 2003) era "realizar testes adicionais com as parametrizações físicas do modelo WRF, com o fim de concluir quais são as combinações óptimas para certos fenómenos".

O teste de sensibilidade que desenvolvemos consistiu em fazer variar certas opções dos esquemas físicos do WRF-ARW, versão 2.2, comparando as previsões resultantes com um conjunto de observações locais de variáveis atmosféricas de superfície. Esse estudo reporta-se a 48 dias repartidos pelo ano de 2006, e a um domínio focado em Portugal Continental, partindo de simulações estendidas à Península Ibérica.

Índice

Agradecimentos i

Sumário *ii*

1 Modelo e parametrizações 1

- 1.1 O WRF na simulação numérica do tempo em escala regional 1
- 1.2 Malha de simulação, inicialização e condições de fronteira 3
- 1.3 Nesting 6
- 1.4 Processos físicos em "escala de sub-grelha" 7
- 1.5 Validação 9

2 Testes de sensibilidade 13

- 2.1 Região geográfica, períodos de simulação e dados meteorológicos 13
- 2.2 Configuração do modelo e escolha das opções físicas 15
- 2.3 Estações meteorológicas de superfície e variáveis compadas 20
- 2.4 Verificação contra as observações, ponto a ponto 26
- 2.5 Comparação directa entre formulações do modelo 32
- 2.6 Inicializações desfasadas no tempo 33
- 2.7 Aspectos computacionais 34

3 Resultados e discussão 35

3.1 Erros trimestrais e anuais das previsões de superfície 35
3.2 Dispersão do *ensemble* das formulações físicas do modelo 41
3.3 Diferença entre as simulações desfasadas de 1 dia 43
3.4 Tabelas do desempenho relativo das formulações do modelo 46
3.5 Conclusões 54

Apêndice A Curvas de erro 57

Apêndice B Dispersão de ensemble 107

Apêndice C Simulações desfasadas 111

Apêndice D Namelists 113

Referências 118

Capítulo 1 Modelo e parametrizações

Como enquadramento ao trabalho experimental desenvolvido, é conveniente apresentar em linhas muito gerais o modelo WRF utilizado, destacando a sua aplicação à atmosfera real. A versatilidade do modelo no que diz respeito às opções físicas constitui o ponto de partida dos testes de sensibilidade que serão relatados mais adiante.

1.1 O WRF na simulação numérica do tempo em escala regional

O WRF (Weather Research and Forecast) é um sistema de modelação numérica da atmosfera orientado para a pesquisa dos fenónemos atmosféricos de microescala e de mesoescala, e para a previsão do tempo em mesoescala. O seu desenvolvimento contínuo é fruto da colaboração entre centros de investigação e agências governamentais dos EUA: a Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM) Division do National Center for Atmospheric Research (NCAR), os National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e o Forecast System Laboratory (FSL), pertencentes à National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), a Air Force Weather Agency (AFWA) e o Naval Research Laboratory (NRL), tutelados pelo US Departement of Defense, o Center of Analysis and Prediction of Storms (CAPS), sediado na Universidade de Oklahoma, e a Federal Aviation Administration (FAA). Conta ainda com a participação de cientistas de várias Universidades. Concebido para ser uma ferramenta de topo na arte da simulação atmosférica, flexível, portável, e eficiente em variadas plataformas de computação, o sistema WRF é do domínio público e é disponibilizado gratuitamente.

O modelo é apto tanto para situações atmosféricas idealizadas como para situações reais, em escalas horizontais que podem ir desde alguns metros até milhares de quilómetros. A investigação das parametrizações, a simulação idealizada de fenómenos (ondas gravíticas, ondas baroclínicas, convecção, etc), a simulação real do tempo passado, a assimilação de dados de observação para fins de análise regional, a previsão do tempo em tempo real, e o ensino ilustram as faculdades do WRF.

A vertente de previsão operacional do tempo, na esteira de modelos de mesoescala mais antigos como o MM5, tem vindo naturalmente a crescer pelo impacto imediato que tem nas actividades humanas. As simulações operacionais com o WRF sobre o continente dos EUA (CONUS), iniciadas em Abril de 2004, secundadas por simulações em domínios na Europa e no Atlântico Norte (vd. Hutchinson, et al, 2005), constituem uma afirmação clara das potencialidades práticas do modelo. O esforço de aperfeiçoamento do modelo nessa direcção é, para a comunidade científica, um desafio a uma melhor compreensão dos fenómenos atmosféricos a par da capacidade de os modelar correctamente. Esse esforço não diz respeito exclusivamente ao WRF. Nos últimos anos tem-se assistido a uma revolução no campo da previsão meteorológica de mesoscala, com muitos grupos a realizarem simulações em tempo real, trabalhando com diferentes modelos em diversos lugares do mundo. Essa descentralização da previsão numérica do tempo (Kuo, s/d) poderá ser explicada pelos seguintes factores: a partilha, no seio da comunidade, de modelos de mesoescala ou das suas componentes (parametrizações físicas); a descida do preço das Workstations e dos computadores pessoais durante os anos 1990; a crescente acessibilidade em tempo real dos dados das grelhas de análise e de previsão saídos das corridas operacionais dos NCEP.

O cerne (*core*) de qualquer modelo numérico de simulação hidrodinâmico consiste na formulação das equações dinâmicas apropriadas juntamente com as técnicas empregues na resolução das mesmas. O sistema de modelação WRF alberga dois *cores* dinâmicos distintos: ARW (Advanced Research WRF) e NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). Ambos são formulações avançadas de modelos anteriores. O NMM é um modelo não hidrostástico desenvolvido pelos NCEP a partir do modelo operacional hidrostático ETA; o ARW (tal como acontecia com o MM5), tira partido dum esquema de divisão do incremento de integração para as ondas acústicas e gravíticas oriundo do modelo de nuvens de Klemp-Whilhelmson. Existem diferenças significativas quanto à

formulação das equações dinâmicas, às variáveis de prognóstico usadas, ao modo como são dispostas as variáveis na malha (*grid staggering*), e quanto aos métodos de integração temporal. Skamarock (2005) esclarece as diferenças e as semelhanças, apontando para a viabilidade de uma unificação futura dos dois *cores*. A manutenção e o suporte financeiro do WRF- ARW são da responsabilidade do NCAR; o WRF-NMM está a cargo dos NCEP/NOAA.

A última versão do WRF-ARW, versão 2.2, foi lançada a 22 de Dezembro de 2006, sendo essa a versão utilizada no trabalho experimental relatado no capítulo 3. O uso do WRF-ARW passa pela página Web <u>http://www.mmm.ncar.edu/wrf/users/</u> dirigida aos utilizadores do WRF-ARW, onde o modelo está documentado e são dados exemplos de aplicação prática e tutoriais actualizados. As instruções para o *download* do código fonte dos vários blocos do sistema de modelação e do *software* necessário podem ser aí encontrados.

Para uma descrição mais precisa da maioria dos aspectos focados nas próximas secções, consultar o "ARW User's Guide" e a NCAR Technical Note: "A Description of the Advanced Research WRF Version 2", disponíveis na página acima referida. O segundo documento explica em pormenor os fundamentos físicos e matemáticos da formulação dinâmica do modelo; no que diz respeito às parametrizações físicas, o texto remete para as referências dos trabalhos originais dos seus autores.

1.2 Malha de simulação, inicialização e condições de fronteira

Domínio e malha de simulação

O domínio de simulação é o espaço físico representado por uma malha tridimensional no espaço de cálculo. No WRF, cada nível vertical é definido por um valor discreto da coordenada sigma^{*}, definida em relação à componente hidrostática de pressão, proporcional à massa da coluna de ar que se estende desde o nível dado até à fronteira superior do modelo, dividida pela massa em toda a coluna. Junto ao solo, as superfícies

^{*} $\sigma = (p - p_{top})/(p_{sup} - p_{top})$; a definição comum em modelos analíticos é p/p_{sup} ($p_{top} \rightarrow 0$).

coordenadas seguem o declive do terreno. Cada superfície de igual sigma é retalhada numa rede rectangular de localizações horizontais, definida no plano de uma projecção cartográfica particular. O WRF suporta 3 projecções, cuja escolha depende das latitudes em consideração: Mercator; Cónica Conforme de Lambert; e Polar Estereográfica. O espaçamento da malha (que no modelo é igual nas duas direcções, $\Delta x = \Delta y$) e o número de nós determinam as suas dimensões. A posição da malha no globo terrestre pode ser definida pelas coordenadas de longitude e latitude correspondentes ao centro geométrico ou a outro ponto à escolha. A orientação precisa do domínio define-se pelo meridiano que deve ficar alinhado com o eixo yy numa dada posição x da malha (nas três projecções cartográficas os meridianos são representados por linhas rectas). A projecção cartográfica pode ser afinada para a região varrida pela malha, mediante a atribuição das latitudes dos paralelos isométricos (de modo a reduzir a variação latitudinal do módulo de deformação linear da projecção). A escolha de uma projecção particular prende-se, à partida, com a representação gráfica do output das variáveis do modelo (vg. mapas de isolinhas), mas também com o próprio *output* em domínios mais extensos: na medida em que diferentes células da malha horizontal correspondam a áreas quase iguais no geóide, a resolução do modelo será fisicamente mais homogénea.

Inicialização e condições de fronteira

Nas aplicações realistas, seja na previsão do tempo, seja na simulação do tempo passado, o WRF, como modelo de área limitada, necessita de condições de fronteira laterais que representem, dentro do possível, o estado real da atmosfera vizinha ao longo do tempo de integração das equações dinâmicas. Essas condições são fornecidas por um modelo de previsão numérica do tempo em escala global, que considera toda o Globo. O estado inicial deve ser definido pelos valores de análise nos vértices da malha própria desse modelo (resultantes da perequação dos dados sinópticos combinada com o painel de fundo produzido por uma corrida global começada num tempo anterior). Os modelos globais de previsão são capazes de fornecer previsões para vários dias num prazo suficientemente curto para possibilitar o avanço das previsões dos modelos de área limitada (ainda que seja necessário iniciar a corrida com a análise correspondente a um ou mais dias atrás do tempo real das simulações). Uma vez que o interesse de um modelo de mesoescala começa onde outro modelo de escala maior se mostra incapaz de

resolver o tempo com o detalhe desejado, é natural que o modelo regional tenha uma malha bastante mais apertada do que o modelo que lhe dá apoio. No entanto, é conveniente que a diferença não seja demasiado grande, por causa do problema da definição espacial e temporal das condições de fronteira; seria como alguém tentar desenhar a tinta da china em cima de um esquiço feito a lápis de carvão.

Mesmo que a informação meteorológica seja apenas aquela que vem dum modelo global, com pontos da malha e incrementos temporais de integração muito espaçados, o refinamento operado pelos modelos de área limitada assenta em dois melhoramentos: 1°, o aperfeiçoamento das equações dinâmicas, pensado para uma escala espacial e temporal inferior, como a incorporação dos termos de aceleração não hidrostáticos, ou, em parte, tirando proveito da economia de cálculo implicada pelo número reduzido de nós, como seja a inclusão de todos os termos de curvatura e de Coriolis; 2° uma melhor representação da superfície terrestre, conseguida à custa de uma maior resolução da topografia e de outros parâmetros fisiográficos, como o albedo, o tipo e a utilização do solo, a cobertura vegetal, o recorte da linha costeira, etc. A descrição em pormenor da interação entre a orografia e a atmosfera, e a formulação não-hidrostática das equações dinâmicas são tidos como dois aspectos chave para o sucesso dos modelos de grelha-fina (distância entre pontos da malha desde alguns quilómetros até poucas dezenas de quilómetros).

Os parâmetros estáticos que caracterizam a superfície (tipicamente representados por médias climatológicas referentes ao mês em que se inclui o período de integração, salvo o relevo) são ingeridos no processo de definição do domínio horizontal, no estágio de pré-processamento que antecede a integração das equações dinâmicas (WRF Pre-Processing System, WPS). O estado inicial é obtido por interpolação espacial dos dados de análise do modelo global: primeiramente, ainda no WPS, é feita uma interpolação horizontal, em relação às variáveis meteorológicas (altura geopotencial, vento, temperatura, razão de mistura) em cada nível isobárico, e em relação às variáveis da superfície (pressão atmosférica, *skin temperature*) e dos níveis do subsolo (temperatura e humidade). Num segundo momento, já no bloco de inicialização dentro do *core* WRF-ARW, é feita uma interpolação vertical adequada à grelha de cálculo do modelo, com a coordenada sigma em vez da pressão. O esquema de *grid-staggering* é do tipo Arakawa-C. As condições de fronteira lateral, são obtidas por interpolação das previsões do

modelo global sobre os nós que contornam a malha e nos sucessivos incrementos de tempo de integração. A fronteira superior é uma superfície de pressão constante.

A *performance* do WRF pode ser melhorada por um sistema de assimilação variacional dos dados observados que permite optimizar o cálculo do estado inicial: o pacote WRF-Var, incluído na versão actual do modelo.

1.3 Nesting

O WRF suporta o aninhamento (nesting) de um domínio mais pequeno, tendo uma malha mais fina, no interior de um domínio maior, com uma malha mais larga. O domínio aninhado (nest) é controlado nas suas fronteiras laterais pelo domínio principal (parent). O incremento temporal de integração é normalmente reduzido pela proporção entre os espaçamentos da malha grossa e da malha fina. Desse modo é possível refinar a solução para uma área restrita sem os custos computacionais implicados no recurso a uma malha fina em toda a parte; além disso, o nesting opera um downscaling gradual, pois uma corrida feita unicamente com um domínio de elevada resolução encostado à malha do modelo global teria uma definição espacial e temporal das suas condições de fronteira mais pobre. Um domínio pode conter mais do que um sub-domínio, na condição de que as suas áreas não se sobreponham. Qualquer nest pode por sua vez funcionar como *parent* em relação a um domínio ainda mais pequeno. O único requisito é que os domínios aninhados tenham os lados alinhados pela malha mais larga e os cantos coincidentes com os nós da mesma. É possível definir um moving nest, quer dizer, um sub-domínio que pode migrar para outra região do domínio principal durante a execução do modelo. Esta opção foi concebida para a previsão de furações, mas pode ser usada noutros contextos.

Há dois modos de realizar uma corrida do modelo com *nesting*: 1) o *nest* é corrido sem qualquer retorno de informação para fora dele, em simultâneo com o domínio principal ou mais tarde, recorrendo ao *output* do *parent*; 2) ao fim de cada incremento de tempo do domínio principal, o *nest*, que deu mais passos no mesmo intervalo de tempo, transmite a informação do seu estado actual a todos os nós da malha maior coincidentes

com os nós da malha inferior; este *two-way nesting* (com *feedback*) requer apenas que a razão entre os espaçamentos das duas malhas seja ímpar, uma vez que o mecanismo de *feedback* só funciona se houver uma célula pequena centrada na célula mãe, e o mesmo se passa com os lados das células.

O *input* dos valores iniciais do domínio aninhado no caso real pode ser efectuado de três maneiras opcionais:

1^a) os dados 3D atmosféricos, os dados do solo, da superfície do mar, e os dados estáticos (orografia e outros parâmetros fisiográficos) são obtidos por mera interpolação nos vértices da grelha do *nest* a partir da grelha do *parent*, numa hora igual ou seguinte à hora de inicialização do domínio *parent*;

 2^a) o domínio *nest* tem uma inicialização própria para todos os campos, referida à mesma hora da inicialização do *parent*;

3^a) os dados 3D meteorológicos são obtidos por interpolação a partir da grelha do *parent*, enquanto todos os outros resultam de uma inicialização própria do *nest*, efectuada numa hora igual ou seguinte à hora de inicialização do *parent*.

A desvantagem da 1^a opção é que não se tira partido da resolução da orografia e dos outros aspectos fisiográficos inerente à malha mais fina. A desvantagem de 2^a é não permitir iniciar o *nesting* numa hora posterior à hora 0 da corrida do domínio principal. A 3^a opção foi introduzida a partir da versão 2.1, tendo sido a utilizada neste trabalho.

1.4 Processos físicos em "escala de sub-grelha"

A designação "processos físicos" deriva da distinção clássica entre Meteorologia Física e Meteorologia Dinâmica. Os processos físicos com significado meteorológico incluem: as trocas radiativas, no seio do ar, nas nuvens e na superfície terrestre; a convecção térmica e forçada pelo vento, na troposfera; os mecanismos de atrito turbulento junto à superfície; as trocas turbulentas de calor (sensível e latente) e de vapor de água, entre a superfície e a camada de atrito, no interior da camada limite, e entre esta e a atmosfera livre; as trocas de calor por condução e as trocas de humidade, no interior do solo; a evapotranspiração; a evaporação e a condensação de água associadas à formação de

nevoeiro, neblina e geada; a microfísica das nuvens e a precipitação aquosa nas formas de chuva, neve e granizo.

Alguns desses processos, pela sua natureza microscópica e descontínua, não são do âmbito da dinâmica de fluídos; outros, por serem demasiado finos, não podem, na prática, ser representados pelas leis hidrodinâmicas na sua forma fundamental. Não podendo, quer num caso quer noutro, ser resolvidos pela equações dinâmicas próprias dum modelo numérico – discretas no espaço e no tempo – são chamados "processos de sub-grelha". As *parametrizações* são modelos específicos que relacionam os processos de sub-grelha com as variáveis de prognóstico que entram nas equações dinâmicas. O seu acoplamento a um modelo dinâmico numérico traduz-se em esquemas de cálculo que servem para estimar o efeito dum certo processo físico de sub-grelha sobre as variáveis resolvidas, em primeira instância, pelo modelo dinâmico. O seu efeito é a modificação dos valores actuais dessas variáveis, ou das suas tendências, a intervalos de tempo regulares (não necessáriamente coincidentes com o elemento de integração das equações dinâmicas). Embora um modelo atmosférico se alicerce no seu *core* dinâmico, as parametrizações estão na linha da frente quando se trata de simular os fenómenos do tempo com realismo.

No WRF os *esquemas* (de parametrização dos processos) *físicos* são implementados em módulos separados, organizados em cinco blocos principais:

- *LW* radiation (LW)
- SW radiation (SW)
- Microphysics (MP)
- Surface layer (SL)
- Land Surface Model (LSM)
- Planetary boundary layer (PBL)
- Cumulus parametrization (CP)

Os esquemas LW resolvem as trocas radiativas de "onda longa" (banda infravermelha); os esquemas SW resolvem as trocas radiativas de "onda curta" (luz e ultravioleta); os esquemas MP resolvem os processos de condensação e evaporação no ar; os esquemas SL resolvem o atrito e os fluxos de calor, de quantidade de movimento e de vapor de água na camada de atrito, junto ao solo; os esquemas LSM resolvem os trocas de calor e de água no interior do solo; os esquemas PBL resolvem as trocas turbulentas não apenas na camada limite planetária, que confina com a terra e o mar, mas ao longo de toda a coluna vertical do modelo; os esquemas CP resolvem as nuvens de origem convectiva. Dentro de cada bloco, ou classe de esquema físico, o WRF põe à disposição diversos esquemas alternativos. Uma boa parte deles são provenientes de modelos anteriores, muitas vezes de modelos operacionais de grande escala, com adaptações tendo em vista o acoplamento ao *core* específico do WRF, nas suas vertentes ARW ou NMM.

O WRF-ARW na sua versão actual, 2.2, coloca à escolha do utilizador os seguintes esquemas físicos:

<u>LW</u>: RRTM; GFDL (Eta); CAM.
<u>SW</u>:Dudhia (MM5); Goddard; GFDL (Eta); CAM.
<u>MP</u>: Kessler; Lin et al.; Thompson et al.; Eta; WSM3; WSM5: WSM6; NCEP 3-class; NCEP 5-class.
<u>SL</u>: MM5; Eta.
<u>LSM</u>: 5-layer thermal diffusion; Noha; RUC.
<u>PBL</u>: YSU (Yonsei University); Mellor-Yamada-Janjic; MRF.

<u>CP</u>: Kain-Fritsh; Betts-Miller-Janjic; Grell-Devenyi.

O leque das alternativas indicadas não difere substancialmente daquele que já existia na versão 2.0. Para uma descrição qualitativa das características dos vários esquemas e para obter uma lista dos artigos descritivos fundamentais, ver Dudhia (2005, 2007). Na secção §2.2 será feita uma distinção muito genérica dos esquemas indicados, a propósito da escolha que fizemos na preparação das experiências com o modelo.

1.5 Validação

O problema da validação de um modelo atmosférico numérico pode ser visto segundo vários ângulos (R. A. Pielke, Sr., 2002), que se complementam:

- 1 Comparação de resultados com soluções conhecidas dum modelo analítico análogo;
- 2 Verificação dos balanços que exprimem conservação de massa e energia;
- 3 Comparação com resultados de outros modelos numéricos, diferentes na concepção;
- 4 Comparação dos resultados de formulações alternativas do mesmo modelo;
- 5 Comparação das previsões do modelo com as observações.

Os chamados *estudos (ou testes) de sensibilidade*, referem-se à 4^a modalidade, muitas vezes combinada com a 5^a. O princípio é comparar entre si, ou testar um a um contra as observações, os resultados dum modelo quando se faz variar uma parte do mesmo: uma constante numa parametrização, um algoritmo, uma simplificação em alguma equação, ou mesmo a reformulação completa da representação dum processo físico particular. Em relação a esta última possibilidade, existe uma certa semelhança com a modalidade 3, com a diferença de que se trata da reformulação sómente de uma parcela do modelo. Obter resultados (quase) iguais com diferentes formulações do modelo não é garantia da validade do modelo no sentido da capacidade de realizar previsões acertadas; se, pelo contrário, forem grandes as diferenças entre os resultados, não poderão estar todos certos por igual. Do ponto de vista da utilidade prática dum modelo, a avaliação da sua prestação frente às observações é a etapa decisiva de qualquer processo de validação.

O sistema de modelação WRF, para cuja elaboração concorreram muitos especialistas e a longa experiência de modelos anteriores, ultrapassou há muito as etapas fundamentais de validação 1-5. O seu desempenho contra as observações foi comparado com outros modelos operacionais (vg., RUC, meso-Eta), ao ponto de se ter tornado operacional na previsão "doméstica"⁺ do tempo com uma resolução horizontal ~ 10km. Não obstante, prosseguem os estudos de verificação do seu desempenho em situações meteorológicas concretas, incluindo a sensibilidade das mesmas às muitas opções disponíveis quanto aos esquemas físicos e a pormenores da formulação dinâmica. Para a determinação das condições iniciais e de fonteira lateral, a realização de simulações retrospectivas permite fazer uso do acervo de dados saídos de modelos globais com as condições do tempo passado. De tais estudos aplicados espera-se o aperfeiçoamnto do modelo, seja pelo melhoramento dos seus componentes ou pela selecção das variantes dos mesmos.

^{*} dirigida para produzir a informação meteorológica de um serviço nacional.

A necessidade de definir condições de fronteira lateral a partir de simulações realizadas por um modelo de escala maior, um aspecto peculiar dos modelos de área limitada, põe o problema da sensibilidade à área do domínio e outros aspectos do acopolamento entre modelos de diferente escala, como a resolução das respectivas malhas. O problema da insuficiente definição das condições de fronteira no espaço e no tempo foi encarado por Dudhia e Bresch (2002) com a severidade bastante para levar ao desenvolvimento de uma versão global do MM5, com duas malhas hemisféricas muito mais largas (120km) do que era habitual nas aplicações correntes, ligadas pela linha do equador. No trabalho documentado no seguimento – centrado na validação do WRF quanto às previsões das condições meteorológicas à superfície, sobre a área de Portugal aninhada numa região extensa circundando a Península Ibérica – avaliou-se únicamente a sensibilidade à *variação dos esquemas das parametrizações físicas*, fixando tudo o mais. Esta linha de orientação resulta da premissa de que as parametrizações dos processos de sub-grelha assumem especial relevo junto ao solo.

O principal obstáculo a uma verificação dum modelo atmosférico contra as observações é a escassez destas. Não apenas o problema do acesso aos dados, mas, simplesmente, a inexistência de observações com uma cobertura suficientemente densa para produzir um mapeamento detalhado à escala de interesse. As observações de satélite dão um auxílio em relação a parâmetros que podem ser inferidos remotamente por radiometria, mas não substituem as observações atmosféricas de superfície. Esta dificuldade contrasta com a verificação de rotina que se efectua com os modelos globais de previsão numérica do tempo, contra as observações sinópticas do tempo passado ou contra a rede dos valores iniciais de previsões anteriores (dados de análise). A validação dum modelo a partir de um conjunto reduzido de locais de verificação, com uma repartição equilibrada dentro da região a representar, é realizável mediante uma análise estatística elementar.

Um segundo problema, de natureza computacional, é a rapidez de cálculo do modelo e a capacidade de armazenamento do seu *output*. Ao testar várias realizações do modelo, que repetem a simulação de um mesmo período temporal, um estudo que pretenda representar estatisticamente um dado fenómeno será limitado a uma amostra restrita de ocorrências do mesmo.

O teste de sensibilidade dos resultados de um modelo atmosférico a diferentes versões da parametrização dum processo físico particular não é trivial, no sentido em que nem sempre se podem tirar conclusões gerais sobre o efeito da modificação testada. Qualquer nova realização do modelo que inclua a variação de outra parte constituinte pode alterar os resultados do primeiro teste. Este aspecto é, em primeira análise, uma consequência da interação entre os processos físicos, com mecanismos de realimentação cujos efeitos são impossíveis de prever analiticamente; as parametrizações, sendo uma aproximação *ad-hoc* à realidade física, com elementos semi-empíricos, introduzem os seus próprios mecanismos de realimentação.

Capítulo 2 Testes de sensibilidade

2.1 Região geográfica, períodos de simulação e dados meteorológicos

O estudo de verificação do WRF realizado visou o território de Portugal Continental e o ano de 2006. Seguindo uma lógica de *telescoping* na escolha dos domínios de simulação, o domíno *nest*, que em teoria permite obter maior grau de resolução espacial, foi definido de modo a abarcar o território alvo; o domínio *parent* foi definido para uma área bastante maior, abrangendo toda a Península Ibérica e uma extensa faixa marítima envolvente (Fig. 2.1). O centro geométrico do *parent* corresponde a 40.5°N, 6.0°W; o eixo yy das malhas é paralelo ao meridiano 8.0°W (a figura mostra o paralelo 40°N e, à esquerda do meridiano de origem, o meridiano 10°W).



Fig. 2.1 Domínios de simulação

O espaçamento da malha do domínio maior (visível nas margens) é exactamente 24km sobre os paralelos isométricos da projecção cartográfica (Lambert): 38°, 42°. As malhas de simulação de ambos os domínios são descritas com mais pormenor no §2.2.

A escolha do ano 2006 para realizar as simulações deveu-se à existência no Laboratório de Atmosfera do Departamento de Física da UA de um arquivo de dados do GFS desse ano com as análises diárias às 12UT e as previsões para as 84 horas seguintes, de 3 em 3 horas. Todas as simulações realizadas com o WRF foram inicializadas à hora de análise referida, e o período de integração de cada simulação, ou seja, o horizonte de previsão, foi definido em 48 horas.

Sendo impraticável, do ponto de vista computacional, levar a cabo muitas realizações do WRF para todos os dias dum ano, foi necessário fazer uma selecção prévia de um número limitado de datas. Partindo do princípio de que um modelo de escala regional deverá ser capaz de reproduzir as sinuosidades do tempo nessa escala, escolheu-se, em cada mês do ano 2006, 4 dias consecutivos que apresentavam condições meteorológicas mais instáveis do que a média (na eventual falta de dados do GFS, escolheu-se o período de 4 dias que surgia em segundo lugar, segundo o mesmo critério). Com esse fim, elaborámos uma série de cronogramas representando os dados observados de quatro estações de superfície espalhadas pelo território nacional, situadas em Bragança, Coimbra, Évora e Lisboa, da pressão atmosférica, da temperatura, da humidade relativa, do vento, da nebulosidade e (Bragança e Lisboa) da quantidade de precipitação diária acumulada; utilizaram-se dados das estações que serviram para a verificação do WRF (ver §2.3), com excepção das séries da precipitação, provenientes do ECA&D*. A seguir, fez-se uma despistagem a olho dos períodos de tempo irregular, ou de manifesto mau tempo, avaliando as quedas de pressão, as viragens do vento, as mudanças brusças de temperatura, a alternância de períodos de céu coberto com períodos de céu limpo, ou a ocorrência de precipitação. A inspecção paralela das cartas de superfície provenientes do Meteorological Office do Reino Unido revelou várias situações de passagem de frentes frias associadas a vales depressionários.

^{*} European Climate Assessement & Dataset, March 2007 (http://eca.knmi.nl)

Dessa triagem, feita de forma empírica, resultaram os seguintes 36 períodos, 3 por mês, que podiamos classificar de "tempo caprichoso":

JAN-MAR	ABR-JUN	JUL-SET	OUT-NOV
26 – 28 Jan	20 – 22 Abr	15 – 17 Jul	14 – 16 Out
27 – 29 Jan	21 – 23 Abr	16 – 18 Jul	15 – 17 Out
28 – 30 Jan	22 – 24 Abr	17 – 19 Jul	16 – 18 Out
16 – 18 Fev	24 – 26 Mai	15 – 17 Ago	13 – 15 Nov
17 – 19 Fev	25 – 27 Mai	16 – 18 Ago	14 – 16 Nov
18 – 20 Fev	26 – 29 Mai	17 – 19 Ago	15 – 17 Nov
22 – 24 Mar	12 – 14 Jun	19 – 21 Set	06 – 08 Dez
23 – 25 Mar	13 – 15 Jun	20 – 22 Set	07 – 09 Dez
24 – 26 Mar	14 – 16 Jun	21 – 23 Set	08 – 10 Dez
Início–fim:12UT	Início–fim:12UT	Início–fim:12UT	Início–fim:12UT

Tabela 2.1 Datas de simulação (2006)

As 3 datas de inicialização dentro de um mês são separadas entre si por um dia, portanto por metade do tempo de integração (48h), o que acarreta que as simulações relativas a um dado mês se sobrepõem parcialmente. Procurou-se desse modo captar os episódios de tempo meteorológico instável na sua progressão, inicializando o modelo em diferentes fases evolutivas. Uma vantagem que advém desse procedimento é que se torna possível obter uma medida da degradação das previsões ao longo do tempo por comparação de duas simulações concorrentes com instantes de inicialização desfasados de 24 horas.

2.2 Configuração do modelo e escolha das opções físicas

Durante a instalação do WRF, este pode ser configurado de várias maneiras, atendendo à plataforma usada, ao formato dos dados meteorológicos de entrada (Grib1, Grib2), se admite ou não o *nesting*, processamento paralelo, etc. Nesta secção a "configuração do modelo" refere-se não a essas opções, mas às opções de *run-time*, isto é, ao modo como o modelo é configurado para realizar uma corrida. As corridas de 48h realizadas variam apenas quanto à data de inicialização (cf. Tabela 2.1) e às opções dos esquemas físicos. Os programas do modelo, escritos em FORTRAN, usam *namelists* onde são definidos

pelo utilizador os parâmetros da configuração de *run-time*. A descrição detalhada das opções e dos respectivos parâmetros encontra-se no "ARW User's Guide".

O aspecto geral dos domínios *parent* e *nest* e a projecção cartográfica foram referidos atrás (§2.1). O quadro abaixo indica o espaçamento e as dimensões *mass-staggered* das malhas dos dois domínios exibidos na Figura 2.1.

Parent:	$(42X) \times (84Y)$	$\Delta x = 24$ km
Nest:	$(56X) \times (46Y)$	$\Delta x = 8 \text{km}$

Tabela 2.2 Malha horizontal dos domínios

As dimensões referem o número de células nas direcções X e Y, aproximadamente nas direcções SN e WE, respectivamente. O número de níveis verticais (sempre igual para os dois domínios) foi fixado em 27 (os níveis sigma verticais do WRF podem ser definidos arbitrariamente, entre 0 e 1, desde que discriminem bem a atmosfera nas suas camadas mais baixas). O topo do modelo (sigma =1) foi definido para a pressão 50mb. A razão entre os incrementos de tempo escolhidos para os passos de integração, vd. Tabela 2.3, é idêntica à razão entre os espaçamentos dos domínios: $\Delta x_{parent} \div \Delta x_{nest} = 3$. Os incrementos temporais satisfazem o critério de estabilidade de Courant, tendo em conta a ordem adoptada para a expansão dos termos de advecção horizontal de momento (5ª ordem) e ao esquema de integração temporal usual (Runge-Kutta de 3ª ordem). A integração procede em dois níveis: um passo maior para os movimentos meteorologicamente significativos, e dentro de cada sub-passo RK3, passos mais curtos para a correcção acústica. No caso, uma hora compreende 25 passos maiores de integração para a malha principal e 75 para a malha fina.

Input, inicialização e condições de fronteira

O modelo que serviu de *input* do modelo foi o GFS – Global Forecast System (antigo AVN, Aviation model) operado pelos NCEP – usando-se as análises das 1200UT para efeito de inicialização do domínio maior, e as previsões de 3 em 3 horas para a definição das condições de fronteira lateral (contorno do mesmo domínio). Os dados tinham uma resolução em latitude e longitude de 0.5°, e 27 níveis verticais isobáricos,

além dos dados da superfície e de 4 camadas do subsolo. Os dados da topografia, albedo, categoria do solo, coberto vegetal, etc, foram retirados das bases de dados do NCAR, tendo uma resolução de 10 minutos de grau para o domínio maior e de 2 minutos para o dominio mais pequeno.

O esquema de *nesting* empregue foi o *two-way nesting* (vd. §1.3). O domínio aninhado foi inicializado por interpolação dos valores da malha do domínio *parent*, com 3 horas de atraso relativamente à hora de inicialização deste. Significa que o *nesting* só começa quando o WRF já traz 3 horas de integração apenas com o domínio principal. Procurouse por esse meio fazer uma transição mais gradual entre a resolução da grelha do GFS e a da grelha mais fina do WRF, assumindo que nesse lapso de tempo a malha *parent* intermédia é capaz de resolver detalhes que não se encontram nos dados meteorológicos iniciais, sem no entanto se afastar muito dos valores de análise; isto é, que conserva a memória do estado inicial, ao mesmo tempo que dela se desvia duma forma interessante para a definição das condições iniciais e das primeiras condições de fronteira do *nest*.

Configurações físicas

Os esquemas físicos do WRF-ARW versão 2.2 foram nomeados no §1.4. A razão por que o sistema WRF inclui tantas opções nos esquemas físicos é que muitos deles foram incorporados de outros modelos de vária índole, climatológicos (*vg.* CAM), de previsão do tempo em grande escala (*vg.* Eta) ou mesoescala (*vg.* MM5), etc. O interesse está em reunir no mesmo sistema de modelação os modelos físicos que deram boas provas em diferentes contextos, para além daqueles que trazem uma inovação significativa ou que foram desenhados de propósito para o WRF. Em contrapartida, a existência de escolhas múltiplas dificulta a tarefa de eleger um subconjunto do universo de possibilidades, tendo em vista realizar testes de sensibilidade às formulações resultantes da escolha. Em estudos dirigidos a fenómenos muito particulares, é natural que se teste apenas um tipo de esquema físico; *vg.*, testar dois ou mais esquemas de microfísica para ver qual deles tem melhor desempenho na previsão da precipitação em determinadas circunstâncias. Por vezes é mesmo desejável, e possível, isolar um processo físico particular, retirando artificialmente outros processos em experiências semi-idealizadas. No caso, interessava avaliar o desempenho do modelo na previsão realista de vários parâmetros atmosféricos

de superfície em diversas condições de tempo variável (mais difícil de prever). Designadamente: a pressão, a temperatura, o vento, uma qualquer medida de humidade, e, ainda, o fluxo de radiação solar global de onda curta. Atendendo às interações entre os vários processos físicos envolvidos nesses fenómenos, é impossível prever, caso a caso, se algum é dominante sobre os outros. Resta o plano da experimentação: ensaiar um número de possibilidades compatível com o tempo consumido na programação das corridas do modelo, nas próprias corridas e no trabalho de processamento dos *outputs*. Foi essa a abordagem adoptada.

A Tabela 2.3 dá conta das opções seleccionadas para os esquemas físicos. A frequência de chamada dos esquemas radiativos, da camada limite e dos cúmulos são indicados na parte inferior do quadro, a par dos incrementos temporais dos passos de integração.

MP:	• Kessler • WSM6			
LW:	• RRTM, with cloud effect			
SW:	Dudhia, with cloud effectGoddard			
SL/PBL:	• MM5/YSU, with fluxes from surface • Eta/Mellor-Yamada-Janjic			
LSM:	• Noah -> 4 layers			
CP:	Kain-FritshBetts-Miller-JanjicGrell-Devenyi			
- Parent Nest - PBL calls: every step every step Rad calls: 10 steps 10 steps CP calls: 5 steps 5 steps 1 step = 144s 48s				

Tabela 2.3 Opções físicas seleccionadas

Os esquemas físicos da radiação de onda longa (LW) e do *Land Surface Model* (LSM) são fixos. Para os esquemas da microfísica (MP), da radiação solar de onda curta (SW)

e das camadas de superfície e limite planetária (SL/PBL) tomaram-se duas variantes. Em relação ao esquema de parametrização de cúmulos (CP) consideraram-se três. Por conseguinte, da combinação das opções em jogo resulta o total de $2 \times 2 \times 2 \times 3 = 24$ configurações físicas do modelo. Dado que todas as outras opções (tamanho e posição dos domínios, espaçamento das malhas, opções dinâmicas, etc) foram mantidas, esse número configura o nosso conjunto de formulações do modelo.

Em relação aos esquemas da microfísica (MP), quisemos contrapôr o mais avançado dos esquemas WSMMP's (WRF Single Moment Microphysics), o WSM6, que inclui todas as formas aquosas de precipitação, ao esquema muito menos sofisticado de Kessler (na versão renovada vinda do Eta), um esquema de warm-rain, sem gelo. Para modelar as trocas de radiação térmica (LW) elegeu-se o RRTM (rapid radiation transfer model, utilizado por exemplo no GFS), um esquema com a reputação de ser fiável e eficiente, juntamente com a opção de incluir o efeito das nuvens. Para as trocas da radiação solar não infravermelha (SW) decidiu-se comparar o esquema simples de integração da radiação descendente de Dudhia (vindo do MM5) com o esquema de 8 bandas do Goddard Space Flight Center; ambos levam em conta o efeito das nuvens, no primeiro esquema opcionalmente; o Goddard inclui a camada de ozono, definida em média climatológica do mês em causa. Em relação à camada de superfície (SL), testaram-se os dois esquemas de similaridade disponíveis, o primeiro vindo do modelo MM5 e o segundo do modelo Eta. Quanto à camada limite planetária (PBL), descartouse o esquema MRF, por ser uma versão antiga (que irá ser retirada) do esquema da Yonsei University, YSU; o esquema PBL YSU deve ser usado em concomitância com o esquema SL MM5, ao passo que o esquema PBL de Mellor-Yamada-Janjic deve ser usado com o esquema SL Eta. Daí que as opcões para os esquemas SL e PBL aparecam emparelhadas. Para o modelo de subsolo (LSM) tomou-se o Noha (desenvolvido em conjunto pelo NCAR, os NCEP e a AFWA), um modelo de 4 camadas que inclui a humidade. Finalmente, usaram-se os 3 esquemas disponíveis de parametrização das nuvens convectivas (CP), aperfeiçoados para uso no WRF a partir de versões mais simples, com base em simulações de modelos anteriores, sendo que o de Grell-Devenyi é um método de múltiplos parâmetros que produz uma média de ensemble com pesos pré-definidos.

Para malhas muito finas (< 5 km) não se recomenda o uso de parametrização de cúmulus, visto que a convecção pode ser resolvida pela malha (Gilliland e Rowe, s/d). No caso, ambas as malhas (8 km, 24 km) requerem aquela parametrização. Os esquemas CP, SW e LW não precisam de ser chamados em todos os passos de integração; a escolha de um intervalo de tempo entre chamadas inferior ao incremento temporal da integração das equações dinâmicas reduz o trabalho de cálculo.

Outras opções

Para o cálculo do coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal usou-se o esquema 2D de 1^a ordem de Smagorinsky; a difusão turbulenta vertical é automaticamente assegurada pelo esquema PBL. A temperatura da superfície do mar (SST) foi fixada para o valor da hora de análise, atendendo ao prazo relativamente curto das previsões.

As restantes opções podem ser consultadas no Apêndice D, onde se apresenta uma das "namelist.input" que definiu os parâmetros de configuração das corridas; as restantes (863) diferem apenas nos parâmetros sublinhados a azul, consoante a data e as opções físicas. O manual "ARW v2.2 User's Guide" esclarece o significado dos parâmetros. Dum modo geral, foram seguidas as recomendações para o caso em aplicação (tipo de simulação, espaçamento da malha); na falta dessa informação, seguiram-se valores *default*. No Apêndice D dá-se igualmente uma das *namelists* lida pelo módulo de préprocessamento do WRF (WPS), "namelist.wps"; as restantes (35) diferem apenas nas datas a azul água.

2.3 Estações meteorológicas de superfície e variáveis comparadas

Observações contra previsões

Para a comparação com as observações de superfície serviu de referência um conjunto de 7 estações meteorológicas da rede da WMO assentes em solo português:

WMO index		LAT	LON	ALT
8575	Bragança	41°48'N	6°44'W	692 m
8570	Castelo Branco	39°50'N	7°29'W	384 m
8548	Coimbra/Cernache	40°09'N	8°28'W	179 m
8558	Évora/C.Coordenador	38°32'N	7°54'W	246 m
8554	Faro/Aeroporto	37°01'N	7°58'W	8 m
8579	Lx/Gago Coutinho	38°46'N	9°08'W	105 m
8545	Porto/Pedras Rubras	41°14'N	8°41'W	77 m

 Tabela 2.4 Estações meteorológicas

As séries temporais das variáveis meteorológicas dessas estações para o ano em estudo, 2006, foram descarregados do site <u>http://meteo.infospace.ru</u>. Essas séries são, em regra, tri-horárias: 00UT, 03UT, etc, sendo pois nessa base que foi efectuada a comparação com as saídas múltiplas do modelo. Seleccionaram-se 5 variáveis básicas:

Variáveis observadas	
Pressão atmosférica	P
Temperatura do ar	<i>T</i>
Humidade relativa	<i>RH</i>
Intensidade do vento de superfície	<i>ff</i>
Rumo do vento de superfície	. <i>dd</i>

A pressão atmosférica refere-se à pressão na estação, sem correcção de altitude. Segundo a regra acordada no âmbito da WMO, a temperatura do ar é medida a 2 metros acima da superfície do solo, ao abrigo da radiação solar; a humidade relativa é medida nas mesmas condições (normalmente a partir das leituras de um higrómetro de termómetro seco e molhado); o vento de superfície, ou vento junto ao solo, é medido a 10 metros acima da superfície do solo, livre de obstáculos. Embora sabendo que os dados de observação utilizados se reportam ao tempo presente, numa dada hora, os dados do vento não são de interpretação directa, porque não é dada nenhuma informação na fonte sobre o intervalo de tempo (minutos) em que se avalia, em termos médios, o vento; localmente esta grandeza está sujeita a constantes flutuações, e uma medida instantânea (que nunca é) não fornece a melhor indicação para fins de análise sinóptica. Nas séries temporais utilizadas a pressão da estação vem dada em milibar, a temperatura em grau Celsius, a humidade relativa em percentagem, a velocidade do vento em metro por segundo e o rumo do vento em graus de arco. Compreensivelmente, as observações do vento têm uma discretização inferior às restantes variáveis, sendo a velocidade estimada a intervalos de 1 m/s e o rumo a intervalos de 10°.

Quanto aos valores de previsão, a pressão e a temperatura do ar são igualmente variáveis saídas do modelo, ao passo que a humidade relativa teve que ser calculada a partir daquelas e da razão de mistura do vapor, e a direcção e a intensidade do vento simuladas deduzem-se directamente das componentes do vento:

Variáveis simuladas	
Pressão atmosférica à superfície	PSFC
Temperatura do ar a 2 metros	T2
Razão de mistura a 2 metros	Q2
Componente Oeste-Este do vento a 10 metros	Ũ10
Componente Sul-Norte do vento a 10 metros	V10

A razão de mistura é adimensional (vindo em kg/kg) e as restantes grandezas vêm em unidades SI. As designações que aparecem à direita da descrição das variáveis procedem da nomenclatura própria do modelo. Notar a indicação da altura em metros nas grandezas de temperatura, humidade e vento, mostrando que se tratam de parâmetros de diagnóstico que facilitam a comparação com as observações das estações de superfície. Em rigor, U10 e V10 são as componentes do vento nas direcções x e y da malha de simulação, só coincidindo exactamente em todos os pontos com as direcções Oeste-Este e Sul-Norte, respectivamente, quando essa malha é construida sobre uma projecção de Mercator. No caso, utilizou-se uma projecção de Lambert Conforme, pelo que as duas componentes tiveram que ser corrigidas para representar o vento segundo as direcções geográficas. Sendo a razão de mistura uma medida pura do conteúdo do ar em vapor de água, enquanto a humidade relativa traduz o grau de saturação em vapor, dependente ainda das condições de pressão e temperatura, é útil considerar a comparação para ambas as variáveis. A razão de mistura derivada das observações requer um cálculo inverso ao necessário para obter o valor de previsão da humidade relativa.

A tabela abaixo resume as grandezas que serviram para comparar as séries de valores observados nas 7 estações com as séries simuladas para os mesmos locais, bem como a nomenclatura adoptada no seguimento para as mesmas:

Variáveis comparadas	
Pressão atmosférica à superfície	PSFC
Temperatura do ar a 2 metros	<i>T2</i>
Razão de mistura a 2 metros	<i>Q2</i>
Humidade relativa a 2 metros	RH2
Intensidade do vento a 10 metros	Wind10S
Rumo do vento a 10 metros	Wind10D

Tabela 2.5 Variáveis comparadas com as observações das estações da Tabela 2.4

Além das variáveis já mencionadas, foi feita uma comparação local para a radiação solar global de onda curta (OC), mais precisamente, para a irradiância na superfície terrestre resultante da soma da radiação solar directa e da radiação solar difusa, excluída a gama infravermelha. Para o efeito, recorreu-se aos dados de uma única estação radiométrica operada pelo Centro de Geofísica da Universidade de Évora:

Tabela 2.6 Estação radiométrica

Estação: Évora/Mitra, 38.53°N, 8.0°W
Variável comparada: Irradiância solar em OC à superfície, SWDOWN

SWDOWN é a designação da variável de saída do WRF, que vem dada em W/m². As observações disponíveis, nas mesmas unidades, são constituidas por séries de medidas instantâneas de 10 em 10 minutos, das quais se utilizaram apenas os valores de 3 em 3 horas às mesmas horas consideradas para as outras variáveis/estações: 00UT, 03UT,etc. A comparação das previsões com as observações justifica-se não apenas pela importância que uma boa representação das trocas radiativas pelo modelo acarreta, mas também por causa da interação entre as nuvens e a radiação solar. Se a formação de nuvens for bem calculada pelo modelo, é plausível uma melhor concordância entre as observações e as previsões da radiação solar global incidente na superfície; sendo a estabilidade do ar condicionada pelo influxo radiativo na superfície, o acerto quanto às nuvens convectivas depende do acerto na radiação solar incidente.

Não foi feita qualquer correcção aos valores de saída do WRF que levasse em conta a diferente resolução temporal entre medidas e previsões. O modelo foi configurado com um passo temporal de 48 s para o domínio *nest* (1/3 do passo do domínio *parent*); sobre a resolução temporal dos dados de observação, o qual dependerá do tempo de resposta dos instrumentos de observação e da precisão temporal da leitura, não se possui informação, mas deverá ser inferior, excepto para a radiação solar. Há ainda o problema da diferente precisão numérica dos valores comparados, que ganha acuidade quanto aos valores da velocidade e da direcção do vento. O efeito desta diferença no cálculo dos erros das previsões será discutido no §2.4.

O presente estudo não contempla a precipitação nem as nuvens, dois elementos de difícil previsão pelos modelos numéricos e de difícil medição pelos instrumentos convencionais. O WRF representa as nuvens na forma difusa de quantidade de água condensada em vários níveis, que não tem uma tradução simples em nebulosidade. Já a precipitação saída do modelo, designadamente a quantidade de água precipitada desde o início da simulação (dividida em dois tipos: precipitação não convectiva, ou porção resolvida pela malha, e a precipitação convectiva, de escala de sub-grelha), permite obter a precipitação acumulada ou a intensidade média de precipitação entre dois frames. Por outro lado, não foi possível dispôr de séries regulares de observações em tempo útil. Os dados da nebulosidade nas estações atrás referidas (fracção de céu coberto, por nuvens baixas, médias ou altas) contêm muitas lacunas, e a precipitação está ausente. As séries de dados fiáveis de precipitação que foi possível recolher (ECA&D) dizem respeito à precipitação diária acumulada de algumas estações climatológicas (diferentes das estações da Tabela 2.4), não estando por enquanto actualizadas até ao fim de 2006. Por último, quer a precipitação quer a nebulosidade são fenómenos muito irregulares no espaço e no tempo, que colocam o problema da representatividade das observações locais e requerem uma caracterização estatística especializada.

Cálculos coadjuvantes

Para a conversão da razão de mistura Q em humidade relativa RH, ou para a operação inversa,

$$Q \equiv \varepsilon \frac{e}{P-e} = \varepsilon \frac{e_s}{P-e_s} RH$$
(2.1)

 $\varepsilon = 0.622$, P = pressão, e = pressão de vapor e $e_s = pressão$ de vapor de saturação, usou-se a definição de humidade relativa recomendada pela WMO,

$$RH \equiv \frac{e}{e_s} \frac{P - e_s}{P - e}$$
(2.2)

e a tensão de vapor de saturação deduzida da equação de Clausius-Clayperon combinada com a lei empírica de variação linear do calor latente de condensação com a temperatura T (Borhen e Albrecht, 1998):

$$e_{s} = e_{s0} \exp\left\{A\left(\frac{1}{T_{0}} - \frac{1}{T}\right) - B\ln\frac{T}{T_{0}}\right\},$$
 (2.3)
 $A = 6808 \text{K}, \quad B = 5.09,$

tomando-se para T_0 o ponto de gelo à pressão atmosférica padrão,

$$T_0 = 273.15 \text{K}, \ e_{s_0} = 610.94 \text{Pa.}$$
 (2.4)

Para obter os valores de previsão sobre as estações meteorológicas usou-se um esquema de interpolação bilinear, com necessárias modificações, atendendo à obliquidade entre os lados das células da malha horizontal de simulação (rectangular), definida em cima de uma projecção de Lambert, e as linhas coordenadas dessa projecção⁺. Fazendo um *mapping* (aplicação) entre os vértices de uma célula e os vértices dum rectângulo de coordenadas cartesianas variando, por exemplo, entre 0 e 1, é possível, por meio de interpolação bilinear inversas assente nos 4 nós imagem e nos correspondentes pares de coordenadas geográficas dos nós de origem, achar no contradomínio as coordenadas cartesianas da imagem do ponto cujas coordenadas geográficas são dadas. A partir disto, qualquer campo escalar pode ser interpolado para esse ponto pelo esquema bilinear

^{*} Se a malha fosse definida sobre uma projecção de Mercator, uma interpolação bilinear seria satisfatória.

cartesiano. Para chegar aos quatro pontos da malha vizinhos a dada estação de forma inequívoca^{**}, usou-se um teorema conhecido que permite determinar se um ponto se encontra dentro das fronteiras dum polígono. Fazendo um novo *mapping* entre os vértices de uma célula e os pontos dum sistema rectangular definidos pelos pares de coordenadas geográficas dos primeiros, os pontos imagem definem um polígono; independentemente da forma deste, a soma dos ângulos definidos pela linhas que unem um ponto aos vértices (cuja expressão cartesiana se refere aos eixos do sistema rectangular do contradomínio) será um ângulo pleno (2π) se e só se esse ponto se encontrar no interior do polígono.

2.4 Verificação contra as observações, ponto a ponto

Medidas de erro

Descreve-se aqui o método utilizado na avaliação quantitativa do desempenho do WRF nas 24 formulações alternativas representadas na Tabela 2.3, relativamente às variáveis e estações meteorológicas referidas no §2.3 e aos períodos de simulação indicados no §2.1.

Calcularam-se dois tipos de erro médio, que traduzem o afastamento entre os valores simulados e os valores observados de vários parâmetros meteorológicos: o *valor médio quadrático do erro*,

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (\Phi_i')^2\right]^{1/2}$$
(2.5)

e o erro médio:

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \Phi'_i$$
(2.6)

onde

$$\Phi' = \Phi_f - \Phi_{obs} \tag{2.7}$$

^{**} Que se reduziria a um simples problema de ordenação de valores numa projecção de Mercator.

representa o desvio entre um valor individual de previsão e o valor observado no mesmo local e no mesmo instante, e N é o número de verificações. O *Bias* permite avaliar o enviesamento dos dados: sendo positivo, significa que as previsões tendem a sobrestimar os valores observados, e o contrário quando seja negativo. Para obter uma medida da dispersão do erro, calculou-se o *desvio padrão do erro*:

$$STDE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \left(\Phi'_{i} - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \Phi'_{i}\right)^{2}\right]^{1/2}$$

= $\left[\left(RMSE\right)^{2} - \left(Bias\right)^{2}\right]^{1/2}$ (2.8)

Em relação ao rumo vento, convenciona-se aqui uma diferença Φ' positiva quando o vector simulado da velocidade do vento se desvia em sentido horário relativamente ao vector vento observado. Assim, nas latitudes visadas a norte do equador um *Bias* positivo (negativo) indicará que o vento previsto se coloca, em média, em viés anticiclónico (ciclónico) em relação ao vento observado. O rumo do vento (direcção de onde sopra) é dado em graus de arco, 360 para o N geográfico, medido no sentido dos ponteiros do relógio; como o desvio absoluto do rumo não pode exceder 180 graus, a diferença (2.7) tem que ser modificada quando o módulo ultrapassa esse valor:

$$\Phi' = \left(\Phi_f - \Phi_{obs}\right) \left[1 - 360 / \left|\Phi_f - \Phi_{obs}\right|\right], \quad \left|\Phi_f - \Phi_{obs}\right| > 180^\circ$$
(2.9)

A grande disparidade entre a incerteza nos valores da direcção e da velocidade do vento observados (metade do menor intervalo das medidas), $\delta(dd) = 5^{\circ}$, $\delta(ff) = 0.5 \text{ m/s}$, e a precisão dos valores correspondentes derivados do modelo, que pode ser desprezada, introduz uma incerteza nas medidas trimestrais ($N \sim 40-60$) tanto do *Bias* como do *RMSE*, dado por: $\delta(dd)/\sqrt{N} \sim 0.6^{\circ} - 0.8^{\circ}$, $\delta(ff)/\sqrt{N} \sim 0.06 - 0.08 \text{ m/s}$.

A análise foi feita separadamente para os conjuntos de observações por trimestre e para o ano inteiro em apreciação, de modo a avaliar as diferenças estacionais e a ter uma medida anual dos erros. Fez-se a representação gráfica das três grandezas em função do prazo de previsão, considerando os 16 instantes sucessivos de 3 em 3 horas ao longo das 45 horas de simulação do *nest*, o qual foi inicializado sempre às 15UT.

Sendo 9 o número de datas de inicialização por trimestre (Tabela 2.1) e 7 o número de locais de verificação (Tabela 2.4), obtém-se, no máximo, supondo que não há falta de dados, $N_{trim} = 63$. Para os erros anuais, $N_{ano} = 63 \times 4 = 252$. O limite superior do número total de comparações efectuadas para todo o ano de 2006, que vem sendo igual ao valor anual de N vezes o número de prazos de previsão, é $N_{ano} \times 16 = 4032$. No caso particular da irradiância solar de OC (SWDOWN) o número máximo de observações é 7 vezes mais pequeno do que para as restantes variáveis, visto que os dados observados se reportam apenas a uma estação (Tabela 2.6). Na prática, verificam-se lacunas nos registos meteorológicos pelo que o número efectivo de observações não atinge os valores indicados, conforme se descreve nas tabelas abaixo. Algumas horas do dia não estão representadas em todas as estações, o que explica os números mais pequenos nas primeiras 6 variáveis. É notória a falta de maior número de observações da direcção do vento (Wind10D) do que da velocidade do vento (Wind10S), o que se deve a situações de vento suave em que a informação do rumo às vezes se perde, ou, simplesmente, de vento calmo (registo de velocidade igual a zero). Relativamente à radiação solar (SWDOWN), há muitos dados em falta nos últimos três meses do ano.

Número de observações (N) p/ JAN-MAR							
prazo de previsão (h)	PSFC	T2	Q2	RH2	Wind10S	Wind10D	SWDOWN
3	63	63	63	63	63	60	9
6	37	37	37	37	37	35	9
9	63	63	63	63	62	58	9
12	63	63	63	63	63	58	9
15	63	63	63	63	62	57	9
18	63	63	63	63	63	61	9
21	40	40	40	40	40	36	9
24	37	37	37	37	37	36	9
27	63	63	63	63	63	60	9
30	36	36	36	36	36	33	9
33	63	63	63	63	62	55	9
36	62	62	62	62	61	55	9
39	63	63	63	63	62	55	9
42	63	63	63	63	62	59	9
45	41	41	41	41	41	36	9
48	35	35	35	35	35	32	9

	Т	a	b	el	la	2.	7
--	---	---	---	----	----	----	---

١	lúmero	de obsei	rvações	(N) p/ ABR-J	IUN
PSFC	T2	Q2	RH2	WIND10S	WIND10D

Tabela 2.7	(continuação)
------------	---------------

Número de observações (N) p/ ABR-JUN							
prazo de previsão (h)	PSFC	T2	Q2	RH2	WIND10S	WIND10D	SWDOWN
3	63	63	63	63	63	57	9
6	38	38	38	38	38	32	9
9	63	63	63	63	61	53	9
12	63	63	63	63	61	56	9
15	60	60	60	60	59	48	9
18	63	63	63	63	62	52	9
21	45	45	45	45	45	34	8
24	37	37	37	37	37	31	8
27	63	63	63	63	63	58	8
30	39	39	39	39	39	34	8
33	63	63	63	63	62	54	8
36	63	63	63	63	58	52	8
39	61	61	61	61	57	45	8
42	63	63	63	63	60	50	8
45	46	46	46	46	45	31	7
48	36	36	36	36	36	28	7

Número de observações (N) p/ JUL-SET							
prazo de previsão (h)	PSFC	Т2	Q2	RH2	Wind10S	Wind10D	SWDOWN
3	63	63	63	63	63	52	6
6	39	39	39	39	39	31	6
9	63	63	63	63	63	54	6
12	63	63	63	63	60	56	6
15	63	63	63	63	58	50	6
18	63	63	63	63	56	48	6
21	42	42	42	42	41	32	6
24	36	36	36	36	36	29	6
27	63	63	63	63	63	56	6
30	37	37	37	37	37	30	6
33	62	62	62	62	62	53	6
36	62	62	62	62	62	58	6
39	62	62	62	62	58	49	6
42	62	62	62	62	59	51	6
45	41	41	41	41	39	31	6
48	37	37	37	37	36	27	6

Número de observações (N) p/ OUT-DEZ								
prazo de previsão (h)	PSFC	T2	Q2	RH2	Wind10S	Wind10D	SWDOWN	
3	62	62	62	62	58	52	2	
6	39	39	39	39	35	32	2	
9	63	63	63	63	58	52	6	
12	62	62	62	62	57	53	1	
15	62	62	62	62	58	54	1	
18	62	62	62	62	60	59	1	
21	46	46	46	46	44	39	2	
24	39	39	39	39	39	34	1	
27	62	62	62	62	61	58	1	
30	38	38	38	38	36	35	1	
33	63	63	63	63	62	60	4	
36	62	62	62	62	61	57	1	
39	62	62	62	62	60	55	1	
42	62	62	62	62	60	59	1	
45	46	46	46	46	43	38	2	
48	39	39	39	39	38	36	1	

Tabela 2.7 (continuação)

Testes de sensibilidade

O teste de sensibilidade às parametrizações físicas consistiu em repetir, para cada uma das 24 realizações do modelo da Tabela 2.3., o cálculo do *Bias, do RMSE* e do *STDE* referentes às previsão estimadas sobre as estações a partir da malha do domínio aninhado, compreendendo as simulações agrupadas por trimestre ou no ano completo. Os pares de valores {(erro, prazo-de-previsão)} postos na forma de curvas representam a evolução estatística dos erros – relativa aos conjuntos das datas e das estações que serviram de amostra – com o tempo de integração. A comparação das 24 curvas, para uma dada variável, um tipo de erro e uma dada época, permite distinguir o efeito que a variação da formulação física do modelo acarreta no acordo das previsões da variável com as observações situadas dentro dessa época. A comparação de curvas homólogas referentes a diferentes trimestres permite apreciar a variação sazonal dos erros. Conforme se explicará no §3.1, foi adoptado um esquema de representação gráfica tal que permite aceder ao grau de interação entre os diferentes processos físicos em jogo na simulação de uma ou de outra variável.

Como a hora de inicialização é fixa (12UT para o domínio *parent*, 15UT para o *nest*), cada prazo de previsão corresponde a uma hora precisa do Tempo Universal, ou tempo civil de Greenwich. O maior desvio de longitude entre as estações meteorológicas (2.4° entre Bragança e Lisboa) traduz-se num desvio do tempo civil local, igual ao do tempo solar médio, que não ultrapassa 10 minutos de hora. Assim, as curvas de erro não traduzem sómente a evolução do erro com o prazo de previsão, mas reflectem também as variações diurnas.

Finalmente, calculou-se o valor médio de cada curva temporal do *RMSE* de modo a obter uma indicação numérica do desempenho de cada uma das configurações do modelo em relação a certa estação do ano e a determinada variável. Para simplificar, atribui-se o mesmo peso às diferentes horas da previsão. O erro integral do ensemble coinstituido por *M* configurações, ao fim de um certo tempo de integração Δt_{integ} , será representado por:

$$E_{ens} = \frac{1}{M} \left\{ \frac{1}{\Delta t_{\text{integ}}} \int_{t_{\text{mic}}}^{t_{\text{integ}} + \Delta t_{\text{integ}}} \sum_{m=1}^{M} RMSE_m dt \right\}$$
(2.10)

onde o índice *m* refere um membro do ensemble, t_{inic} indica um instante inicial e Δt_{integ} o tempo de integração decorrido desde esse instante. Quanto ao desempenho individual dos membros, foi definido pelo índice adimensional que compara o erro do membro com o erro do ensemble:

$$r_m = \frac{1}{\Delta t_{\text{integ}}} \int_{t_{\text{integ}}}^{t_{\text{integ}}} RMSE_m dt / E_{ens}$$
(2.11)

Este *índice de desempenho relativo* será igual a 1 quando a média sobre o tempo de integração de $RMSE_m$ for igual ao erro de ensemble E_{ens} . A configuração que obtiver o valor r_m inferior a 1 mais baixo será classificada como a que apresenta o melhor desempenho, no sentido do melhor acordo com as observações; aquela que tiver um valor de r_m superior a 1 mais alto será classificada como a de pior desempenho. Para simplificar a notação, usou-se a soma integral em (2.10) e (2.11); na prática, sendo *n* o
número de instantes em que é feita a comparação entre os valores de previsões e de observação, substituindo $\Delta t = n\delta t$, $\frac{1}{\Delta t} \int_{t}^{t+\Delta t} erro(t)dt \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} erro(t_i)$. No caso, $\delta t = 3h$.

2.5 Comparação directa entre formulações do modelo

Embora as medidas de erro face às observações locais permitam comparar o desempenho do modelo nas suas diferentes formulações, é útil avaliar isoladamente a dispersão entre as previsões produzidas pelas várias realizações para um mesmo prazo de previsão (*t*) e um mesmo ponto (*i*,*j*). Define-se aqui essa dispersão pela média, estendida a uma época e aos pontos do domínio, do desvio padrão dos valores de saída $\Phi_{i,i,k,m}(t)$ dos M membros do ensemble de formulações:

$$EnsSD = \frac{1}{I \times J \times K} \sum_{i=1, j=1, k=1}^{I, J, K} \left\{ \left[\frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \left(\Phi_{i, j, k, m} - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \Phi_{i, j, k, m} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$$
(2.12)

onde $I \times J$ representa a dimensão da malha e K o número de inicializações dentro da época que se pretende caracterizar. No caso vertente, M = 24, I = 42, J = 81 e, para um trimestre, $K_{trim} = 9$. No caso especial do rumo do vento, a diferença entre o rumo individual (um membro) e o rumo médio (M menbros) é dada pelo ângulo formado pelo vector vento individual e pela média de *ensemble* dos M vectores do vento normalizados pela respectiva norma. A grandeza (2.12), calculada para cada variável Φ de saída do modelo (ou derivada de variáveis de saída) e para um certo trimestre, será uma função do tempo de previsão.

Evidentemente que num dado ponto da malha a dispersão de ensemble depende da data de inicialização e poderá ser bastante maior do que a grandeza *EnsSD*; do mesmo modo, para determinada data de inicialização a dispersão de ensemble varia de ponto para ponto. Assim, a grandeza *EnsSD* traduz sómente a largura da distribuição das previsões pelos membros do ensemble em termos globais, para o domínio e para a amostra temporal em estudo.

2.6 Inicializações desfasadas no tempo

Embora o primeiro objectivo do trabalho fosse comparar diferentes formulações dos processos físicos de sub-grelha do WRF quanto à previsão das variáveis atmosféricas junto ao solo, realizou-se ainda uma experiência de cariz diverso: comparar resultados de simulações concorrentes, distintas quanto ao momento de inicialização.

O esquema de justaposição dos períodos de dois dias de integração descrito no §2.1 oferece a possibilidade de comparar os elementos constituitivos de pares de previsões para a mesma hora/dia, distanciados porém de 24 horas na data de inicialização, portanto, com dois prazos de previsão separados por idêntico período. Havendo, para cada mês, 2 pares de períodos de simulação nessas circunstâncias (ver Tabela 2.1), efectuou-se a média de ensemble (das M=24 configurações) das diferenças relativas entre os valores saídos dos $K_p=2\times12=24$ pares de inicializações compreendidos no ano, em função do prazo de previsão (*t*):

$$=\frac{1}{I \times J \times K_{p}} \sum_{i=1,j=1,k=1}^{I,J,K_{p}} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \left| \frac{\Phi_{i,j,k(t),m} - \Phi_{i,j,k(t+24h),m}}{\Phi_{i,j,k(t),m}} \right|$$
(2.13)

É necessário abrir aqui uma excepção quando se considera a diferença aplicada ao rumo do vento (*Wind10D*). Com efeito, sendo o rumo do vento, dado em graus de arco é claro que não faz sentido comparar uma diferença de rumo com o valor do rumo, pois a diferença relativa dependeria do ponto da rosa dos ventos. Por isso, convencionou-se uma diferença relativa de 100% quando os dois ventos têm direcções diametralmente opostas, diferindo de 180 graus. Assim, para esta variável substitui-se a diferença relativa sob o sinal de módulo na Eq. (2.13) por

diferença relativa individual do rumo do vento =

$$\frac{\Phi_{i,j,k(t),m} - \Phi_{i,j,k(t+24h),m}}{180}; \quad \Phi = rumo \ em \ graus \ de \ arco$$
(2.14)

com a devida atenção ao carácter circular da variável Φ , como se viu na Eq. (2.9).

2.7 Aspectos computacionais

O WRF-ARW v2.2 foi instalado numa plataforma GNU/Linux 32-bit com processador Intel *dual-core* de 2.40GHz. As simulações – envolvendo 864 *runs* do modelo dinâmico e 36 do módulo de pré-processamento (definição das malhas de cálculo e ingestão dos valores de *input*) – foram repartidas por 4 máquinas idênticas, cedidas pelo Grupo de Meteorologia e Climatologia da Universidade de Aveiro (CliM@UA).

Atendendo ao número de corridas, ao volume dos *outputs*, à gestão dos ficheiros nas várias etapas, e à massa de cálculos implicada no processamento das previsões e das observações, a concretização do projecto seria impracticável sem a articulação entre programação na *shell (vg. bash)* e programação numa linguagem adequada ao cálculo (*vg.* FORTRAN). A automatização das corridas múltiplas do WRF foi feita por meio de um programa *bash script*, auxiliado por *scripts* encapsulados destinados à actualização das *namelists* lidas pelos programas FORTRAN do modelo, ao controlo de datas, à documentação das corridas, etc. Outro *script* realizou a extração dos campos de superfície a partir dos ficheiros NetCDF de saída do modelo, recorrendo ao utilitário *ncdump* de conversão para o formato ASCII e, para efectuar a rotação do vento, ao utilitário do NCAR *read_wrf_nc*, juntamente com um programa em FORTRAN 90 destinado à escrita dos valores numa forma personalizada. Finalmente, a implementação dos algoritmos de leitura dos dados de observação e de análise das saídas do modelo (interpolação, grandezas derivadas, cálculo dos erros de previsão, etc) foi feita em FORTRAN 90, sendo a execução dos programas coordenada por *bash scripts*.

O desenvolvimento computacional representou alguns meses de trabalho; parte desse esforço resultou na flexibilidade e facilidade de manutenção dos programas, concebidos para dar resposta rápida a outros casos (datas, malhas, tempo de integração, opções do modelo, lacunas de dados observados, selecção de variáveis, locais de verificação, etc).

(Para a elaboração dos gráficos usou-se o MATLAB 5.3 para Windows e a folha de cálculo do openSuse 10.2.)

Capítulo 3 Resultados e discussão

3.1 Erros trimestrais e anuais das previsões de superfície

A série de Figuras A.1-21 (Apêndice A) mostra as curvas obtidas para o *Bias, RMSE*, e *STDE* definidos nas Eqs. (2.5)-(2.8), em função do tempo de previsão. Este refere-se ao tempo decorrido desde a inicialização do domínio principal (*parent*), 1200UT do 1° dia de integração. Porém, os gráficos reportam-se às previsões saídas do domínio aninhado (*nest*), que começam invariavelmente 3 horas depois, 1500UT. As simulações terminam às 1200UT do 2° dia, 45 horas desde o início do *2-way nesting*, ou 48 horas à frente da inicialização do modelo. Cada curva é a representação gráfica da função spline cúbica interpoladora da função de erro determinada em 16 nós: *forecast time* = 3*h*, 6*h*, ..., 48*h*. Excepcionalmente, as curvas de erro da pressão à superfície (*PSFC*) e, por via desta, da humidade relativa (*RH2*) (cujos valores de previsão derivam da razão de mistura, da temperatura e da pressão à superfície nos pontos da malha do *nest* após o instante de inicialização desse domínio, levando em conta a maior resolução da topografia.

O título das figuras indica, por ordem, o tipo de erro, a variável, e o trimestre (ou ano). Para clarificar a discussão, a sequência das figuras está hierarquizada por variável, tipo de erro e trimestre, apenas se mostrando as curvas anuais para o *RMSE*. A designação das variáveis atmosféricas comparadas (7) segue a nomenclatura da tabela 2.4. As datas de inicialização (9 por trimestre) e as estações meteorológicas que serviram para a verificação (1 para a *SWDOWN*, 7 para as restantes variáveis), tomadas em conjunto no cálculo dos erros, foram referidas nas Tabelas 2.1, 2.4 e 2.6. As formulações do modelo

(24) foram descritas no §2.2, diferindo entre si pela combinação das opções para os esquemas físicos referidas na Tabela 2.3. O número total de comparações envolvidas na construção de uma única curva é dado pelo somatório dos valores em coluna indicados na Tabela 2.7.

Atendendo ao número de variantes do modelo envolvidas, foi preciso desdobrar cada figura em duas, cada uma com 12 curvas; a figura superior contém as variantes com o esquema de microfísica (MP) de Kessler, e a inferior com o esquema WSM6. Dentro de cada grupo, o tipo de traço distingue as duas opções para o esquema da radiação (SW), Goddard e Dudhia. Por último, as cores servem para distinguir as seis combinações dos dois esquemas associados de camada de superfície e camada limite planetária (SL/PBL), MM5/YSU e Eta/Mellor-Yamada-Janjic, com os três esquemas de parametrização de cúmulos (CP), Kain-Fritsh, Betts-Miller-Janjic e Grell-Devenyi.

Previsões mais acertadas implicam um *RMSE* mais pequeno em valor absoluto, e a inversa também é verdadeira. O *Bias*, ou erro médio, não fornece a melhor indicação do acerto das previsões com as observações, antes representando o viés das previsões em termos médios. Um *Bias* mais pequeno em valor absoluto, relativamente a um mesmo conjunto de observações, não significa que as previsões sejam mais acertadas, a menos que o desvio padrão do erro (*STDE*) seja muito inferior ao erro médio quadrático (cf. Eq. 2.8):

$$STDE^2 \iff RMSE^2 \iff RMSE^2 \sim Bias^2$$
,
 $STDE^2 \sim RMSE^2 \iff Bias^2 \ll RMSE^2$.

A relação entre o erro de viés e o maior ou menor enviesamento dos valores previstos carece de um reparo. Tomemos, por exemplo, dois conjuntos com o *mesmo erro médio* (*Bias*) mas com *diferente dispersão dos erros* (*STDE*); se por "previsões enviesadas" se entender que os erros individuais estão distribuídos de forma assimétrica em relação ao erro médio, então serão "mais enviesadas" as previsões do conjunto que apresentar a dispersão do erro mais pequena. Esta *nuance* na interpretação do erro de viés não se coloca na comparação entre as 24 curvas de erro da mesma figura, as quais se reportam em cada ponto ao mesmo conjunto de observações, mas sim na evolução temporal das curvas e nas diferenças estacionais.

Pressão do ar à superfície (PSFC)

As Figuras A.1-A.3 reportam os erros de previsão da *PSFC*. As curvas do *Bias* mostram que o erro médio é sempre positivo, oscila mais durante o dia, é quase sempre inferior a 3 mb e é maior nos meses de Primavera-Verão. As diferenças entre as 24 configurações físicas são geralmente pequenas, em termos relativos, excepto nos meses Abril-Junho, onde se nota uma diferença máxima de cerca de 1 mb com uma separação nítida entre os dois esquemas radiativos. O enviesamento no sentido de pressões previstas acima dos valores observados não é tão pronunciado como parece, se virmos que o desvio padrão do erro, *STDE*, é várias vezes maior do que o erro médio. Isso reflecte-se no erro médio quadrático, *RMSE*, da ordem de 6 mb. Um traço comum às várias curvas é a oscilação que se observa nas horas de sol, mais vincada no *Bias*, com picos por volta das 10UT e 18UT, embora nos meses de Outubro-Dezembro também apareça uma oscilação durante a noite. A regulatidade dessas oscilações sugere um fenómeno ondulatório, como ondas de maré, porém o período de oscilação não é coincidente com essas ondas.

Radiação solar global de OC (SWDOWN)

A inspecção das curvas das Figuras A.4-A.6, referentes à radiação solar global de onda curta, *SWDOWN*, mostra que o *Bias* desta grandeza, naturalmente nula durante a noite (com uma pequena distorção introduzida pela interpolação spline e pelos erros de observação^{*}), sofre uma forte oscilação diurna. As previsões tendem a sobrestimar as observações durante a manhã e a subestimar as observações durante a tarde. É de admitir que essa oscilação possa induzir a oscilação do erro das previsões da pressão à superfície. Convém, no entanto, lembrar que as as curvas da *SWDOWN* não têm a representação espacial das restantes curvas de erro. Em média integral para as 48 h de previsão os desvios negativos compensam os desvios positivos. O efeito dos esquemas radiativos traduz-se num *Bias* mais positivo do esquema Goddard comparado como esquema alternativo de Dudhia. A dispersão dos erros de previsão *STDE* e o erro médio quadrático acentuam-se significativamente nos trimestres de maior influxo solar, AbrilJunho e Julho-Setembro. Os valores do *RMSE* sugerem o fraco desempenho no que toca

^{*} Os ficheiros de dados da estação radiométrica do CGE apresentavam valores espúrios durante a noite, negativos, embora diminutos; esse sinal não foi filtrado.

à radiação à superfície, pelo menos para certas formulações do modelo, com picos junto ao meio dia solar que chegam a significar cerca de metade da radiação incidente num dia de céu limpo para a época. Porém, é preciso ter em conta que, em todos os períodos de simulação seleccionados (4 dias por mês), os meteogramas por nós realizados para a nebulosidade medida na estação do IM de Évora (Centro Coordenador, situada 9 km a oeste da estação do CGE), designadamente, a fracção de céu coberto por nuvens médias ou baixas, exibiam condições de céu muito coberto intercaladas com perídos curtos de céu limpo. Grande parte dos erros de previsão da SWDOWN talvez se deva a uma má simulação da nebulosidade, ou da sua intermitência. Sem o cruzamento dos dados de nuvens com os desvios do cálculo da SWDOWN pelo modelo não se pode confirmar esta conjectura. A comparação entre as 24 curvas da mesma época mostra que todas as parametrizações influenciam o cálculo da radiação à superfície. Quanto aos esquemas radiativos, as curvas do RMSE indicam que nas primeiras horas de previsão o esquema Goddard dá erros um pouco inferiores, mas a situação inverte-se no sentido de uma ligeira vantagem do esquema de Dudhia. O cálculo do erro RMSE integral das curvas individuais, de modo a comparar quantitativamente os desempenhos individuais das configurações, será feito no §3.4.

Temperatura do ar a 2 metros (T2)

As Figuras A.7-A.9 mostram as curvas de erro da temperatura. Tanto o valor absoluto do *Bias*, como o *STDE* e o *RMSE*, tendem a ser superiores durante o dia. Esse aspecto reflecte a maior variabilidade das condições de temperatura durante o dia, tornando as previsões mais falíveis. A comparação das curvas do *Bias* de Janeiro-Março e Julho-Setembro com as curvas correspondentes para a radiação solar evidencia uma influência directa do erro de previsão da radiação (embora este se refira a um único local). Em Outubro-Dezembro essa comparação dificilmente pode ser feita, porque para cada hora de previsão da *SWDOWN* existem muito poucas observações (cf. Tabela 2.7); nalgumas horas chega a haver apenas uma data de registo (com o *Bias* e o *RMSE* a representarem o erro e o erro absoluto de uma única previsão), o que explica os zeros anómalos na curva *STDE* da Fig. A.8b inferior. Em todas as épocas o esquema radiativo Goddard tende a produzir um *Bias* mais positivo (menos negativo quando o mesmo é negativo) do que o de Dudhia; esse aspecto está em pleno acordo com a diferença entre os dois

esquemas já referida em relação ao *Bias* da *SWDOWN*. O efeito dos esquemas de microfísica pode ser apreciado em todos os trimestres, mas é no período Abril-Junho que se observa uma grande diferença quanto aos dois esquemas testados: o WSM6 apresenta um erro médio absoluto claramente inferior ao Kessler, este último produzindo um forte viés negativo que atinge -4 K; ainda nesse período, a interação entre os esquemas radiativos e de microfísica é notável comparando as curvas do *RMSE* relativas aos dois esquemas MP; quando combinado com o esquema MP de Kessler, o esquema SW Goddard é francamente melhor, mas essa diferença desaparece com o esquema MP WSM6, o qual de resto produz um erro mais pequeno. O *Bias* é geralmente inferior a 1 K, mas o *RMSE* anda em média próximo dos 2 K. A progressão do erro médio quadrático traduz-se num aumento da ordem de 0.5 K ao longo das 48 horas de previsão (sendo maior com o esquema de Kessler nos meses de Abril-Junho, o que se repercute no *RMSE* anual).

Razão de mistura a 2 metros (Q2)

Os erros da razão de mistura de vapor estão representados nas Figuras A.10-A.12. A variação estacional é flagrante, tanto no *Bias* como no *RMSE*, sobretudo na transição do 1º para o 2º trimestre, onde se passa dum regime de erro quase constante ao longo do tempo de previsão, pouco dependente da variação dos esquemas físicos, para um regime totalmente inverso. À excepção de Janeiro-Março, o *Bias* tende a crescer nas primeiras horas do dia e a diminuir ao cair da noite. Em Julho-Setembro existe uma separação sensível entre as curvas do *Bias* consoante estas se agrupem num ou no outro dos dois esquema SL/PBL, com o par Eta/Mellor-Yamada-Janjic a produzir um maior número de previsões acima do valor observado do que o MM5/YSU. Na época Outubro-Dezembro é nítida a separação das curvas com o esquema de parametrização de cúmulos Betts-Miller-Janjic de todas as outras, com *Bias* mais negativo nas primeiras. No entanto a dispersão dos erros entre estações e datas de simulação, representada no *STDE*, faz com que as diferenças assinaladas apareçam mitigadas no *RMSE*. O *RMSE* é mínimo em Janeiro-Março, cerca de 0.75 g/kg, e máximo no período oposto de Julho-Setembro, cerca do dobro.

Humidade relativa a 2 metros (*RH2*)

As curvas dos erros de previsão da humidade relativa, Figuras A.13-A15, aparentam vagas semelhanças com as curvas homólogas da razão de mistura, mas a sua forma final é fortemente condicionada pelos erros da temperatura. No *Bias* esse condicionamento traduz-se no aspecto invertido de umas em relação às outras (cf. A.7). O esquema SW Goddard tende a produzir previsões mais abaixo dos valores observados, precisamente o contrário do que se observou com a temperatura. A grande dispersão dos erros entre estações e períodos de simulação, com valores *STDE* acima de 10%, eleva o erro quadrático *RMSE* para valores dessa ordem. No período Janeiro-Março as diferenças entre configurações são mínimas; nos outros trimestres, a avaliação do desempenho em função dos esquemas SL/PBL não pode ser dissociada da combinação particular com os esquemas de parametrização de cúmulos e da microfísica.

Rumo do vento de superfície (*Wind10D*)

O rumo do vento é a variável que apresenta maior flutuação dos erros ao longo do tempo, como se vê pelas Figuras A.16-A.18. A amplitude dessas flutuações é máxima no período Abril-Junho, secundado pelo período seguinte Julho-Setembro. Um aspecto saliente é o *Bias* geralmente positivo, denotando que o vento previsto se desvia do vento observado no sentido horário. As curvas de *Bias* relativas às várias configurações são em geral confusas, interceptando-se em vários pontos, excepto nos meses de Outubro-Dezembro. Nestes, é perceptível uma divisão em dois grupos, em resultado da escolha dos esquemas associados SL/PBL, mostrando que a associação Eta/Mellor-Yamada-Janjic produz um *Bias* inferior. No desvio padrão do erro e no erro médio quadrático, *STDE* e *RMSE*, as diferenças entre as configurações são muito ligeiras. A curva anual do *RMSE* exibe uma subida clara do erro com o tempo de previsão, de 35 para 45 graus. Nos meses de Primavera e Verão, quando a dispersão espacio-temporal do erro é maior, o *RMSE* atinge um pico de cerca de 60 graus nas primeiras horas da noite, decaindo nas horas seguintes. Atendendo ao *STDE*, o erro raramente ultrapassa um quadrante.

Intensidade do vento de superfície (*Wind10S*)

As curvas de erro relativas à velocidade do vento são exibidas nas Figuras A.19-A.21. Num simples relance, em todos os trimestres, podemos observar uma divisão das curvas do *Bias* em dois grupos: as que representam as previsões com os esquemas associados MM5/YSU e as que representam as previsões com os alternativos Eta/Mellor-Yamada-Janjic. A diferença entre ambos é substancial, com vantagem para o MM5/YSU. O *Bias* é quase sempre positivo, indicando uma sobrestimação da velocidade do vento, com um erro médio que na formulação MM5/YSU raramente ultrapassa 1 m/s. Os picos são menos pronunciados para o esquema SW de Dudhia. O desvio padrão do erro, *STDE*, da ordem de 2 m/s, mostra apenas ligeiras diferenças entre as configurações físicas. O valor elevado do *STDE* explica que a diferença assinalada para os esquemas SL/PBL seja diminuta no erro médio quadrático daqueles casos em que a diferença no erro médio é mais pequena, designadamente, no período Abril-Setembro; nos meses de Outono e Inverno a diferença no *RMSE* é ainda pronunciada.

3.2 Dispersão do ensemble das formulações físicas do modelo

As Figuras B.1-3 (Apêndice B) mostram as curvas de valor médio do desvio padrão dos valores simulados pelas M = 24 realizações do modelo, *EnsSD* (Eq. 2.12), em função do tempo de previsão. Os membros do *ensemble* diferem apenas pela combinação das opções para os esquemas físicos listadas na Tabela 2.3. A grandeza *EnsSD*, abrangendo um conjunto de K = 9 datas de inicialização por trimestre, ou de 36 no ano, foi calculada a partir dos valores simulados nos $I \times J = 42 \times 81$ nós da malha *mass-staggered* do domínio aninhado, para os prazos de previsão, de 3 em 3 horas, até 45 horas à frente da hora de inicialização daquela malha, 1500UT, ou seja, dentro de um horizonte de previsão de 48 horas contado a partir da inicialização da malha larga (*parent domain*), 1200UT. As curvas representam a função spline cúbica interpoladora da função *EnsSD* em 16 pontos: *forecast time* = 3*h*, 6*h*, ..., 48*h*. As curvas relativas à pressão e à humidade relativa começam no segundo ponto (6 h), pela razão já explicada em §3.1. As designações das variáveis atmosféricas seguem a nomenclatura da Tabela 2.5. A fisionomia dos domínios *nest* e *parent* pode ser vista na Figura 2.1. As datas de

início das simulações encontram-se nas colunas da Tabela 2.1 e reportam-se a situações meteorológicas de tempo instável durante o ano de 2006. As curvas anuais resultam de $M \times K_{ano} = 864$ simulações, cada qual fornecendo $I \times J = 3402$ valores de previsão por variável e por prazo de previsão.

O aspecto comum a todas as variáveis e a todos os trimestres é o aumento gradual de EnsSD, largura característica da dispersão de ensemble, com o prazo de previsão: as diferentes realizações do modelo divergem progressivamente nos resultados por elas produzidos. As curvas não começam no valor zero porque as diferenças entre os membros resultantes da integração do domínio parent são transmitidas ao nest na inicialização mais tardia deste. As curvas relativas à SWDOWN (Fig. B.3) possuem a forma familiar das curvas da irradiância solar extraterrestre; o pico situa-se ligeiramente adiante das 1200UT, denunciando o atraso médio de cerca de 1/2 hora entre o meio dia solar na gama de longitudes do domínio nest e o meio dia solar no meridiano de origem. As condições radiativas no topo da atmosfera não condizem, no entanto, com as diferenças estacionais observadas entre os trimestres de Primavera e de Verão; de facto, as épocas Abril-Junho e Julho-Setembro encontram-se quase simetricamente colocados em torno do solstício de Verão, mas os valores de EnsSD de Abril-Junho excedem em cerca de 50% os de Julho-Setembro à hora em que o sol se encontra à sua altura máxima. Tal diferença poder-se-á explicar pela instabilidade climatérica dos meses de Primavera, com maior variabilidade da nebulosidade, o que se reflecte nos cálculos radiativos efectuados pelo modelo; uma vez fortemente condicionados pelas nuvens, os cálculos podem resultar em diferenças maiores entre configurações, quer por via dos próprios esquemas radiativos como por via da interação com os esquemas da microfísica e da parametrização de cúmulos. Nas curvas referentes à temperatura e, claramente por efeito desta, nas referentes à humidade relativa (cf. Fig.s B.1 e B.2), verificam-se máximos bem definidos por volta das 1500UT do 2º dia de integração (mais ou menos à hora da temperatura máxima do dia) nos trimestres centrados no solstício de Inverno. Ou seja, as formulações físicas do modelo respondem de maneira mais variada na previsão da temperatura máxima do dia do que da temperatura mínima, nos meses em que esta é controlada quase sómente pelas trocas radiativas e muito pouco pela convecção térmica; em contraste, no período Julho-Setembro as diferenças diurnas são moderadas e a dispersão máxima verifica-se ao fim da manhã. Os maiores valores

que se observam durante o dia em várias variáveis nos meses Abril-Junho podem ser uma repercussão da grande dispersão da radiação solar incidente calculada: em relação à temperatura, observa-se um máximo quase tão largo como o período de insolação; na pressão o aumento verifica-se desde a manhã, para decair lentamente desde o fim da tarde e durante toda a noite; na direcção do vento o máximo verifica-se ao cair da noite. Depois de subirem, as curvas já não recuperam a altura inicial, pelo que a dispersão tende a aumentar por detrás das variações diurnas de curto prazo. Em relação à velocidade do vento, as curvas são mais regulares e a única diferença estacional diz respeito a Julho-Setembro, com uma dispersão inferior à dos outros trimestres.

Tirando o caso especial da radiação solar, naquelas variáveis cujas curvas começam às 1500UT verifica-se um aumento do *EnsSD* nas primeiras 3 horas de integração do *nest*; se juntarmos o domínio *parent*, podemos imaginar que as curvas convergem na hora zero das simulações. Assim, parece ser nas primeiras 6 horas de integração da malha principal que se opera a diferenciação entre as várias formulações físicas do modelo, cada uma seguindo depois o seu caminho separado. O facto de não se verificarem diferenças substanciais no início indica que: o processo de *downscaling* (ajustamento dinâmico a partir do *input* vindo do modelo GFS de escala maior) levou cerca de 6 horas a efectuar-se; nesse processo, que termina na malha mais fina do *nest*, o *nesting* só se tornou eficiente 3 horas depois de começado.

3.3 Diferença entre as simulações desfasadas de 1 dia

A Figura C.1 (Apêndice C) mostra a diferença absoluta relativa média entre previsões para a mesma hora, mas separadas por 24 horas na data de inicialização (cf. Eq. 2.13). Conforme foi explicado no §2.6 (Eq. 2.14), para a direcção do vento usou-se como medida de comparação a diferença angular absoluta dividida por um ângulo raso. As curvas (spline linear) resultam da média das diferenças individuais em 2 pares de simulações por mês, relativas aos períodos de 48 horas da Tabela 2.1, calculadas nos $I \times J = 3402$ pontos da malha *mass-staggered* do domínio *nest* usando todas as 24 configurações físicas do WRF. Os valores em abcissa indicam o tempo decorrido desde a hora de início da corrida mais recente do WRF, isto é, da simulação iniciada mais tarde (as curvas relativas à pressão e à humidade relativa começam com 3 horas de atraso, pelo motivo explicado em §3.1).

O teste que se acabou de descrever é muito semelhante a testes de sensibilidade às condições iniciais conhecidos de estudos sobre o limite de previsibilidade de modelos globais (Chen, 1989). Tais testes demonstram que a separação média entre previsões (vg. da altura de geopotencial num certo nível isobárico) fornecidas por duas quaiquer simulações iniciadas em momentos diferentes, avaliada por exemplo pelo valor médio quadrático das diferenças obtidas com um certo número de pares de simulações, começa por aumentar com o prazo de previsão para atingir um limite de saturação ao fim de um número de dias dependente da distância temporal da inicialização. Quando a medida do desvio médio estabiliza no seu valor limite, significa que, a partir daí, as simulações distinguidas pelas condições iniciais deixam de estar correlacionadas, logo, as previsões a prazos mais longos deixam de ter valor determinístico. O limite de previsibilidade extrapolado para uma diferença infinitesimal dos valores iniciais fornece uma medida absoluta do limite de previsibilidade do modelo. A pertinência de usar diferentes momentos de inicialização é fácil de entender: as condições iniciais não podem ser modificadas arbitrariamente, dado deverem ser congruentes com as equações dinâmicas; duas grelhas de valores de análise em duas datas/horas diferentes satisfazem essa condição, a menos dos erros da própria análise.

O que se trata aqui não é rigorosamente um teste à variação das condições iniciais, uma vez que o domínio horizontal é limitado; como tal, as condições de fronteira lateral entram no problema. *Grosso modo*, quanto mais pequena a área do domínio, mais peso terão as condições de fronteira em comparação ao estado inical. O problema complicase ainda mais pelo facto de termos duas fronteiras laterais: a que delimita o domínio *parent*, com as condições definidas pelo GFS, e a que separa esse domínio do domínio aninhado. O *two-way nesting* é uma complicação adicional, porque o estado do *parent* é constantemente ajustado em função das previsões mais finas do *nest*. As condições de fonteira impostas pelo GFS à mesma data e hora não são as mesmas para os elementos de um par de simulações separadas de um dia na inicialização, seja, porque derivam de previsões do GFS igualmente desfasadas. Por essa razão, a degradação das previsões do modelo global que serve de *input* ao WRF afecta a degradação intrínseca das previsões realizadas pelo último. Supostamente, para previsões de curto prazo como

são normalmente as previsões de mesoescala, o efeito da degradação das previsões do modelo global não será muito importante, na medida em que as condições de fronteira lateral serão muito semelhantes; nesse caso, precisamente por causa da importância da fronteira, as duas previsões do modelo de área limitada podem não divergir muito entre si. Os estudos de sensibilidade às condições inicias com modelos globais mostram que a diferença entre duas previsões vizinhas cresce sempre com o tempo. No presente caso, a evolução não tem que ser monótona, como tentaremos explicar em seguida, apoiando a argumentação nos resultados obtidos.

Na primeira hora em que as duas simulações podem ser comparadas sobre os nós do domínio nest, a simulação iniciada em primeiro lugar traz 27 horas de integração do parent, 24 do nest, enquanto a segunda simulação tem apenas os valores iniciais do nest e 3 horas de integração do *parent*. Nas primeiras 3 horas de integração o número de previsões elementares levadas a cabo na malha mais larga é ainda modesto, sendo de esperar que os campos de valores sejam pouco diferentes dos valores de análise do GFS. Daí poder prever-se que no início da segunda simulação a diferença relativa à simulação começada na data anterior seja maior do que nas horas seguintes. De facto, é isso que se observa na Figura C.1 em todas as variáveis representadas menos a pressão e a direcção do vento; a curva da pressão não é conclusiva, porque só pode ser representada a partir das 6 horas. A diminuição inicial da diferença deveria, a partir de certa altura, dar lugar a um aumento; mesmo que os modelos WRF e GFS fossem perfeitos, a instabilidade linear e a não linearidade das equações dinâmicas acabariam por produzir resultados diferentes, ampliando a incerteza das condições iniciais, por mais próximas que fossem as simulações (cuja diferença inicial simula a incerteza). Aquilo que se pode observar nas curvas é um aumento muito gradual da diferença relativa para a direcção do vento e para a razão de mistura, um aumento mais pronunciado nas últimas horas para a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do vento, e nenhum aumento para a pressão à superfície. O intervalo de tempo em que a comparação é feita (21 horas) é talvez demasiadamente curto para se poder observar um aumento claro, ou mesmo qualquer aumento quanto à pressão. À luz do que ficou dito, a estabilidade das curvas na maior parte do intervalo não indica uma saturação, podendo ser interpretada como uma fase de transição entre a diminuição inicial das diferenças esperada e o aumento posterior. A diferença relativa média para a pressão e a temperatura cifra-se, nessa fase, em 0.1%; este valor representa cerca de 1 mb de diferença absoluta para a pressão e

cerca de 0.3 K para a temperatura; localmente e numa data particular a diferença poderá ser bastante maior. O decaimento inicial da diferença na maioria das curvas sugere que só ao cabo das primeiras 9 horas de integração da malha principal o WRF começou a resolver de forma consistente as perturbações atmosféricas na malha do *nest*.

3.4 Tabelas do desempenho relativo das formulações do modelo

A Tabela 3.2 mostra os índices trimestrais do desempenho relativo das 24 formulações do modelo, para as várias variáveis, quantificado da forma explicada no §2.4, em relação ao intervalo 6-48 h de integração do domínio *parent*, baseado nas curvas de erro *RMSE* referidas no §3.1. A primeira linha abaixo do nome das variáveis representa a média de *ensemble* do erro *RMSE* acumulado naquele intervalo e dividido pelo número de instantes de previsão (15), *Eens* (Eq. 2.10). Os números adimensionais dispostos em coluna dão o desempenho relativo individual, r_m (Eq. 2.11), definido como a razão entre o erro *RMSE* individual (*m*) médio no intervalo de tempo considerado e o valor de *Eens*. A ordenação das configurações segue o esquema da Tabela 3.1.

	N	IP	S	W	SL/	PBL		СР	
	Kessler	WSM6	Dudhia	Coddard	MM5/YSU	Eta / Mellor- Yamada- Janjic	Kain- Fritsh	Betts- Miller- Janjic	Grell- Devenyi
1	•		•		•		•		
2	•		•		•			•	
3	•		•		•				•
4	•		•			•	•		
5	•		•			•		•	
6	•		•			•			•
7	•			•	•		•		
8	•			•	•			•	
9	•	l I		•	•				•
10	•			•		•	•		
11	•			•		•		•	
12	•			•		•			•
13		•	•		•		•		
14		•	•		•			•	
15		•	•		•				•
16		•	•			•	•		
17		•	•			•		•	
18		•	•			•			•
19		•		•	•		•		
20		•		•	•			•	
21		•		•	•				•
22		•		•		•	•		
23		•		•		•		•	
24									

Tabela 3.1 As 24 configurações físicas indicadas na Tabela 3.2

Tabela 3.2 Índices r_m de desempenho relativo

Jan-Mar,	6-48h
oun nut,	0 1011

m	Q2	Т2	RH2	SWDOWN	Wind10D	Wind10S	PSFC
Eens:	0.6g/kg	1 . 6K	10.4%	$71W/m^2$	34.9°	2.8m/s	6.0mb
1	0.99	1.08	1.01	0.74	1.00	0.85	1.01
2	1.03	1.10	1.06	0.96	1.00	0.86	1.01
3	1.01	1.09	1.04	0.95	1.02	0.84	1.01
4	0.99	1.06	0.96	0.82	0.98	1.09	1.01
5	1.01	1.10	1.05	1.00	1.01	1.09	1.01
6	0.96	1.10	1.01	0.97	1.03	1.11	1.02
7	1.02	1.00	0.98	0.87	0.99	0.90	1.00
8	1.03	1.02	1.04	1.13	0.99	0.90	1.00
9	1.00	0.99	1.00	1.01	1.01	0.88	1.00
10	1.00	0.93	0.93	0.99	1.01	1.13	1.00
11	1.00	0.99	1.03	1.15	1.02	1.12	1.01
12	0.98	0.98	0.97	0.92	1.06	1.13	1.01
13	0.98	0.97	0.98	0.88	0.98	0.87	1.00
14	0.99	0.95	1.03	1.00	0.97	0.85	0.99
15	0.99	0.97	1.01	1.00	0.98	0.85	1.00
16	0.98	0.93	0.94	0.90	0.99	1.11	1.00
17	0.97	0.93	1.03	0.97	0.98	1.10	1.00
18	0.95	0.98	0.99	1.02	0.98	1.13	1.00
19	1.03	0.99	0.98	1.10	0.98	0.91	0.99
20	1.02	0.99	1.05	1.20	1.01	0.91	0.99
21	1.04	0.98	1.00	1.08	0.99	0.89	0.99
22	1.04	0.94	0.90	1.09	1.01	1.16	0.99
23	1.00	0.96	1.03	1.17	1.01	1.16	0.99
24	0.98	0.97	0.97	1.06	1.00	1.16	0.99

Abr-Jun, 6-48h

m	Q2	Т2	RH2	SWDOWN	Wind10D	Wind10S	PSFC
Eens:	1.2g/kg	2 . 5K	12.5%	150W/m ²	55.0°	2.1m/s	5.9mb
1	1.07	1.28	1.06	1.06	0.96	0.98	1.02
2	1.10	1.30	1.09	1.11	0.97	0.98	1.02
3	1.03	1.32	1.07	1.09	0.96	0.99	1.03
4	1.05	1.28	1.06	1.02	0.96	1.02	1.03
5	1.09	1.29	1.09	1.10	0.97	1.01	1.03
6	1.01	1.31	1.09	1.06	0.99	1.02	1.03
7	0.97	0.99	0.96	1.04	0.98	0.96	1.00
8	1.01	1.03	1.02	1.14	1.01	0.95	1.00
9	0.95	1.01	0.96	1.05	1.00	0.98	1.00
10	0.97	1.00	0.98	0.94	0.98	1.02	1.00
11	1.01	1.02	1.03	1.07	0.98	1.02	1.00
12	0.97	1.02	0.99	0.93	1.00	1.03	1.01
13	0.95	0.86	0.93	0.92	1.02	0.96	0.99
14	0.99	0.90	1.01	0.92	1.00	0.95	0.99
15	0.97	0.88	0.96	0.95	1.00	0.95	1.00
16	0.92	0.85	0.93	0.83	0.99	1.02	0.99
17	0.96	0.87	0.99	0.93	0.99	1.02	1.00
18	0.95	0.88	0.97	0.90	0.99	1.06	1.00
19	0.97	0.81	0.94	0.99	1.08	0.95	0.97
20 21 22 23 24	1.00 0.99 1.00 0.99 1.06	0.87 0.80 0.79 0.83 0.80	0.94 0.92 1.00 0.98	0.99 0.93 1.04	1.04 1.04 1.05 0.99	0.95 0.96 1.06 1.06 1.08	0.97 0.98 0.97 0.98

Tabela 3.2 – continuação

Jul-Set, 6-48h

m	Q2	Т2	RH2	SWDOWN	Wind10D	Wind10S	PSFC
Eens:	1.5g/kg	2.1K	11.5%	105₩/m ²	53.4°	2.1m/s	6.1mb
1	0.96	1.01	0.98	1.07	1.01	0.91	1.01
2	1.02	1.04	1.04	1.07	1.00	0.93	1.00
3	0.97	1.01	0.99	0.93	0.99	0.93	1.01
4	0.99	1.06	1.01	0.91	0.98	1.02	1.01
5	1.01	1.04	0.98	1.00	0.94	0.99	1.00
6	1.00	1.08	1.01	1.13	0.99	1.01	1.02
7	0.97	0.93	0.99	0.99	1.02	0.93	1.00
8	1.02	0.99	1.07	1.10	0.99	0.95	0.99
9	0.99	0.93	1.00	0.92	0.98	0.94	1.00
10	1.02	1.00	1.01	0.99	0.98	1.04	1.00
11	1.02	1.01	1.01	1.02	0.94	1.03	0.99
12	1.02	1.01	1.02	1.12	0.99	1.03	1.01
13	0.95	0.95	0.93	0.95	1.04	0.95	1.00
14	1.02	1.00	1.03	0.97	1.00	0.97	0.99
15	0.96	0.97	0.95	1.07	1.01	0.96	1.00
16	0.99	1.00	0.95	0.89	1.03	1.06	1.01
17	1.03	1.01	0.99	0.91	1.00	1.03	1.00
18	0.99	1.02	0.96	1.08	1.02	1.06	1.01
19	0.98	0.94	0.97	1.03	1.03	0.97	0.99
20	1.03	1.01	1.07	0.97	1.02	1.01	0.98
21	0.98	0.95	0.99	0.93	1.00	0.99	0.99
22	1.03	1.00	0.99	0.98	1.03	1.10	1.00
23	1.05	1.05	1.04	1.00	0.97	1.09	0.99
24	1.02	1.00	0.99	0.97	1.03	1.10	1.00

Out-Dez, 6-48h

m	Q2	Т2	RH2	SWDOWN	Wind10D	Wind10S	PSFC
Eens:	0.8g/kg	1.7K	10.1%	$64W/m^2$	41.1°	2.5m/s	5.8mb
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	1.00 1.07 0.99 0.97 1.01 0.96 0.97 1.05 0.98 0.93 0.96	0.97 0.98 1.00 1.02 1.01 1.10 0.95 0.99 1.01 0.95 0.96 1.05	0.94 1.06 0.96 0.87 0.98 0.99 0.98 1.13 1.00 0.89 1.01	1.12 1.03 1.13 1.12 1.04 1.17 0.98 1.38 1.09 1.15 1.21	0.98 1.01 1.00 0.92 0.96 1.00 1.05 1.03 0.94 0.98	0.84 0.87 1.08 1.05 1.14 0.87 0.86 0.89 1.11 1.09	1.00 1.01 1.00 1.01 1.02 1.01 1.00 1.00
12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24	0.93 1.02 1.07 1.02 0.97 1.00 0.97 1.03 1.09 1.02 0.98 1.01 0.98	1.05 0.93 0.96 0.97 0.92 0.95 1.03 1.01 1.06 1.05 0.99 1.04 1.08	1.01 0.95 1.09 0.96 0.88 1.02 0.97 1.03 1.19 1.04 0.93 1.11	0.94 0.77 0.84 0.62 0.87 0.76 0.56 0.97 1.15 1.07 1.10 0.99 0.93	0.98 1.01 1.06 1.01 0.94 0.99 0.97 1.06 1.10 1.06 0.99 1.03 0.99	1.17 0.86 0.87 1.11 1.10 1.15 0.91 0.90 0.91 1.17 1.16 1.20	1.00 0.99 1.00 0.99 1.00 1.01 1.00 0.99 1.00 0.99 1.00 1.00

_

NB: os índices r_m da variável *SWDOWN* não têm o significado estatístico das restantes variáveis, visto que se reportam a um número reduzido de previsões-observações (somatório dos valores da última coluna da Tabela 2.7), sobretudo nos meses de Outubro-Dezembro; o erro integral de *ensemble* da *SWDOWN* inclui o período nocturno (onde o *Eens* é praticamente zero), devendo o erro durante o dia ser cerca do dobro (depende do trimestre); obviamente, a noite tem uma contribuição nula na área abaixo das curvas de erro, não fazendo qualquer diferença no cáculo dos índices relativos r_m .

Os casos que obtêm um erro médio (6-48 h) pelo menos 5% abaixo do erro médio de ensemble ($r_m \le 0.95$) aparecem destacados a vermelho; os números vermelhos a cheio revelam os casos cujo erro é pelo menos 15% inferior à média de *ensemble* ($r_m \le 0.85$). Note-se que apenas se assinalou aqueles casos em que o afastamento individual em relação à média se dá no sentido de menor erro, salientando o melhor desempenho no período de previsão. Para a SWDOWN, em vez do vermelho usa-se a cor de laranja na coluna de Outubro-Dezembro, pela razão indicada acima. A pressão é a variável que apresenta diferenças menores nos desempenhos individuais das configurações, mostrando ser muito menos sensível aos processos de sub-grelha. As variáveis que apresentam desempenhos mais diferenciados são a temperatura, a radiação solar e a velocidade do vento. Os resultados (cf. Tabelas 3.1 e 3.2) apontam para a importância determinante dos esquemas associados SL/PBL na previsão da velocidade do vento de superficie durante os meses de Outono e Inverno, com clara vantagem para o par MM5/YSU sobre o concorrente Eta/M-Y-J. Presumivelmente, o primeiro calculou melhor o atrito junto ao solo. Em relação à temperatura, é nítido que o esquema de microfísica WSM6 (últimas 12 configurações da tabela) se comporta melhor do que o esquema alternativo de Kessler no período Abril-Junho e, de forma menos acentuada, em Janeiro-Março. Este efeito não é surpreendente, atendendo a que a microfísica envolve o intercâmbio de troca de calor latente entre o ar e a água nele contida.

A fim de avaliar o efeito, nas previsões da irradiância solar à superfície, da conjugação dos dois esquemas radiativos com os três esquemas de parametrização dos movimentos associados à formação de cúmulos, somaram-se, para cada trimestre à excepção do último do ano (mal representado), os índices que partilham entre si cada uma das seis combinações de ambos os esquemas, e efectuou-se a média. A tabela seguinte mostra o

resultado, juntamente com as médias globais (\overline{r}) obtidas por cada esquema em separado.

SWDOWN 6-48h

Jan-Mar:			
	Dudhia	Goddard	\overline{r}
K-F	0.84	1.01	0.92
B-M-J	0.98	1.16	1.07
G-D	0.99	1.02	1.00
\overline{r}	0.93	1.06	
(1 · T			
Abri-Jun:			
	Dudhia	Goddard	\overline{r}
K-F	0.96	0.98	0.97
B-M-J	1.02	1.07	1.04
G-D	1.00	0.99	0.99
\overline{r}	0.99	1.01	
Jul-Set:			
	Dudhia	Goddard	\overline{r}
K-F	0.95	1.00	0.98
B-M-J	0.98	1.02	1.01
G-D	1.05	0.99	1.02
\overline{r}	1.00	1.00	

Tabela 3.3

Para os três primeiros trimestres, nota-se uma vantagem modesta do esquema de Kain-Fritsh relativamente aos outros dois esquemas convectivos. O esquema radiativo de Dudhia supera o Goddard de forma clara no período Janeiro-Março. A combinação Kain-Fritsh + Dudhia obtém a melhor prestação nos 3 trimestres. Seria necessário levar a cabo comparações em outros locais (a estação à qual se referem as observações situase próximo de Évora), em mais datas e a intervalos de tempo menores, para aferir a generalidade destas conclusões, atendendo ao carácter irregular da ocorrência de nuvens convectivas. Atendendo a que a formação de nuvens é determinada em grande parte pelo esquema de microfísica, fez-se uma operação idêntica à descrita acima, mas agora relacionando os esquemas de microfísica com os radiativos e fixando o esquema de parametrização de cúmulos na opção Kain-Fritsh (Tabela 3.4). Com a restrição Kain-Fritsh: o esquema Dudhia parece sempre preferível ao Goddard, quando combinado com o esquema de microfísica WSM6; o esquema Goddard combina em regra melhor com o esquema Kessler, mas com pior desempenho do que a combinação anterior.

Jan-Mar:			
	Dudhia	Goddard	\overline{r}
Kessler	0.78	0.93	0.86
WSM6	0.89	1.10	0.99
\overline{r}	0.84	1.02	
Abr-Jun:			
	Dudhia	Goddard	\overline{r}
Kessler	1.04	0.99	1.02
WSM6	0.88	0.96	0.92
\overline{r}	0.96	0.98	
Jul-Set:			
	Dudhia	Goddard	\overline{r}
Kessler	0.99	0.99	0.99
WSM6	0.92	1.05	0.99
\overline{r}	0.96	1.02	

SWDOWN [Kain-Fritsh] 6-48h

1 abela 3.4	Ta	bela	3.4
-------------	----	------	-----

Voltando à Tabela 3.2 e olhando em particular para o trimestre Outubro-Dezembro, o melhor desempenho da combinação WSM6 + Dudhia, representado nos índices 13 a 18, impressiona, especialmente na combinação com o esquema de cúmulos Grell-Devenyi. Atendendo à má representação estatística (vd, Tabela 2.6), apenas uma estação e, para algumas horas, apenas uma data (caso em que o *RMSE* é igual ao erro absoluto de uma só previsão), o exemplo é demonstrativo de como o desempenho de uma determinada combinação de esquemas físicos pode depender da situação meteorológica particular. De qualquer modo, a mesma combinação em Janeiro-Março, período representado por 9 simulações, produz um efeito análogo, embora menos pronunciado. Esta coincidência nos meses de Outono e Inverno sugere que o efeito das nuvens sobre os cálculos das trocas radiativas na gama visível possa ser mais bem representado pela associação WSM6 + Dudhia.

A Tabela 3.5 mostra o efeito conjugado dos esquemas da microfísica e da radiação sobre o desempenho na previsão da temperatura, dando o mesmo peso aos esquemas utilizados nos restantes processos. A escolha entre os dois esquemas radiativos afigurase, por si só, quase irrelevante, com uma ligeira vantagem para o Goddard; mas, pondo em jogo a microfísica, a combinação Dudhia + WSM6 obtém nitidamente a melhor prestação ao longo do ano, denotando a interação entre os processos da microfísica e as trocas radiativas. Nas épocas Janeiro-Março e, principalmente, Abril-Junho é clara a vantagem do WSM6, o que aliás era visível na Tabela 3.2; nos meses Julho-Setembro e Outubro-Dezembro essa vantagem só se manifesta em associação com o esquema de Dudhia.

T2 6–48h

Jan-Mar:			
	Dudhia	Goddard	\overline{r}
Kessler	1.09	0.99	1.04
WSM6	0.95	0.97	0.96
\overline{r}	1.02	0.98	
Abr-Jun:			
	Dudhia	Goddard	\overline{r}
Kessler	1.30	1.01	1.15
WSM6	0.87	0.83	0.85
\overline{r}	1.09	1.01	
Jul-Set:			
	Dudhia	Goddard	\overline{r}
Kessler	1.04	0.98	1.01
WSM6	0.99	0.99	0.99
\overline{r}	1.02	0.97	
Out-Dez:			
	Dudhia	Goddard	\overline{r}
Kessler	1.01	0.99	1.00
WSM6	0.96	1.04	1.00
\overline{r}	0.99	1.01	

Т	ab	ela	3	.5
---	----	-----	---	----

A Tabela 3.6 pretende mostrar o efeito dos esquemas da camada de superfície e da camada limite planetária MM5/YSU ou Eta/M-Y-J, combinado com os esquemas de microfísica e de radiação, sobre o desempenho na previsão da velocidade do vento, dando o mesmo peso aos 3 esquemas CP. O esquema MM5/YSU apresenta um padrão de desempenho superior – sobretudo nos períodos de Outono e de Inverno, com índices cerca de 25 % abaixo do Eta/M-Y-J. A diferença pouco se altera com a variação dos esquemas radiativos, mas a combinação MM5/YSU + Dudhia tende a ser favorável. A influência dos esquemas de microfísica é praticamente nula, especialmente com a combinação anterior.

Jan-Mar

MM5/YSU				Eta	/Mellor-Y	amada-Jai	njic
Dudhia		God	dard	Duc	lhia	God	dard
Kessler	WSM6	Kessler	WSM6	Kessler	WSM6	Kessler	WSM6
0.85	0.86	0.89	0.90	1.10	1.11	1.13	1.16
0.3	0.85 0.90		90	1.10 1.14			14
	0.88				1.12		

Abr-Jun

MM5/YSU				Eta/Mellor-Yamada-Janjic			
Duc	lhia	God	Goddard Dudhia		lhia	Goddard	
Kessler 0.98	WSM6 0.96	Kessler 0.96	WSM6 0.95	Kessler 1.01	WSM6 1.03	Kessler 1.02	WSM6 1.07
0.97 0.96			1.02		1.04		
0.96			1.03				

Jul-Set

	MM5/YSU			Eta/Mellor-Yamada-Janjic				
Duc	Dudhia		Goddard		Dudhia		Goddard	
Kessler 0.92	WSM6 0.96	Kessler 0.94	WSM6 0.99	Kessler 1.01	WSM6 1.05	Kessler 1.03	WSM6 1.10	
0.	0.94 0.96		96	1.03		1.07		
	0.95				1.05			

Out-Dez

MM5/YSU				Eta/Mellor-Yamada-Janjic			
Dudhia		Goddard		Dudhia		Goddard	
Kessler 0.85	WSM6 0.86	Kessler 0.87	WSM6 0.91	Kessler 1.09	WSM6 1.12	Kessler 1.12	WSM6 1.18
0.85		0.3	89	1.11		1.15	
0.87				1.13			

Tabela 3.6

3.5 Conclusões

Os testes realizados com o modelo WRF-ARW demonstraram a sensisibilidade das previsões dos parâmetros atmosféricos de superfície aos esquemas de parametrização dos processos físicos. Em particular, a variação dos esquemas das camadas de superfície (camada de atrito) e da camada limite planetária (SL/PBL) provou ter uma influência significativa na previsão da velocidade do vento junto ao solo, bastante mais marcada no semestre Outubro-Marco. A diferença de desempenho entre os esquemas radiativos Dudhia e Goddard em conjugação com os esquemas de microfísica Kessler e WSM6 na determinação da temperatura do ar foi também demonstrada; no período Abril-Junho a variação na microfísica revelou-se muito mais importante do que a variação no esquema radiativo. A comparação dos resultados do modelo com as observações da irradiância solar à superfície, embora restringida a uma único local de observação, deu evidências da importância dos esquemas radiativos em interação com os esquemas de microfísica e os de parametrização de cúmulos. A pressão atmosférica à superfície apresenta um viés positivo semelhante em todas as configurações testadas. A direcção do vento apresenta um viés quase sempre anticiclónico. Apesar de em todas as outras variáveis analisadas, com a excepção da pressão à superfície, o erro médio relativo às observações (Bias) apresentar variações nítidas com a modificação dos esquemas físicos, a dispersão do erro entre locais e entre datas de verificação (STDE) reduz as diferenças entre os erros quadráticos médios (RMSE). Assim, em relação ao rumo do vento, à razão de mistura e à humidade relativa, as diferenças observadas entre as combinações das opções para os esquemas físicos não se traduzem, em termos médios para o intervalo de tempo de simulação considerado, em diferenças de erro de previsão (RMSE médio no intervalo de integração) significativas.

Testes variados quanto às opções dinâmicas e quanto à definição dos domínios e das respectivas malhas, realizados em condições sinópticas estudadas, talvez permitissem descobrir a causa do viés sistemático positivo observado tanto nas previsões da pressão atmosférica como na direcção do vento.

O cálculo da dispersão entre os resultados das 24 configurações físicas, graficamente representada nas curvas do Apêndice B, ilustra bem o processo de diferenciação das

várias realizações do modelo, bem diferente consoante a época do ano e geralmente maior no trimestre Abril-Junho. Existem diferenças consideráveis consoante a variável analisada; por exemplo, a dispersão característica das previsões da direção do vento e da razão de mistura sofre variações estacionais mais acentuadas.

A comparação entre simulações desfasadas de um dia na inicialização, figurada no Apêndice C, mostra que a concordância entre as duas simulações se verifica, em média anual estendida ao domínio nest, umas 9 horas depois da hora de análise; por outro lado, o limite de previsibilidade parece ficar muito adiante de 24 horas. Esta conclusão não contempla as possíveis imperfeições do modelo, isto é, não quer dizer que as previsões sejam boas; a perfeição dum modelo de área limitada está interligada com a definição das condições iniciais e de fronteira, feita a partir de um modelo de área muito maior, geralmente global, como o GFS; o problema está na décalage entre a resolução espacial e temporal possível dos dados de input e a resolução de output pretendida. Será uma definição lata das condições iniciais e de fonteira suficiente para a inicialização e a integração correctas das equações dinâmicas em escala inferior, que assegure previsões de mesoescala probabilísticamente aceitáveis? A validação no caso particular relatado neste trabalho não permite responder em concreto à pergunta, mesmo que os erros RMSE apreciados levem a crer que talvez sim. Seria necessário comparar as previsões do WRF com os sucessivos valores de análise e de previsão do GFS, para saber se o WRF realizou de facto o refinamento da solução numérica do tempo no sentido de uma aproximação estatística às observação no terreno melhor do que aquela que se tinha à partida.

A representação dos erros médios de previsão em função do tempo a partir da mesma hora de análise num domínio geograficamente limitado, portanto em função da hora do dia, patente nas curvas do Apêndice A, tornou salientes as variações diurnas do erro. Os erros mais elevados, ou mais variáveis, durante o dia são um sinal da maior agitação da atmosfera junto ao solo durante as horas de influxo solar, com previsões naturalmente menos acertadas. Uma verificação do desempenho que tivesse em conta a variabilidade do elemento em estudo deveria utilizar uma medida de erro médio normalizada pela dispersão dos valores em comparação, por exemplo, dividindo o quadrado do *RMSE* pela variância dos valores observados (Murphy *et al.*, 1989).

Considerações finais

Ao reunir comparações de locais diversos (estações meteorológicas) pretendeu-se dar uma representação razoável, dentro do possível, do território alvo. Porém o clima do nosso país tem variações importantes de Norte a Sul e do litoral para o interior, que se perdem na amálgama estatística dos locais de verificação. Um estudo geográficamente detalhado seria potencialmente mais informativo. Do mesmo modo, conviria estudar situações meteorológicas tipificadas. Tornar-se-ia útil estender o mesmo tipo de testes regionais a outras variáveis como a precipitação e a nebulosidade, de mais difícil previsão. Não havendo dois anos iguais, qualquer estudo do género que pretendesse ter uma aplicação segura na previsão operacional do tempo teria naturalmente de incluir simulações retrospectivas de outros anos.

Finalmente, a realização de testes de sensibilidade com maior número de combinações das opções disponíveis no WRF, seja dos esquemas físicos ou outras, além de levantar dificuldades na exposição dos resultados, torna-se computacionalmente irrealizável a partir dum certo número de possibilidades muito inferior ao permitido. Nessa medida, os testes de sensibilidade requerem uma abordagem diversa, contornando o número de corridas necessárias para percorrer exaustivamente o espaço das realizações possíveis, ou desejáveis, do modelo. Trata-se de um problema de optimização global num espaço discreto, conhecido de outras áreas da ciência, acessível e com potencialidades práticas na afinação dum modelo atmosférico com as características do WRF (Lee *et al.*, 2006); a questão reside na escolha dum algoritmo apropriado de procura da melhor formulação do modelo, no sentido do seu melhor desempenho num contexto particular.

Apêndice A Curvas de erro



Fig. A.1a



Fig. A.1b



Fig. A.2a



Fig. A.2b



Fig. A.3a



Fig. A.3b



Fig. A.3c



Fig. A.4a



Fig. A.4b



Fig. A.5a


Fig. A.5b



Fig. A.6a



Fig. A.6b



Fig. A.6c



Fig. A.7a



Fig. A.7b



Fig. A.8a



Fig. A.8b



Fig. A.9a



Fig. A.9b



Fig. A.9c



Fig. A.10a



Fig. A.10b



Fig. A.11a



Fig. A.11b



Fig. A.12a



Fig. A.12b



Fig. A.12c



Fig. A.13a



Fig. A.13b



Fig. A.14a



Fig. A.14b



Fig. A.15a



Fig. A.15b



Fig. A.15c



Fig. A.16a



Fig. A.16b



Fig. A.17a



Fig. A.17b



Fig. A.18a



Fig. A.18b



Fig. A.18c



Fig. A.19a



Fig. A.19b



Fig. A.20a



Fig. A.20b


Fig. A.21a



Fig. A.21b



Fig. A.21c

Apêndice B Dispersão de *ensemble*















Fig. B-3

Apêndice C Simulações desfasadas





(b)



(c)

Fig. C-1

Apêndice D

Namelists

=== Namelist exemplo de pré-processamento do modelo (ficheiro 'namelist.wps') ===

&share = 'ARW', wrf_core max_dom
start_date
end_date
interrel = 2, = '2006-03-24_12:00:00', '2006-03-24_15:00:00', = '2006-03-26_12:00:00', '2006-03-24_15:00:00', interval_seconds = 10800, io_form_geogrid = 2, opt_output_from_geogrid_path = './', debug_level = 100, / &geogrid = 1, 1, parent_id = 1, parent_grid_ratio З, i_parent_start = 1, 15, 6, 43, 82, '2m', j_parent_start = 1, e_we = 57, e sn = 47, _ geog_data_res = '10m', = 24000, dx dy = 24000, map_proj ref_lat ref_lon = 'lambert', = 40.5, = -6.0, = 38.0, truelat1 stand_lon = 42.0, = -8.0, scang_ion geog_data_path geog_data_path = './geog', opt_geogrid_tbl_path = './geogrid/', / &ungrib out_format = 'WPS' prefix = 'FILE' / &metgrid fg_name = './FILE'
io_form_metgrid = 2, fg_name opt_output_from_metgrid_path = './', opt_metgrid_tbl_path = './metgrid/', /

==== *Namelist* exemplo de *input* do modelo (ficheiro 'namelist.input') ====

&time control = 2, run_days = 0, run_hours = 0, run minutes run seconds = 0, start year = 2006, 2006, = 03, 03, start month start_day = 24, 24, start_hour = 12, 15, = 00, start_minute 00, start_second = 00,00, end year = 2006, 2006, end_month = 03, 03, end_day end_hour = 26, 26, = 12, = 00, end minute 00, end second = 00, 00, interval_seconds = 10800 input_from_file = .true.,.true., input_trom_tream
fine_input_stream = 2, = 360, 180, history_interval frames_per_outfile = 1, 1, restart = .false., = 0, restart_interval io_form_history = 2 = 2 io_form_restart io_form_input = 2 io form boundary = 2 = 50 debug_level auxinput1_inname = "met_em.d<domain>.<date>" / &domains time step = 144, = 0, time_step_fract_num time_step_fract_den = 1, = 2, max dom = 1, s_we 1, e we = 57, 43, = 1, s_sn 1, e_sn = 47, 82, s_vert = 1, = 27, 27, e_vert num metgrid_levels = 27 dx = 24000, 8000, = 24000, 8000, dy = 1, grid id = 0, parent_id 1, = 0, 15, i parent start j parent start _____start
parent_grid_ratio
parent_+' = 0, 6, = 1, З, parent_time_step_ratio = 1, 3, = 1, feedback = 2 smooth_option p_top_requested = 5000 lowest_lev_from_sfc = .false. zap_close_levels = 500 interp type = 1 = 2 lagrange_order force_sfc_in_vinterp = 1 sfcp to sfcp = .false. = .false. adjust_heights

1,

2,

```
eta levels
                                         = 1.000, 0.993, 0.980, 0.966, 0.950,
                                            0.933, 0.913, 0.892, 0.869, 0.844,
                                           0.816, 0.786, 0.753, 0.718, 0.680,
0.639, 0.596, 0.550, 0.501, 0.451,
0.398, 0.345, 0.290, 0.236, 0.188,
                                            0.145, 0.000
/
&fdda
/
&dynamics
                                         = 2,
dyn_opt
                                         = 3,
rk ord
                                         = 1,
diff opt
                                         = 4,
km opt
khdif
                                         = 0,
                                                    Ο,
kvdif
                                         = 0,
                                                    Ο,
diff_6th_opt
diff_6th_factor
base_temp
                                         = 0,
                                         = 0.12,
                                         = 290.
                                         = 100000.
base_pres
base lapse
                                         = 50.
damp_opt
                                         = 1,
zdamp
                                         = 5000., 5000.,
dampcoef
                                         = 0.05,
                                                    0.05,
                                         = 0,
w_damping
non_hydrostatic
                                         = .true., .true.,
                                         = 5, 5,
h_mom_adv_order
                                         = 3,
                                                   З,
v_mom_adv_order
h_sca_adv_order
v_sca_adv_order
                                         = 5,
                                                    5,
                                         = 3,
                                                   З,
time_step_sound
                                         = 0
pd moist
                                         = .false., .false.,
                                         = .false., .false.,
pd_scalar
&bdy_control
spec_bdy_width
                                         = 5,
spec_zone
                                         = 1,
                                         = 4,
relax_zone
specified
                                         = .true., .false.,
                                         = .false., .true.,
nested
1
&grib2
/
&namelist quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio groups = 1,
/
&physics
mp_physics
                        = 6,
                                  6,
ra lw physics
                        = 1,
                                  1,
ra_sw_physics
                                  2,
                        = 2,
                        = 24,
                                  8,
radt
                        = 2,
sf_sfclay_physics
                                  2,
                        = 2,
sf_surface_physics
                                  2,
bl_pbl_physics
                        = 2,
                                  2,
                        = 0,
bldt
                                  Ο,
cu physics
                        = 3,
                        = 12,
cudt
                                  4,
isfflx
                        = 1,
ifsnow
                        = 0,
                        = 1,
icloud
```

num_soil_layers

= 4,

surface_input_source	=	1,
ucmcall	=	Ο,
mp_zero_out	=	Ο,
maxiens	=	1,
maxens	=	З,
maxens2	=	З,
maxens3	=	16,
ensdim	=	144,
sst_update	=	0
/		

Referências

Bohren, C. F., Albrecht, B. A., 1998: Atmospheric thermodynamics. Oxford University Press.

Chen, W. Y., 1989: Estimate of dynamical predictability from NMC DERF experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1227-1236.

Dudhia, J, 2005: The Weather Research and Forecast model version 2.0: Physics update. *WRF/MM5 User's Workshop - Jun 2005*; [Disponível em <u>http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/</u>]

Dudhia, J., 2007: The Weather Research and Forecasting Model: 2007 annual update [Disponível em http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/]

Dudhia, J, Bresch, J. F., 2002: A global version of the PSU-NCAR Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2989-3007.

Gilliland, E. K., Rowe, C.: A comparison of cumulus parameterization schemes in the WRF model; [http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/120591.pdf]

Hutchinson, T. A., Sousounis, P., Marshall, S., 2005: WRF enhancements for operational simulations. *WRF/MM5 User's Workshop - June 2005*.

Knievel, J., 2003: Summary Report, 2nd NCAR/CAMS Joint Workshop on NWP Model Development, 1-3 Apr. 2003, Beijing, China.

Kuo, Y.-H.: Mesoscale Numerical Weather Prediction; [http://www.ias.sdsmt.edu/Orville%20Symposium/Abstracts/Kuo_New.pdf]

Lee, Y. H., Park, S. K., Chang, D.-E., 2006: Parameter estimation using the genetic algorithm and its impact on quantitative precipitation forecast. *Ann. Geophys.*, **24**, 3185-3189.

Murphy. A. H., Brown. B. G., Chen, Y-S., 1989: Diagnostic verification of temperature forecasts. *Wea. Forecasting*, **4**, 485-501.

NCAR/TN-468+STR, 2005: *A description of the Advanced Research WRF Version 2.* Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research , Boulder, Colorado, U.S.A., Jun. 2006; [Disponível em <u>http://www.mmm.ucar.edu./wrf/users/</u>]

Pielke, Sr., R. A., 2002: Mesoscale meteorological modeling. Academic Press.

Skamarock, W., 2005: Why is there more than one dynamical core in WRF? A technical perspective; [http://www.mmm.ucar.edu/people/skamarock/one_core_2005.pdf]

Smirnova. T, Brown J., Benjamin, S., 2005: Evaluation of the RUC-initialized WRF for its application in the Rapid Refresh at NCEP. *WRF/MM5 User's Workshop - June 2005*; [Disponível em <u>http://www.mmm.ucar.edu/mm5/workshop/workshop-papers_ws05.html</u>]

WRF (ARW) Version 2 Modeling System User's Guide. Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research , Boulder, Colorado, U.S.A., Jan. 2007; [Disponível em <u>http://www.mmm.ucar.edu./wrf/users/</u>]