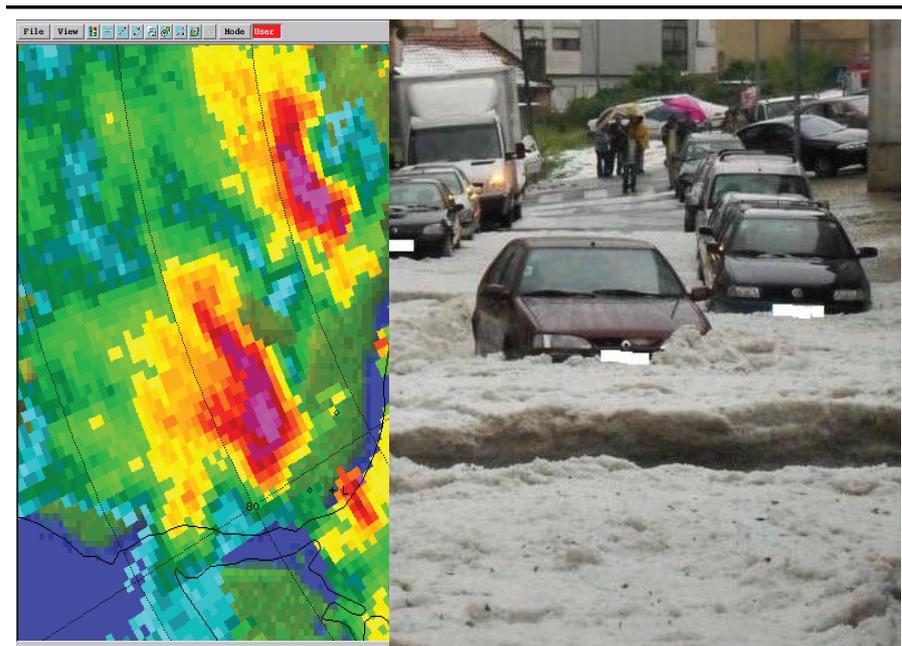




## Relatório

### Tempestade de granizo na Grande Lisboa

29 de Abril de 2011



Paulo Pinto, DORE, DMC  
Instituto de Meteorologia, I. P.



### Agradecimentos

É devida uma nota de agradecimento a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração do presente estudo, que se apresenta sob a forma de relatório.

Agradeço, em particular, aos colegas João Rio e Nuno Lopes (CPPN): agradeço, igualmente, aos colegas Ângela Lourenço e Nuno Moreira (DVIP) e aos colegas Marta Janeira e Jorge Neto (DOMC).



### ÍNDICE

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 0.  | Lista de acrónimos e abreviaturas.....   | 4  |
| 1.  | Introdução.....  | 5  |
| 2.  | Observações e campos numéricos em níveis baixos (superfície – 925 hPa).....    | 7  |
| 2.1 | Observações de superfície.....   | 7  |
| 2.2 | Diagnóstico com recurso ao modelo AROME.....                                   | 11 |
| 3.  | Observações e campos numéricos em níveis médios e altos.....                   | 16 |
| 3.1 | Diagnóstico com recurso ao modelo AROME.....                                   | 16 |
| 3.2 | Observação aerológica de Lisboa (12 UTC).....                                  | 20 |
| 4.  | Observações de radar, satélite e descargas eléctricas.....                     | 23 |
| 4.1 | Modo de organização convectiva observado no campo da reflectividade radar.     | 23 |
| 4.2 | Características cinemáticas inferidas a partir do campo da velocidade Doppler. | 32 |
| 4.3 | Observações de satélite.....   | 36 |
| 4.4 | Observações de descargas eléctricas .....                                      | 36 |
| 5.  | Queda de granizo.....  | 37 |
| 6.  | Modelos conceptuais propostos.....   | 40 |
| 7.  | Conclusões.....  | 44 |
| 8.  | Bibliografia e Referências.....  | 46 |



## 0. Lista de acrónimos e abreviaturas

|              |   |
|--------------|---|
| <b>AROME</b> | <i>Application of Research to Operations at Mesoscale</i> |
| <b>ASSI</b>  | <i>Automatic Satellite Image Interpretation</i>           |
| <b>APE</b>   | Convective Available Potential Energy                     |
| <b>CIN</b>   | <i>Convection Inhibition</i>                              |
| <b>CRR</b>   | <i>Convective Rainfall Rate</i>                           |
| <b>DEA</b>   | Descargas eléctricas atmosféricas                         |
| <b>E</b>     | Este  |
| <b>ECMWF</b> | <i>European Center for Medium Range Weather Forecasts</i> |
| <b>IM</b>    | Instituto de Meteorologia, I P                            |
| <b>IR</b>    | <i>InfraRed</i>   |
| <b>LI</b>    | <i>Lifted Index</i>                                       |
| <b>MAXZ</b>  | Projeção horizontal de valores máximos de reflectividade  |
| <b>MCS</b>   | <i>Mesoscale Convective System</i>                        |
| <b>MSG</b>   | <i>Meteosat Second Generation</i>                         |
| <b>N</b>     | Norte   |
| <b>NE</b>    | Nordeste  |
| <b>NO</b>    | Noroeste  |
| <b>O</b>     | Oeste   |
| <b>PCZ</b>   | Pseudo Cappi de reflectividade                            |
| <b>PPV</b>   | Indicador de Posição Plana de Velocidade                  |
| <b>PPZ</b>   | Indicador de Posição Plana de Reflectividade              |
| <b>S</b>     | Sul   |
| <b>SAF</b>   | <i>Sattelite Application Facility</i>                     |
| <b>SE</b>    | Sueste  |
| <b>SO</b>    | Sudoeste  |
| <b>TOPS</b>  | Altitude do topo dos ecos                                 |
| <b>VCUTZ</b> | Corte vertical sobre o campo da reflectividade            |
| <b>WV</b>    | <i>Water Vapor</i>  |





Com recurso a observações de superfície, aerológicas, detecção remota (essencialmente de radar) e a campos numéricos obtidos pela corrida do modelo de mesoescala AROME, foi efectuado o diagnóstico da situação verificada.

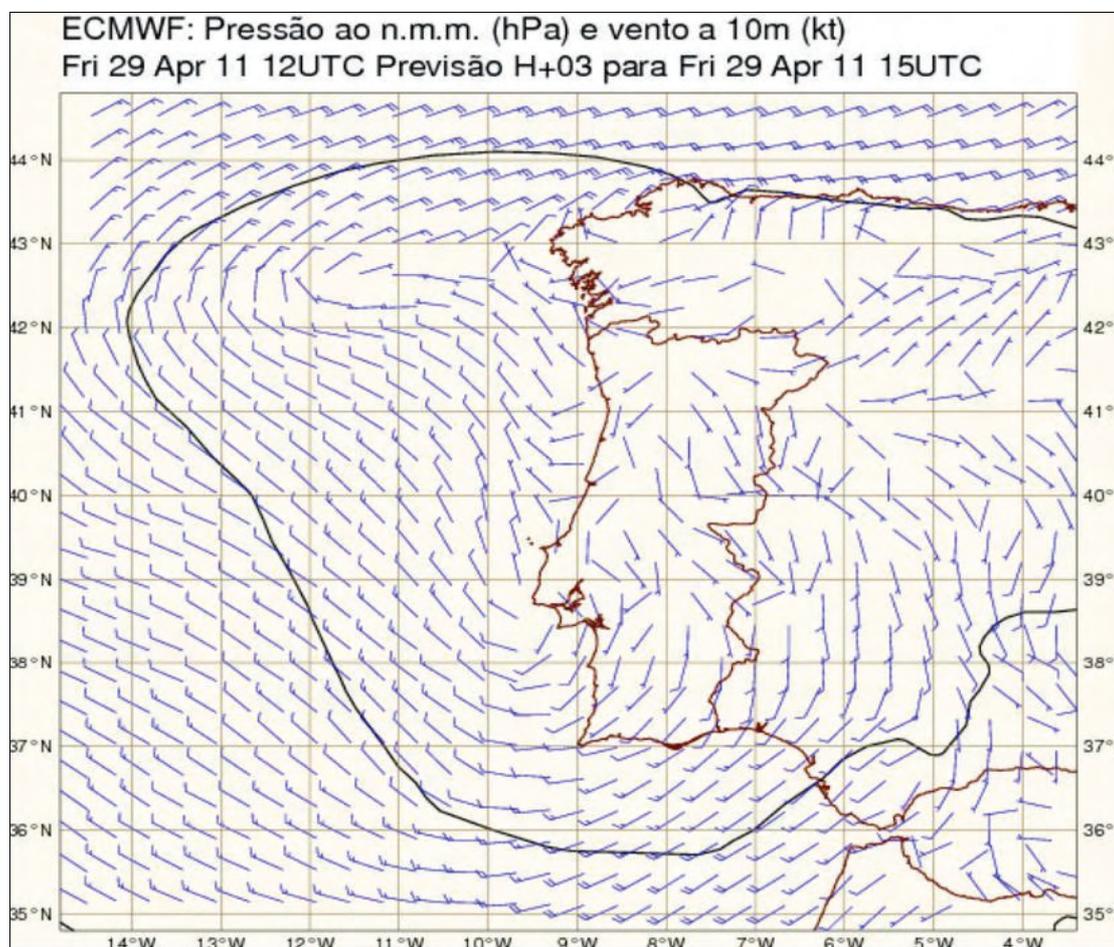


Figura 1 – Campos da pressão (n.m.m) e vento a 10 m, previstos para as 15 UTC de 29/04/11, com base na *Run* das 12 UTC. Núcleo depressionário visível sobre a região de Lisboa.

Reconhece-se que esta situação meteorológica, embora genericamente prevista em tempo útil pelo IM, I.P., se exprimiu de forma particularmente intensa na referida região. O sistema convectivo multicelular que se organizou na área, ao qual a tempestade de granizo esteve associada, resultou de uma interacção complexa entre vários factores, que os modelos operacionalmente disponíveis não tiveram a capacidade de exprimir sob a forma de campos numéricos indicativos das condições observadas. Este documento destina-se a diagnosticar o fenómeno da intensa queda de granizo, com base nos elementos apontados.

## 2. Observações e campos numéricos em níveis baixos (superfície – 925 hPa)

### 2.1 Observações de superfície

A área de interesse sobre a qual incide o presente relatório, corresponde obviamente a uma extensão mais vasta do que aquela onde foi observada a tempestade de granizo. Trata-se de uma região limitada, a S, pelo paralelo da lagoa de Albufeira e, a N, pelo paralelo aproximado da estação de Torres Vedras/Dois Portos, que a figura 2 documenta.

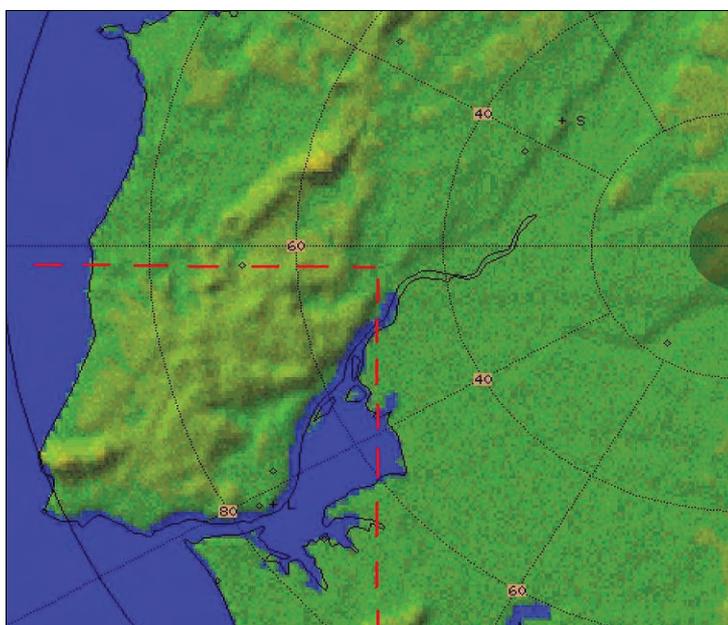


Figura 2 – Região considerada no presente relatório, para efeitos do diagnóstico da tempestade de granizo que afectou parte da Grande Lisboa em 29/04/11.

Foram inicialmente consideradas as estações de Cabo Raso (765), Sintra/BA (532), Lisboa/Geof. (535), Alverca/BA (537), Barreiro (760), Almada/P. Rainha (773), para avaliar a evolução do campo do vento na área e período de interesse (10-15 UTC de 29 de Abril). Para avaliar outros campos de interesse, foram também adicionalmente consultadas as observações das estações de Lisboa/Benfica, Amadora e Cacém.



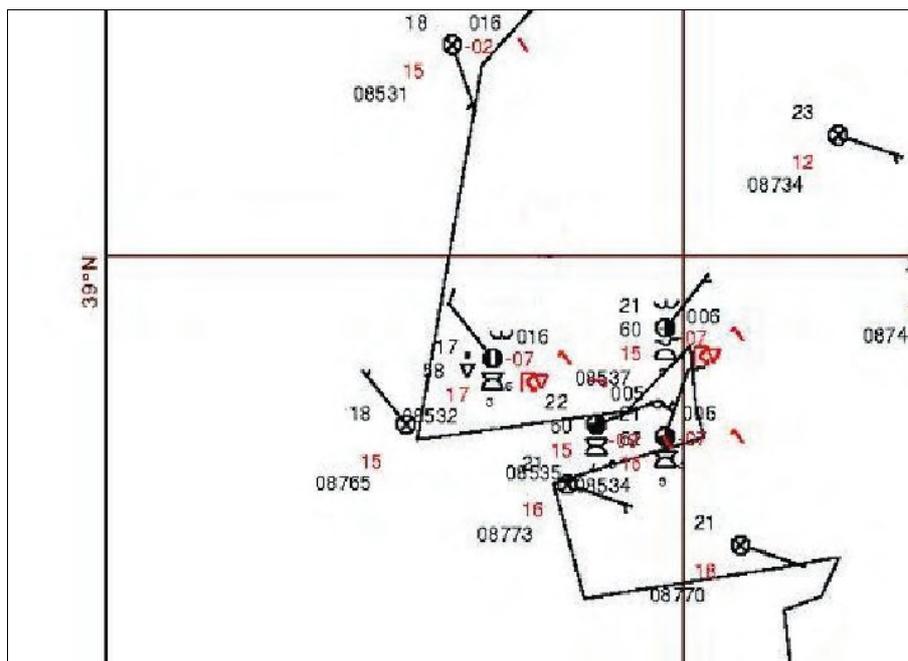


Figura 4 – Escoamento do vento à superfície, pelas 12 UTC de 29 de Abril, na área de interesse. As observações de Cabo Raso e Sintra/BA, mostram um fluxo de NO, contrastante com o evidenciado em Almada/P. Rainha, Lisboa/Geofísico, Barreiro e Alverca/BA (traçado sinóptico do IM).

Pelas 13 e 14 UTC a situação foi muito semelhante, verificando-se que Cabo Raso e Almada/P. Rainha apresentam fluxo de O/NO, enquanto Lisboa/Geof registava, ainda, fluxo de SE. Pelas 15 UTC, a linha havia, entretanto, progredido mais para E. A estação de Alverca/BA, no entanto, ainda apresentava fluxo de SE, como a figura 5 documenta.

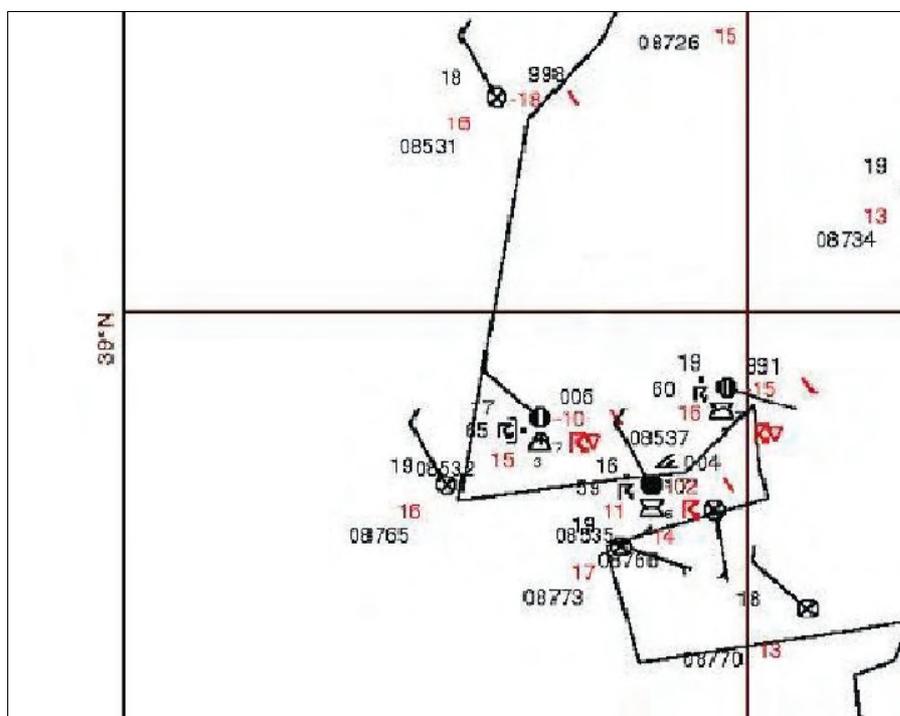


Figura 5 - Escoamento do vento à superfície, pelas 15 UTC de 29 de Abril, na área de interesse. Existe a sugestão da presença da linha de convergência mais para E, face às observações anteriores, sobre o S da pensínsula de Lisboa. Cabo Raso, Sintra, Lisboa/Geof observavam fluxo de O/NO, sendo que Alverca/BA ainda apresentava fluxo de SE (traçado sinóptico do IM).

As observações efectuadas às 16 UTC, finalmente, sugerem que o escoamento à superfície, sobre toda a área de interesse, é já de O/NO (ver figura 6). Parece, assim, evidente a presença de uma linha de convergência à superfície, se bem que não muito intensa - dada a fraca circulação estabelecida sobre a região - e em progressão lenta de O para E, durante o período 10-15 UTC, sobre a península de Lisboa, contida na área assinalada na figura 2.

As únicas observações cinemáticas disponíveis entre a superfície e os 925 hPa (exclusivé), com excepção da observação aerológica de Lisboa, foram obtidas com o radar de Coruche/Cruz do Leão. Optou-se por discuti-las noutro parágrafo, dada a sua evidente consistência com os processos convectivos verificados.

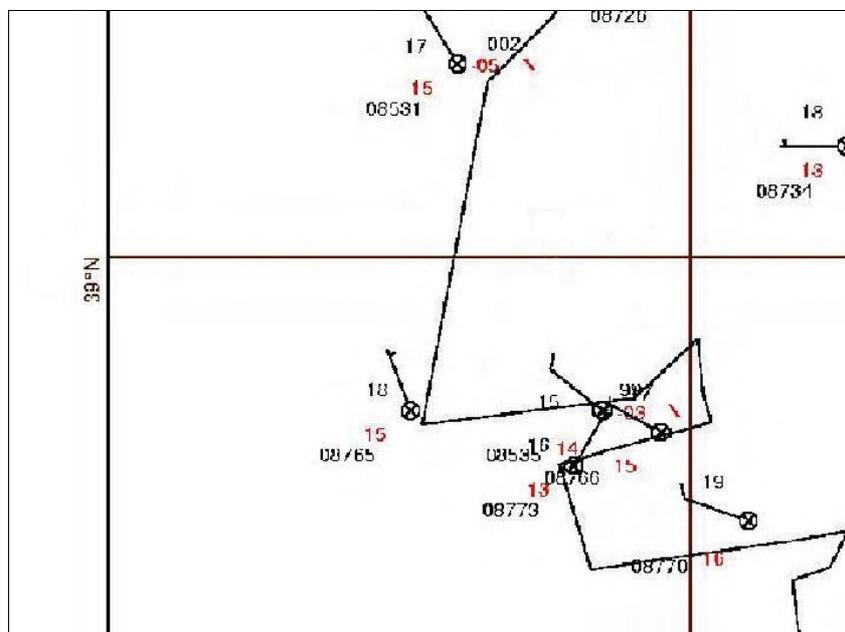


Figura 6 - Escoamento do vento à superfície, pelas 16 UTC de 29 de Abril, na área de interesse. Encontra-se já estabelecido sobre toda a região, um escoamento de O/NO (traçado sinóptico do IM).

## 2.2 Diagnóstico com recurso ao modelo AROME

O objectivo deste trabalho é o de diagnosticar o fenómeno ocorrido, não cabendo na sua execução um confronto exaustivo entre o desempenho relativo dos diversos modelos operacionalmente disponíveis. Sem prejuízo de esse aspecto poder e dever ser tratado num outro âmbito, foi necessário optar por um modelo como elemento auxiliar de diagnóstico.

A escolha recaiu sobre o modelo atmosférico AROME, embora se tenha também recorrido a algumas das saídas do modelo do ECMWF. Os motivos desta opção assentaram em 4 aspectos essenciais: (i) trata-se de um modelo de mesoescala (resolução horizontal de 2,5 km) alimentado pelo ALADIN, sendo já reconhecido o bom desempenho deste último, quando se trata de diagnosticar circulações de mesoescala baixa, como é o presente caso; (ii) na presente situação, o modelo AROME revelou boa consistência com as observações de superfície disponíveis para a área e período considerados; (iii) foi possível dispor, facilmente, de saídas horárias; (iv) este episódio parece constituir uma excelente oportunidade para utilizar as



previsões de alguns campos deste modelo como ferramentas de diagnóstico, evidenciando a sua potencialidade neste particular e numa situação real, à semelhança do que foi feito, por exemplo, para o estudo de caso da precipitação intensa no arquipélago da Madeira, com bons resultados.

Os campos do vento previstos para a superfície pelo AROME, para as 13, 14, 15 e 16 UTC de 29 de Abril, obtidos com base na *Run* das 0 UTC e na *Run* das 12 UTC do mesmo dia, apresentaram boa consistência entre si, o que é de registar; no entanto, foi visível que o desempenho com base na *Run* mais recente, no que respeita à superfície, foi melhor face ao confronto com as observações disponíveis. Por outro lado, importa notar que os campos do vento previstos pelo AROME com base na *Run* das 12 UTC para os níveis de 925, 850, 700 e 500 hPa, apresentaram consistência com as observações Doppler, para os mesmos instantes e área relevante, como se discutirá. Doravante, será sempre esta a *RUN* a cujas saídas numéricas este documento se referirá.

A evolução do campo de vento previsto pelo AROME a 10 m, para o período 13-16 UTC, é absolutamente consistente com a evolução das observações de superfície já referidas no parágrafo 2.1. Deste modo, a linha de convergência à superfície é claramente identificável, designadamente no S da península de Lisboa, como é visível na sequência das figuras 7 a 10 seguidamente apresentadas. É igualmente visível o seu deslocamento, lento, de O para E e a sua orientação praticamente meridional. De facto, entre as 13 e as 16 UTC verificou-se, nos campos previstos, tal como sugerido pelas observações de superfície, um deslocamento gradual da linha, de O para E, com uma velocidade de, aproximadamente, 5 km/h.

As saídas do modelo do ECMWF correspondentes ao campo do vento a 10 m, designadamente a análise das 12 UTC e a previsão para as 15 UTC, são absolutamente consistentes com as do AROME (e, obviamente, ALADIN), na medida em permitem presumir a permanência, sobre a região de interesse, de um elemento forçador da convergência à superfície, associado à circulação do núcleo ciclónico superficial que qualquer dos modelos permitiu identificar.

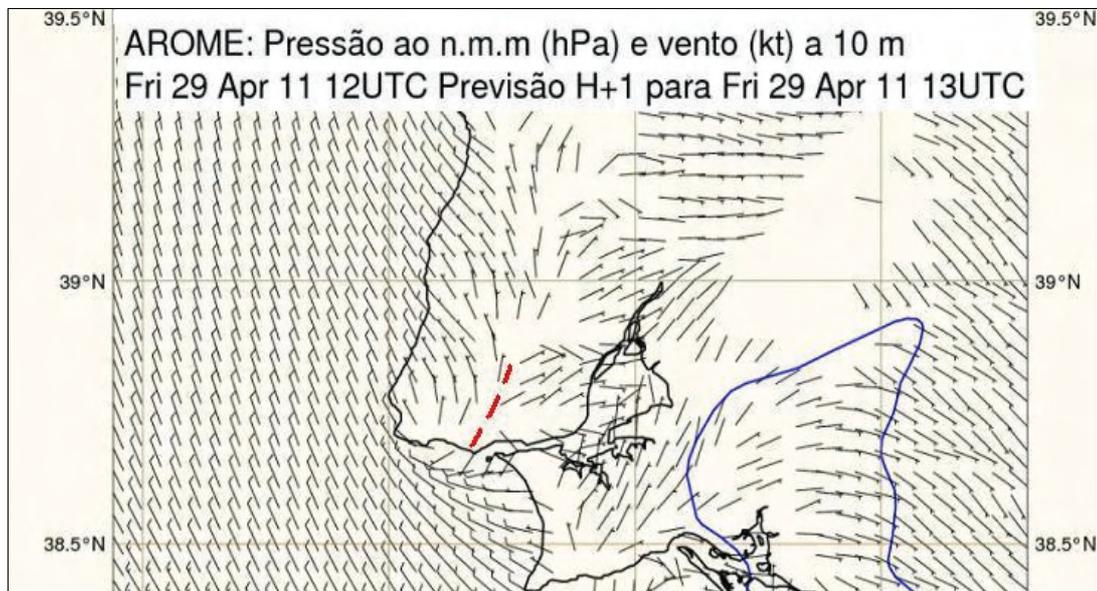


Figura 7 – Campos da pressão (n.m.m) e vento a 10 m, previstos para as 13 UTC de 29/04/11. Assinalada a tracejado vermelho a linha de convergência identificada.



Figura 8 – Campos da pressão (n.m.m) e vento a 10 m, previstos para as 14 UTC de 29/04/11. Assinalada a tracejado vermelho a linha de convergência identificada.



Figura 9 – Campos da pressão (n.m.m) e vento a 10 m, previstos para as 15 UTC de 29/04/11. Assinalada a tracejado vermelho a linha de convergência identificada.

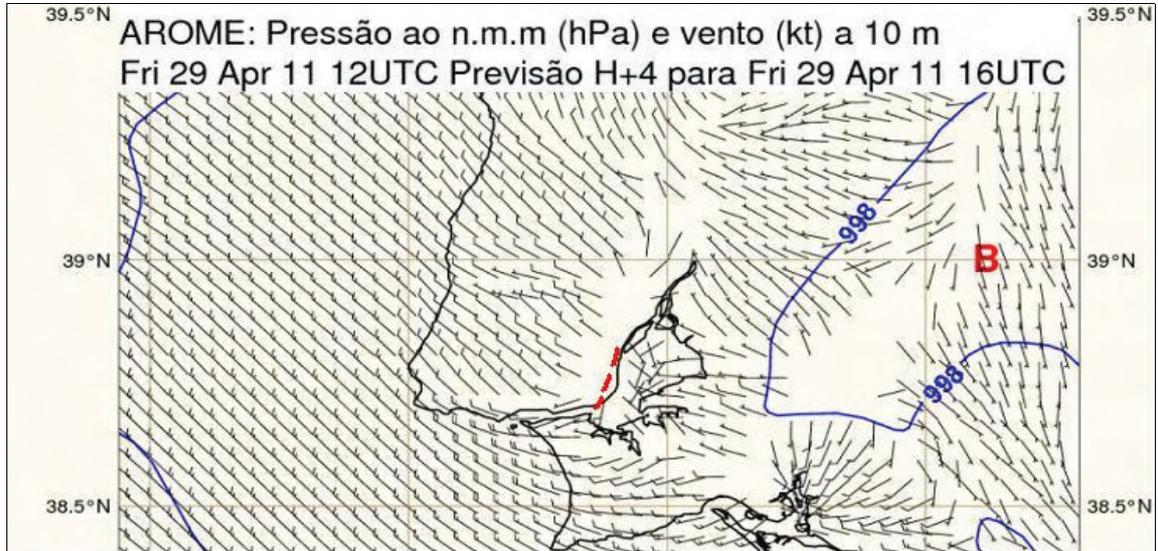


Figura 10 – Campos da pressão (n.m.m) e vento a 10 m, previstos para as 16 UTC de 29/04/11. Assinalada a tracejado vermelho a linha de convergência identificada.

Quanto aos campos do vento e humidade relativa previstos pelo AROME ao nível de 925 hPa, para o período 13 - 16 UTC, verifica-se que a convergência, fracamente visível na previsão para as 13 UTC, já é identificável nas previsões para as 14, 15 e 16 UTC; ou seja, o modelo evidencia, em especial após as 14 UTC, que a linha de convergência já identificada à superfície, se estendia até um pouco acima desta (no dia 29/04/11, o nível de 925 hPa situava-se em torno dos 650-700 m de altitude). Este aspecto terá sido relevante para o desenvolvimento do fenómeno observado.

A figura 11, referindo-se ao vento a 925 hPa e à humidade relativa para as 14 UTC, mostra a presença da linha de convergência, a título exemplificativo, para aquela hora, sendo também relevante verificar a existência de um máximo relativo no campo da humidade relativa, a O da linha de convergência.

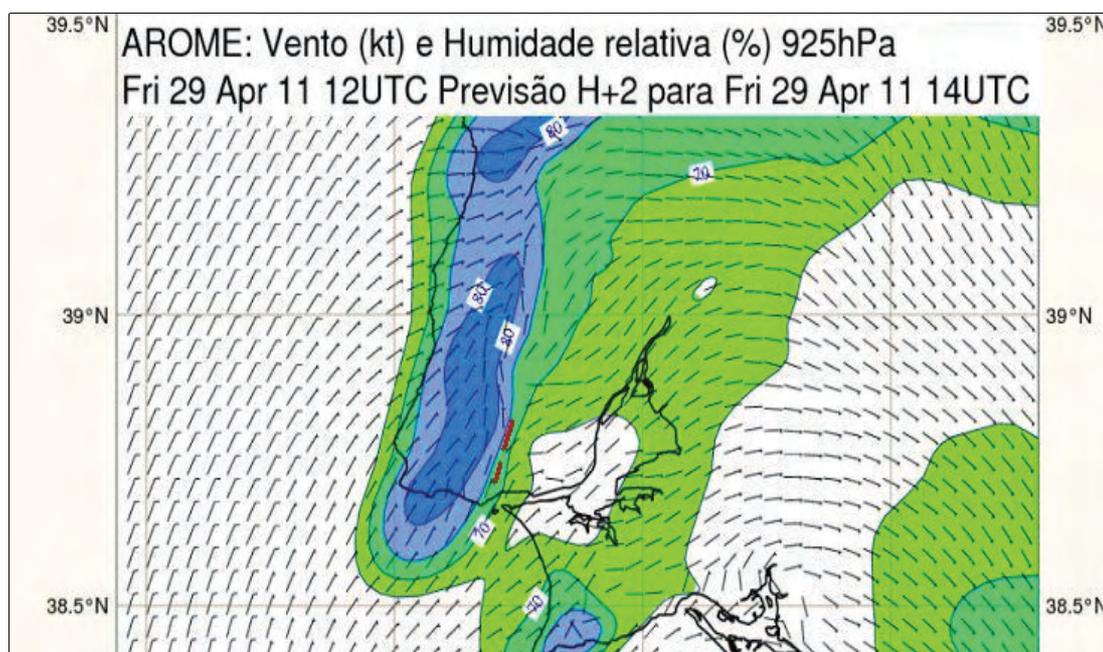


Figura 11 – Campos da humidade relativa e vento a 925 hPa, previstos para as 14 UTC de 29/04/11. Assinalada a tracejado vermelho a linha de convergência identificada. Bolsa de ar seco visível a E e S da linha.

É notório, por confronto directo com a figura 8, que a linha de convergência a este nível, se localiza sobre a correspondente linha identificada à superfície, o que sugere óbvia consistência vertical da descontinuidade. Por outro lado, o campo da humidade relativa sugere, também, a presença de uma bolsa de ar seco a E e S da linha, cuja relevância será discutida no parágrafo

seguinte. A figura 12 confirma a presença da linha de convergência aos 925 hPa, pelas 15 UTC, localizada, uma vez mais, sobre a correspondente linha identificada à superfície, à mesma hora (confrontar com a figura 9). Deste modo, confirmam-se quer a consistência vertical da descontinuidade, quer a sua consistência temporal. O mesmo se aplica quer ao máximo relativo no campo da humidade relativa, que continuava a ser identificado a O da linha de convergência, quer à presença da bolsa de ar seco a E e S da linha de descontinuidade.

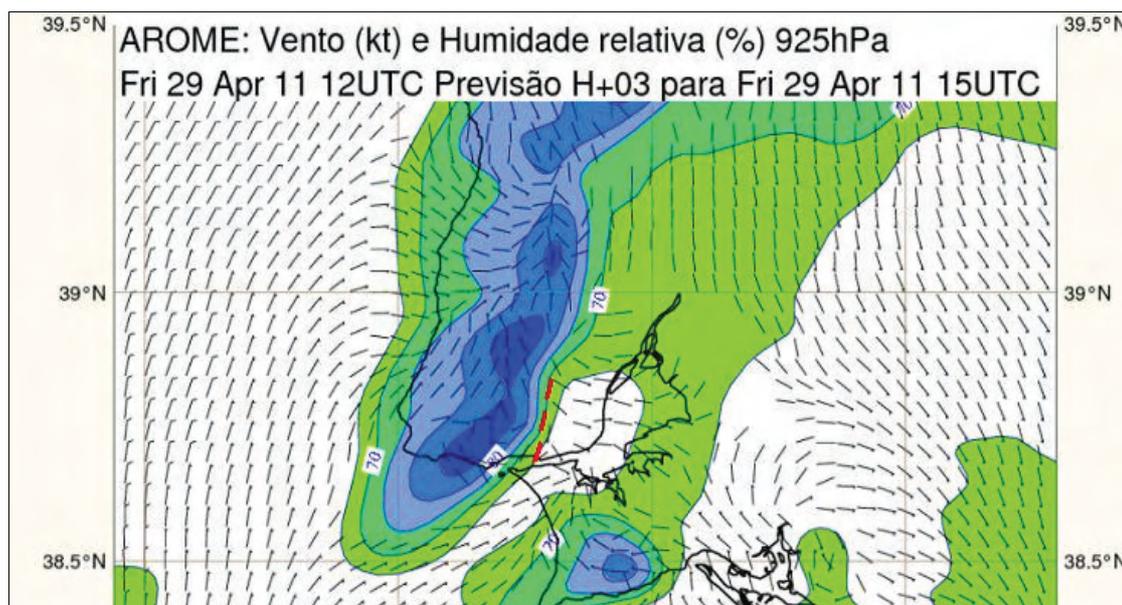


Figura 12 – Campos da humidade relativa e vento a 925 hPa, previstos para as 15 UTC de 29/04/11. Assinalada a tracejado vermelho a linha de convergência identificada. Bolsa de ar seco visível a E e S da linha.

Considerações idênticas poderiam ser efectuadas para o instante das 16 UTC, quanto à consistência vertical da linha de convergência, máximo da humidade relativa, bolsas de ar seco e posicionamentos relativos em relação à linha.

### 3. Observações e campos numéricos, em níveis médios e altos

#### 3.1 Diagnóstico com recurso ao modelo AROME

Em níveis mais elevados, como 850, 700 e 500 hPa, os campos de vento previstos pelo AROME, para o mesmo período 13–16 UTC, já não sustentam a existência da convergência linear identificada em níveis inferiores, antes evidenciam a persistência de uma circulação em

geral do quadrante E, por vezes complexa e sempre extremamente fraca, justificável pelo quadro sinóptico já mencionado, mas invulgar para estes níveis tão elevados da troposfera.

O AROME evidenciava, ao nível de 850 hPa (que, no dia 29/04/11, se situava a aproximadamente 1400 m de altitude), para os instantes de previsão 14, 15 e 16 UTC, a existência de uma região relativamente seca na troposfera, situada sempre na vertical da região do mínimo relativo no campo da humidade relativa, já identificado aos 925 hPa, em cada um dos instantes. Este facto revela óbvia consistência vertical e temporal, e é fortemente sugestivo da presença de ar relativamente seco, pelo menos até aos 850 hPa numa região vizinha, situada a E e S, da linha de convergência identificada à superfície e 925 hPa, durante o período 13–16 UTC. Na figura 13 pode ser observada a localização da bolsa de ar seco aos 850 hPa, pelas 14 UTC.

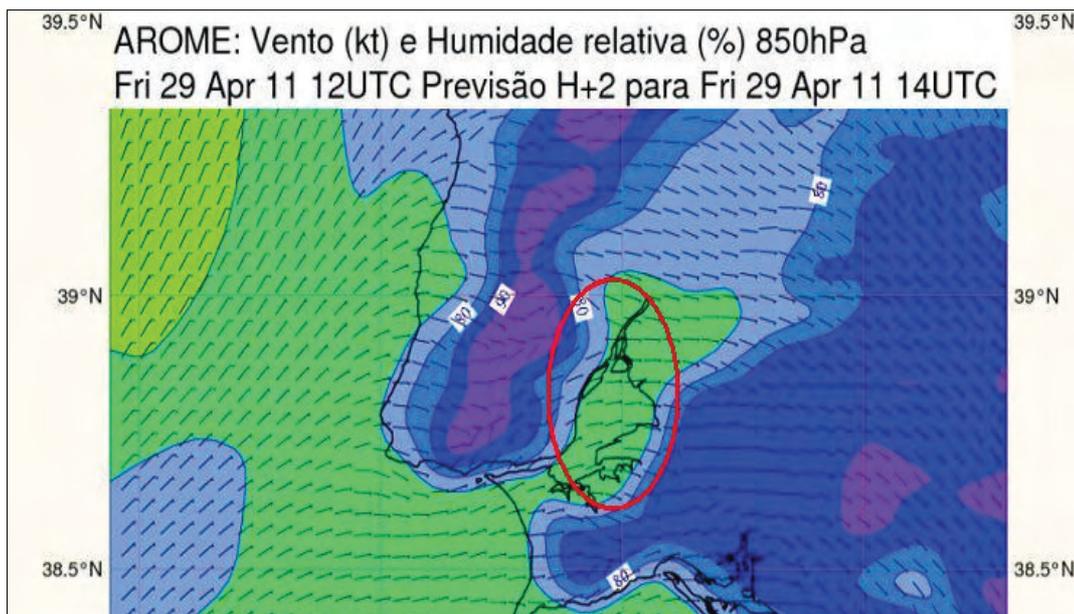


Figura 13 – Campos da humidade relativa e vento a 850hPa, previstos para as 14 UTC de 29/04/11. Assinalada a vermelho a bolsa de ar seco identificada a E e S da linha de convergência presente em níveis inferiores.

Na figura 14 é observável a localização da bolsa de ar seco aos 850 hPa, pelas 16 UTC.

Ao nível de 700 hPa (que, no dia 29/04/11, se situava a aproximadamente 3000 m de altitude) o AROME mostrava, para os instantes de previsão 14, 15 e 16 UTC, um escoamento



relativamente complexo sobre a região de interesse, extremamente fraco, evidenciando a presença de uma circulação ciclónica, aberta, situada sobre a região de Lisboa entre as 13 e 15 UTC. Nos campos do vento e humidade relativa previstos para as 16 UTC mostra, concretamente, um padrão interessante: um máximo relativo no campo da humidade relativa

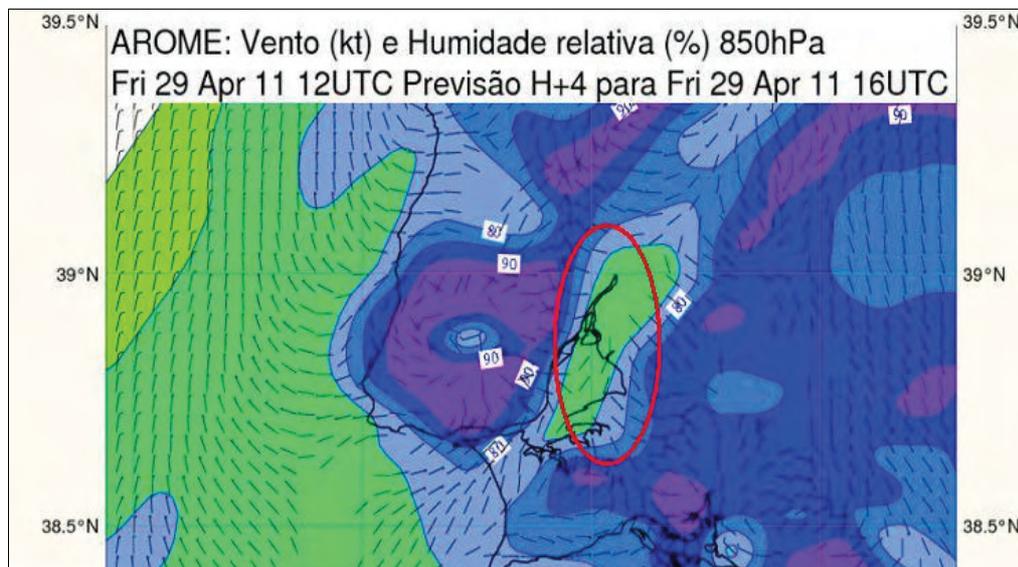


Figura 14 – Campos da humidade relativa e vento a 850 hPa, previstos para as 16 UTC de 29/04/11. Assinalada a vermelho a bolsa de ar seco identificada a E e S da linha de convergência presente em níveis inferiores.

do ar (com valor superior a 90 %), ligeiramente a O da linha de convergência àquele nível, circundada, a SE, S e SO, por uma região de ar bastante seco (ver figura 15).





Ou seja, reconhece-se que: (i) face às diversas observações existentes, o AROME apresentou campos previstos revelando padrões desfasados com, pelo menos, 1 hora de atraso, aos vários níveis; (ii) não obstante o referido no ponto anterior, os campos previstos reflectem padrões nos campos do vento horizontal e da humidade relativa, consistentes com a existência de uma região sujeita a convecção húmida que, em particular nos seus sectores E e S, teve de conviver com um volume de ar relativamente seco, ao longo de uma grande extensão vertical.

Este quadro global é consistente com as observações, designadamente as efectuadas com radar. Também é concordante com modelos conceptuais aceites para explicar a formação e propagação de um certo tipo de sistemas convectivos multicelulares, como adiante se discutirá.

### 3.2 Observação aerológica de Lisboa (12 UTC)

A radiossondagem de Lisboa, efectuada pelas 12 UTC, já referida neste relatório (ver 1. Introdução), merece referência especial pela importância que as respectivas observações comportam e pela consistência que trazem à presente discussão.

De uma análise sumária do diagrama resultante (ver figura 17) e da sondagem apurada, decorrem as seguintes conclusões: (i) o valor do *Lifted Index* (LI), de  $-6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , evidenciava uma troposfera instável, compatível com a possibilidade de *updrafts* relativamente intensas ao nível de 500 hPa (nível de referência para o LI calculado no IM); (ii) o valor da *CAPE*,  $1892\text{ Jkg}^{-1}$ , era elevado para a nossa região, indicativo de muita disponibilidade em energia destinada a alimentar processos convectivos; (iii) o valor da *CIN*, obtida no mesmo contexto, apresentava um valor de  $0\text{ Jkg}^{-1}$ , obviamente consistente com o traçado do diagrama aerológico e significativo da inexistência de quaisquer camadas estáveis na baixa troposfera, pelo que as *updrafts* poderiam ser dirigidas pela instabilidade, logo a partir da superfície; (iv) o valor da água precipitável (integrado até 400 hPa), de cerca de 25 mm, era moderado, sem ser excessivamente elevado; (v) o nível de condensação situava-se em torno dos 880 hPa, ou seja, cerca de 980 m de altitude; (vi) o nível de congelação situava-se a cerca de 2200 m de altitude; (vii) o valor do *wind shear* vertical era reduzido, quaisquer que fossem as camadas consideradas para a sua estimativa; (viii) o nível de equilíbrio (nível que marca o fim da persistência da convecção, por se atingir a base de uma camada estável vizinha da tropopausa ou coincidente com esta) era relativamente elevado, a cerca de 10700 m de altitude; (ix) a presença de camadas de ar seco em níveis médios-altos, foi observada acima dos 570 hPa (cerca de 4500 m de altitude), embora também abaixo.



Nestas condições, a observação aerológica de Lisboa, às 12 UTC, revelava a presença de uma troposfera instável, com bastante energia disponível para a convecção e condições para esta ser dirigida pela instabilidade logo a partir da superfície e ter condições para persistir até níveis muito elevados (*updrafts* com potencial para ser intensas a 500 hPa), caracterizada por um nível de congelação não muito alto, um razoável conteúdo em água precipitável e um nível de equilíbrio também relativamente elevado.

A ausência de inibição para a convecção foi relevante. Neste contexto, terá assumido particular importância o forçamento vertical que as observações de superfície e os campos previstos pelo AROME (ver pontos anteriores) sugerem ter estado presente, sob a forma de uma linha de convergência identificada entre a superfície e os 925 hPa. Com efeito, a presença de um forçamento vertical suplementar, em níveis baixos, numa determinada região do domínio nas presentes condições, constitui, nessa região, um factor favorável a uma aceleração acrescida dos movimentos verticais organizados, com todas as consequências para a formação de aglomerados de granizo no interior das massas convectivas.

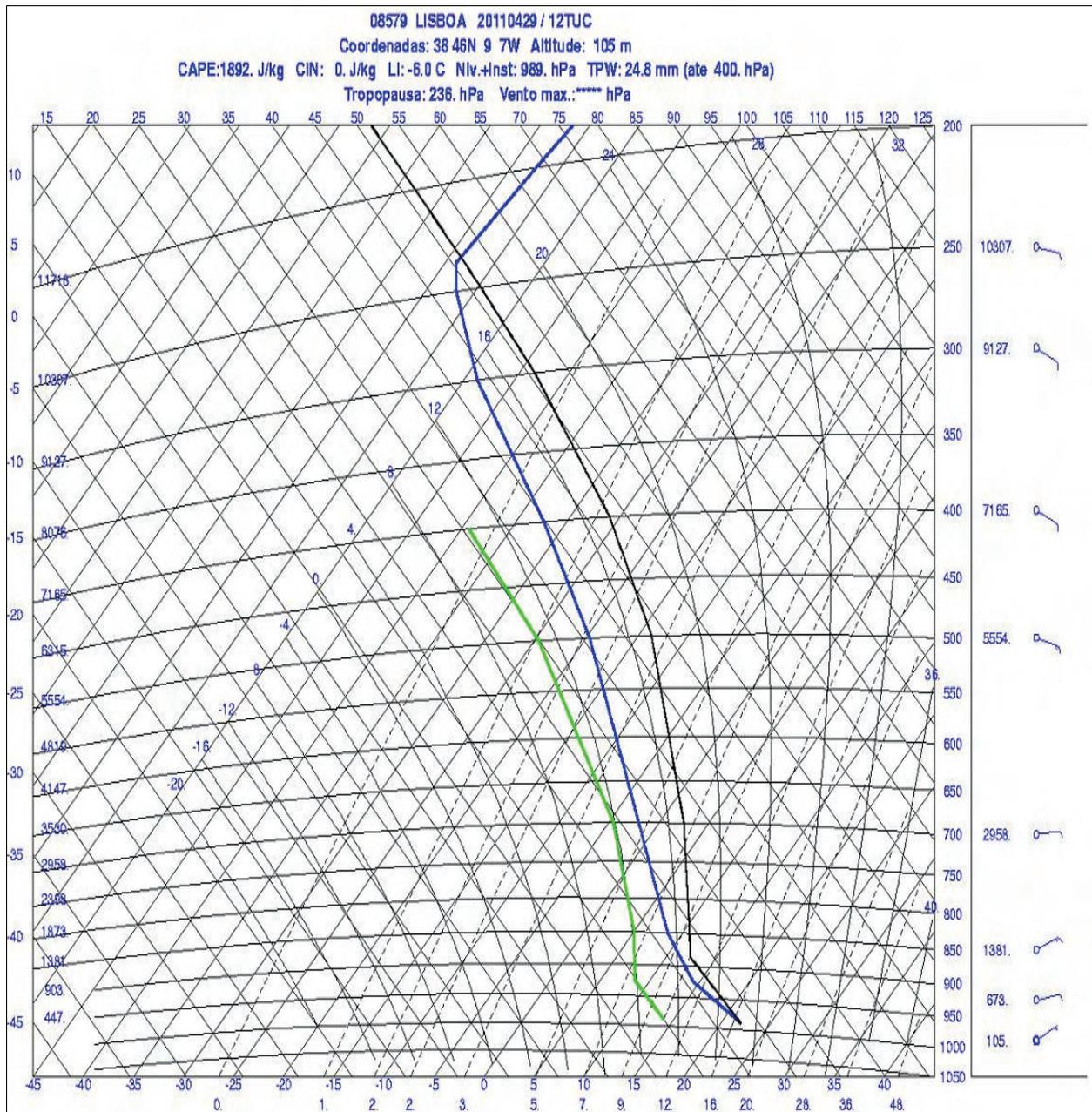


Figura 17 – Tefigrama correspondente à observação aerológica de Lisboa/G. Coutinho (12 UTC de 29/04/11).

Na presente situação, o *wind shear* vertical foi reduzido e o seu habitual papel em produzir *updrafts* muito intensas, terá sido desempenhado pela combinação dos outros factores apontados, com particular destaque para a instabilidade e a presença da linha de convergência identificada.



## 4. Observações de radar, satélite e descargas eléctricas

Todo o episódio em estudo foi observado pelo sistema de radar de Coruche/Cruz do Leão (C/CL), em regime de exploração operacional, tendo-se recorrido aos algoritmos disponíveis para obter os produtos destinados a análise da situação, quer na sua componente de reflectividade, quer na componente Doppler. Foi também possível recorrer a alguns tipos de imagem de satélite, de interesse para consolidar a discussão.

### 4.1 Modo de organização convectiva observado no campo da reflectividade radar

Uma análise dos produtos MAXZ e TOPS revelou que o modo de organização convectiva que se estabeleceu, e que culminou na tempestade de granizo em estudo, correspondeu a um sistema convectivo multicelular. Tratou-se de um sistema organizado em diversos elementos convectivos, cada qual caracterizado por um ciclo de vida menos duradouro do que o do sistema como um todo e em que os elementos convectivos individuais foram observados em diversos estados do respectivo ciclo de vida, interagindo entre si (Byers and Braham, 1949). Não é claro, no entanto, que este sistema possa ser classificado formalmente como um MCS, uma vez que Houze (1993), associou um destes sistemas a uma escala linear de, pelo menos, 100km, valor claramente superior ao correspondente ao presente caso.

Considera-se como célula convectiva um conjunto organizado em *updraft/downdraft*, sendo estas identificadas pela formação do respectivo núcleo de reflectividade radar máximo, em altitude, associado aos processos de condensação (Brown *et al.*, 2002). Este núcleo de reflectividade é referido na literatura anglo-saxónica como *core* e este termo será, doravante, utilizado.

O produto MAXZ mostra, pelas 12:30 UTC, uma primeira célula convectiva em formação, ligeiramente a SO da estação de Torres Vedras/Dois Portos. Teve um ciclo de vida compreendido entre este instante e as 13:30 UTC enquanto célula isolada e, embora tenha chegado a desenvolver um topo a 8.2 km de altitude (segundo o produto TOPS), o seu *core* não excedeu 42 dBZ (a 4500m de altitude), pelas 12:50 UTC, e o máximo valor de reflectividade gerado em níveis baixos não excedeu 48 dBZ, pelas 13 UTC. Esta célula apresentou alguma inclinação da *updraft*, para NO; esta característica, aparentemente contraditória com o reduzido valor de *wind shear* vertical evidenciado pela radiossondagem de Lisboa (12 UTC), deveu-se ao contraste entre o sentido do escoamento em níveis baixos,



convergente, e o sentido predominante de E, acima. Esta célula será referida como **célula A** (ver figura 18).

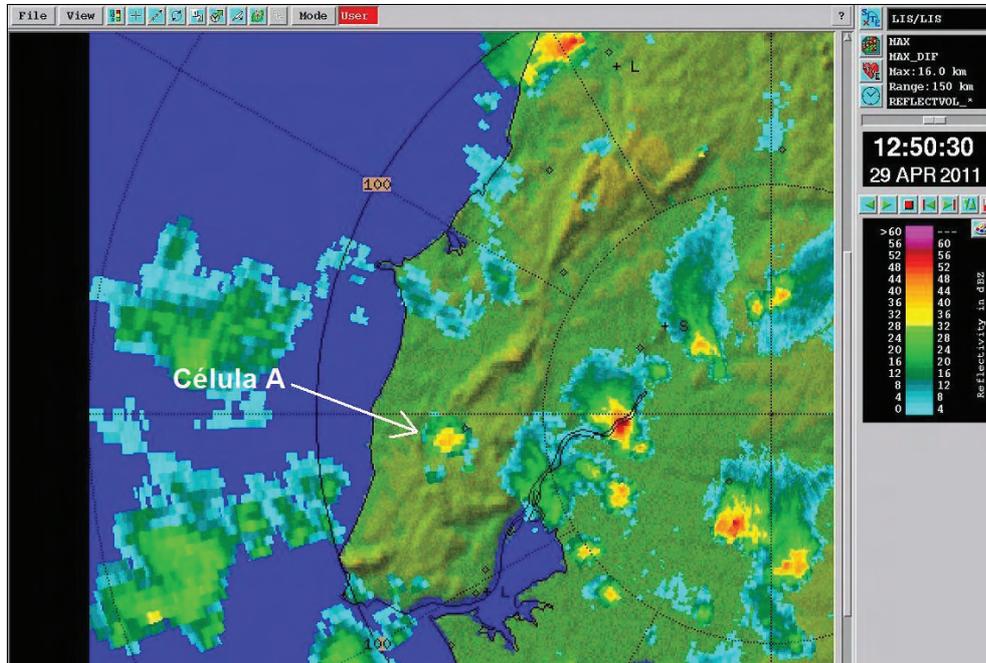


Figura 18 – MAXZ (dBZ) gerado pelo radar de C/CL, 12:50 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicada a célula A, no instante em que o seu núcleo de reflectividade máxima atingia 42 dBZ (a 4500 m de altitude).

Pelas 12:50 UTC, uma segunda célula convectiva formou-se cerca de 8 km a S/SO da referida célula A. Teve um ciclo de vida compreendido entre este instante e as 13:30 UTC enquanto célula isolada e o seu topo atingiu 9.8 km de altitude, pelas 13:30 UTC. O seu *core* não excedeu igualmente 42 dBZ (a 4500 m de altitude), pelas 13:30 UTC, e o máximo valor de reflectividade gerado em níveis baixos não excedeu 48 dBZ, pelas 13:30 UTC. Esta célula apresentou *updraft* vertical. Será referida como **célula B** (ver figura 19).

Pelas 13:20 UTC formou-se uma terceira célula convectiva, ligeiramente a E da estação de Dois Portos. O ciclo de vida decorreu entre as 13:20 e as 14:50 UTC e o seu topo atingiu 11.2 km, pelas 14:10 e 14:20 UTC, valor sugestivo de *overshooting* (tropopausa a menos de 11 km de altitude). O seu *core* atingiu já 59 dBZ (a 4500 m de altitude), pelas 14:10 UTC e o máximo valor de reflectividade gerado em níveis baixos atingiu 57dBZ (pelas 14:20 UTC). Esta célula apresentou uma muito ligeira inclinação da *updraft*, para NO. Será referida como **célula C** (ver figura 20).

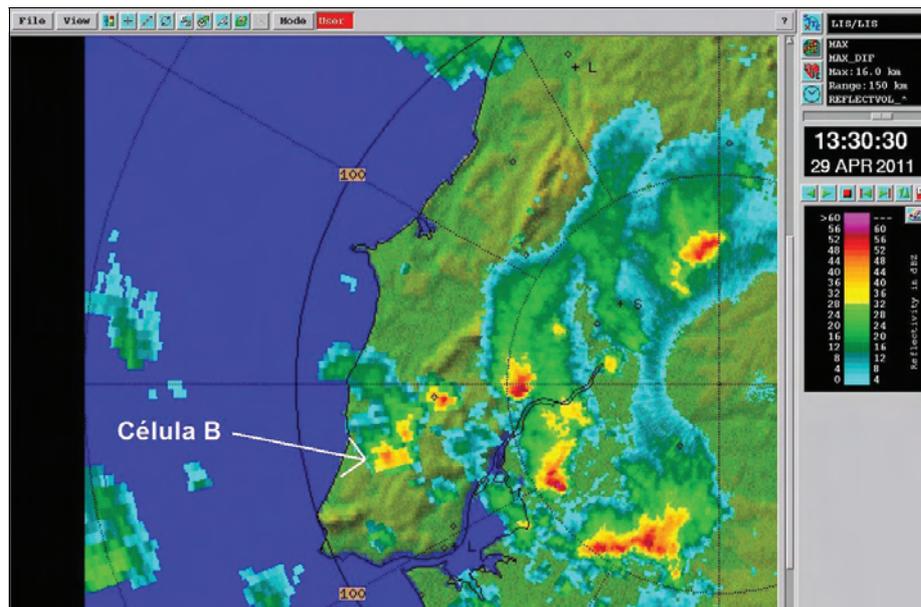


Figura 19 – MAXZ (dBZ) gerado pelo radar de C/CL, 13:30 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicada a célula B, no instante em que o seu núcleo de reflectividade máxima atingia 42 dBZ (a 4500 m de altitude).

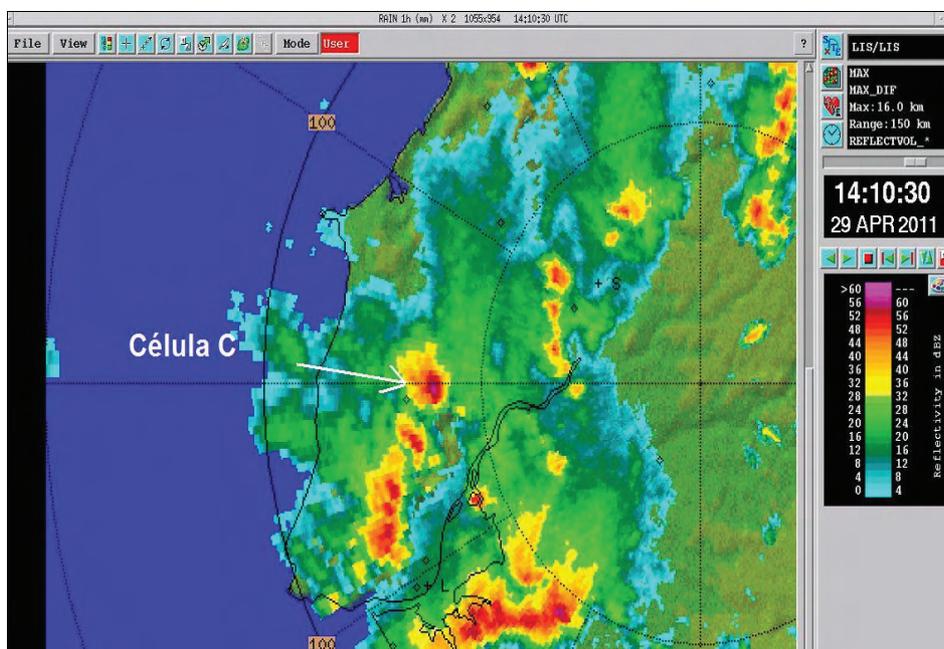


Figura 20 - MAXZ (dBZ) gerado pelo radar de C/CL, 14:10 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicada a célula C, no instante em que o seu núcleo de reflectividade máxima atingia 59 dBZ (a 4500 m de altitude).



Pelas 13:40 UTC, entretanto, ocorreu uma junção entre as células A e B já referidas, da qual resultou a formação de uma nova célula convectiva, que teve um ciclo de vida compreendido entre este instante e as 14:00 UTC; o seu topo atingiu 10.8 km, pelas 14 UTC, o seu *core* alcançou 55 dBZ (a 2000m de altitude), pelas 13:50 UTC e o máximo de reflectividade em níveis baixos foi igualmente de 55 dBZ, a essa mesma hora. Esta célula apresentou alguma inclinação da *updraft*, para NO. Foi designada por **célula D** (ver figura 21).

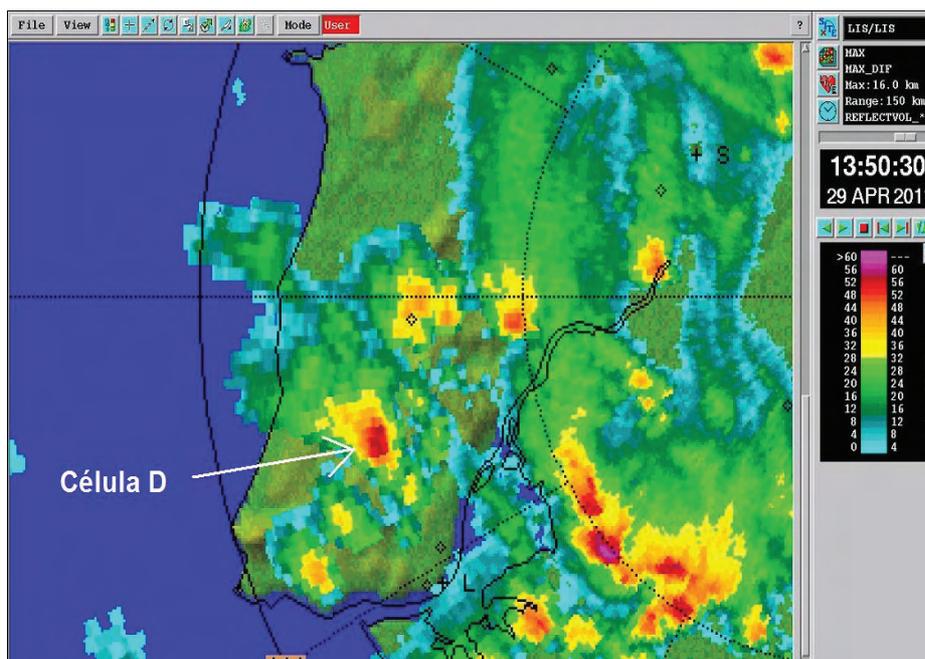


Figura 21 – MAXZ (dBZ) gerado pelo radar de C/CL, 13:50 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicada a célula D, no instante em que o seu núcleo de reflectividade máxima atingia 55 dBZ (a 2000 m de altitude).

Teve, então, início, um processo extremamente difícil de seguir com as observações de reflectividade radar, devido à formação e sucessiva aglutinação de diversas células convectivas com uma frequência superior aos 10 minutos das observações radar executadas. Pelas 14:00 UTC, duas pequenas células convectivas começaram a ser visíveis, a NE da célula D (ver figura 22), tendo sofrido um processo de junção pelas 14:10 UTC; uma outra célula convectiva, entretanto formada a O destas e observada às 14:10 UTC (ver figura 23), fundiu-se com as mesmas, tendo levado à formação de uma nova célula, designada por **célula E**, pelas 14:30 UTC (ver figura 24). Esta célula teve um ciclo de vida compreendido entre este instante e as 15:30 UTC, hora a que se dissipou. O seu topo atingiu 10.8 km, pelas 15 UTC, o respectivo

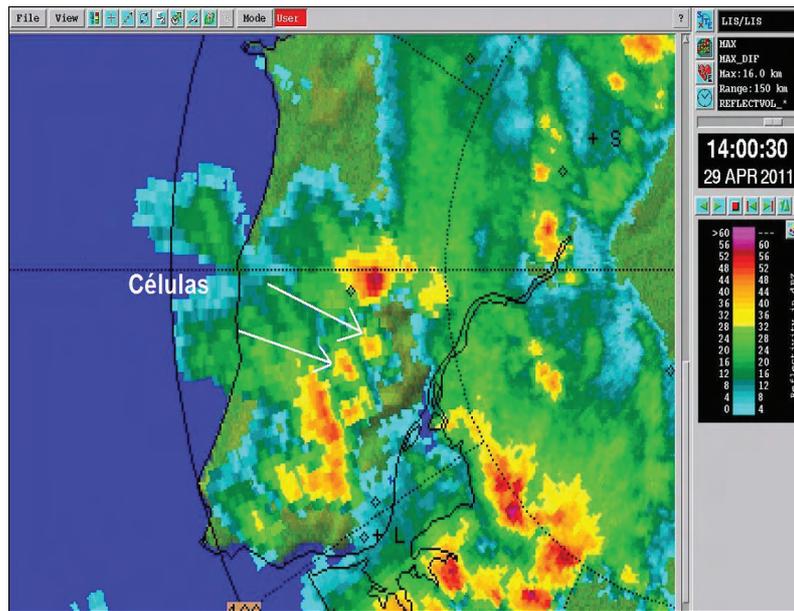


Figura 22 – MAXZ (dBZ) gerado pelo radar de C/CL, 14:00 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicadas duas células, que sofreram um processo de aglutinação nos 10 minutos subsequentes.

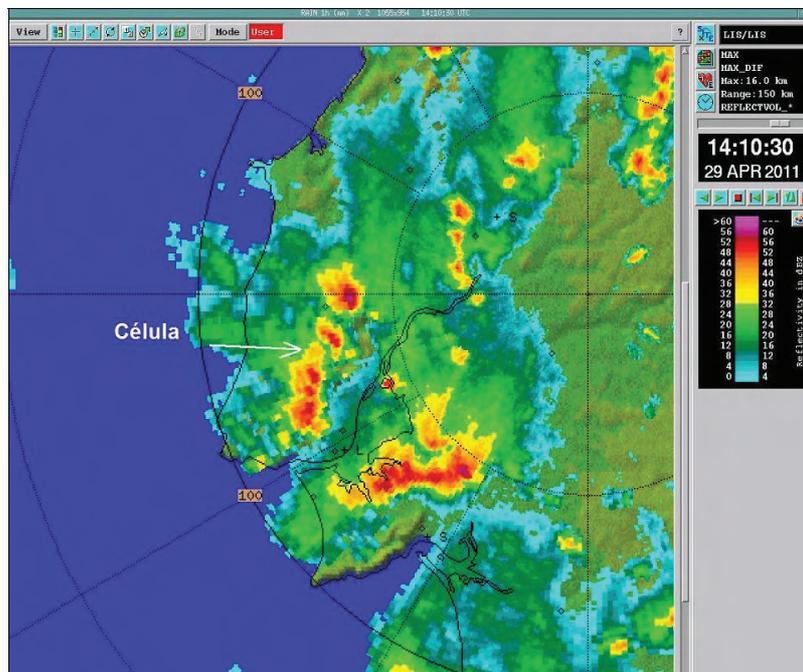


Figura 23 – MAXZ (dBZ) gerado pelo radar de C/CL, 14:10 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicada uma célula, que se irá aglutinar com a que está a E, nos 10 minutos subsequentes.

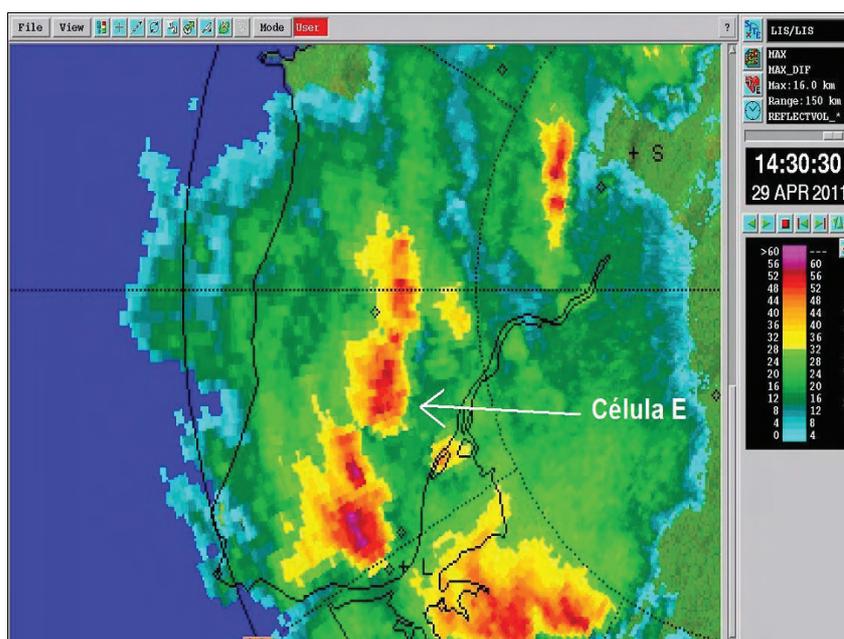


Figura 24 – MAXZ (dBZ) gerado pelo radar de C/CL, 14:30 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicada a célula E, que resultou da aglutinação de 3 células convectivas (ver figuras 22 e 23). Instante inicial da célula.

core alcançou 61 dBZ (a 5100 m de altitude), pelas 14:40 UTC e o máximo de reflectividade em níveis baixos foi de 57 dBZ, à mesma hora. Uma vez mais, também esta célula apresentou alguma inclinação da *updraft*, para NO.

Pelas 14 UTC, duas outras células convectivas (ver figura 25), formadas a S da célula D, iniciaram um processo de junção com esta, já pouco a N da cidade de Lisboa, tendo gerado a estrutura convectiva que veio a produzir a abundante queda de granizo observada essencialmente em algumas áreas de Benfica, Damaia e Amadora. Esta estrutura, designada por **célula F** (ver figura 26), teve um ciclo de vida compreendido entre aquele instante e as 15:10 UTC. O seu topo atingiu 12.2 km, pelas 14:40 UTC, o seu *core* alcançou 59 dBZ (a 4600 m de altitude, ver figura 27) a esta mesma hora e o máximo de reflectividade em níveis baixos foi de 61 dBZ, às 14:50 UTC. Esta célula apresentou uma *updraft*, praticamente vertical, contrariamente à maioria das restantes observadas, como se verifica na figura 27. Nesta figura é, também, possível observar-se a extensa bigorna, que se opõe ao escoamento em altitude. Este facto é sinónimo de intensa divergência do escoamento em altitude resultante da forte *updraft*, consistente, aliás, com a sugestão de *overshooting* que o topo a 12.2 km evidencia.

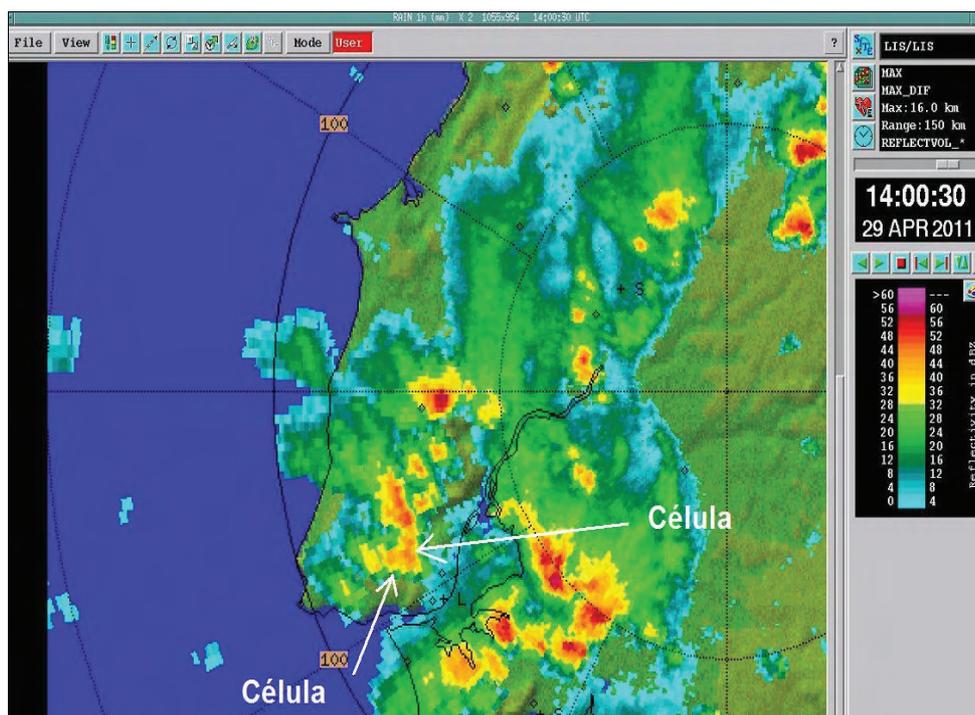


Figura 25 – MAXZ (dBZ) gerado pelo radar de C/CL, 14:00 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicada duas células convectivas que se estão a aglutinar com a célula D, situada a N destas.

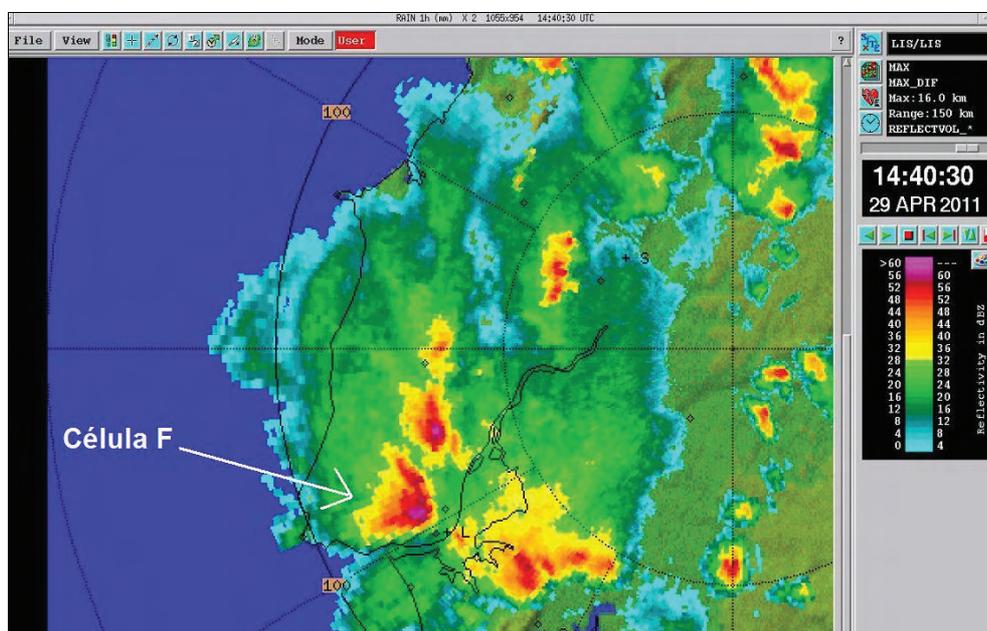


Figura 26 – MAXZ (dBZ) gerado pelo radar de C/CL, 14:40 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicada a célula F que resultou da aglutinação entre 2 células e a célula D (ver figura 25). Instante em que o seu núcleo de reflectividade máxima atingia 59 dBZ (a 4600 m de altitude).

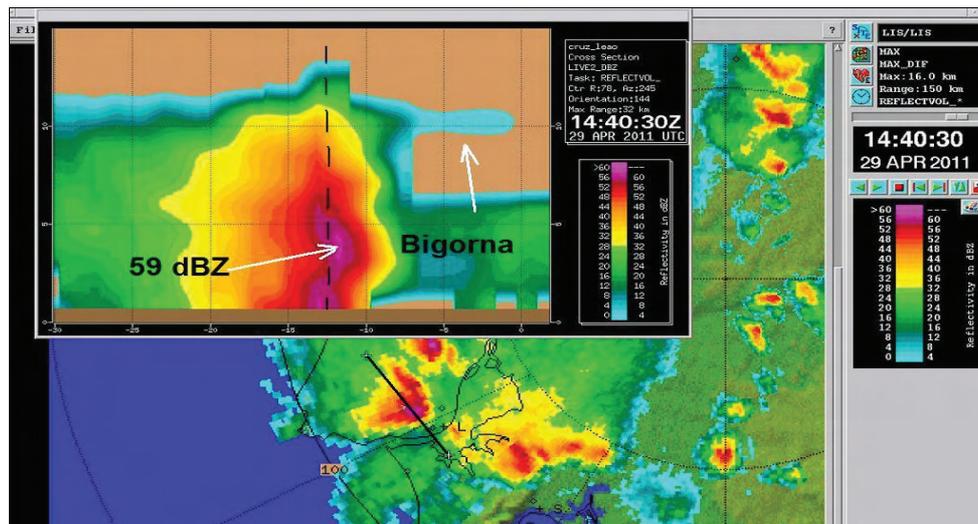


Figura 27 – VCUTZ (dBZ) gerado (corte indicado com segmento, visto de SO) sobre observações do radar de C/CL, 14:40 UTC de 29 de Abril de 2011. Segmento tracejado evidencia verticalidade da *updraft*; topo a 12.2 km, *core* de 59 dBZ a 4600 m de altitude e bigorna visível, contrariando o escoamento do quadrante E, em altitude.

No corte efectuado sobre o campo da reflectividade obtido às 14:50 UTC, com amplificação (ver figura 28), detalha-se o valor máximo de reflectividade observado em níveis baixos, de 61 dBZ, consistente com a intensa queda de granizo observada, associada à célula F.

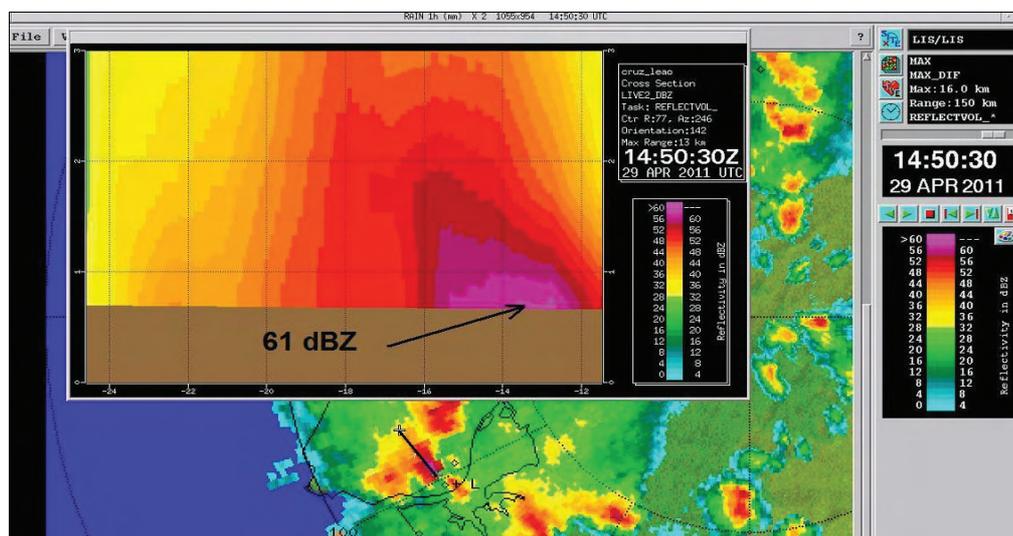


Figura 28 – VCUTZ (dBZ) gerado (corte indicado com segmento, visto de SO) sobre observações do radar de C/CL, 14:50 UTC de 29 de Abril de 2011. Visível o valor máximo da reflectividade de 61 dBZ, correspondente à área onde foi observada intensa queda de granizo (célula F).



Após as 15:00 UTC ainda ocorreu alguma precipitação intensa na região de Lisboa, mas não sob a forma de granizo.

Na tabela seguinte figuram as células mais proeminentes que integraram o sistema convectivo multicelular, com indicação do respectivo ciclo de vida, altitude máxima alcançada pelo topo, valor de reflectividade do seu *core* convectivo e respectiva altitude, bem como o valor máximo de reflectividade observado em níveis baixos. Faz-se notar que esta tabela tem uma função de mera avaliação comparativa entre células e avaliação evolutiva do sistema, sendo essa a sua única função. Com efeito, a divisão de um sistema convectivo deste tipo, em N células constituintes, é sempre um pouco artificial: o sistema deverá ser entendido como um aglomerado, uma vez que a sua dinâmica e as condições meteorológicas precisas que lhe podem estar associadas, resultam necessariamente de uma interacção, complexa, entre diversas células convectivas, que importa ter presente, mas que não é fácil de diagnosticar.

Tabela I – Descrição das principais células convectivas que integraram o sistema multicelular, com indicação da célula, ciclo de vida, topo, valor do *core* do núcleo/altitude e máximo de reflectividade à superfície

| Célula | $\Delta T$ (UTC) | Topo (Km) | Valor do <i>core</i> do núcleo (dBZ)/ Alt (m) | Maximo de reflectividade sup. (dBZ) |
|--------|------------------|-----------|---|-------------------------------------|
| A      | 12:30 - 13:30    | 8.2       | 42 / 4500                                     | 48                                  |
| B      | 12:50 - 13:30    | 9.8       | 42 / 4500                                     | 48                                  |
| C      | 13:20 – 14:50    | 11.2      | 59 / 4500                                     | 57                                  |
| D      | 13:40 – 14:00    | 10.8      | 55 / 2000                                     | 55                                  |
| E      | 14:30 – 15:30    | 10.8      | 61 / 5100                                     | 57                                  |
| F      | 14:00 – 15:10    | 12.2      | 59 / 4500                                     | 61                                  |

Uma análise detalhada das observações radar mostrou que o posicionamento dos *cores* convectivos se estabeleceu, sistematicamente, na área E/SE das células convectivas, facto que reflecte o posicionamento preferencial das *updrafts* que os alimentaram, nesse sector. Este facto permite sustentar a ideia de que foi o escoamento do quadrante E, em níveis baixos, que iniciou a alimentação das estruturas convectivas. A presença de ar seco a E e S da linha (e da convecção), já amplamente referida, contribuiu para que tenha sido igualmente esse sector das células convectivas, aquele em que a mistura entre a matéria condensada das nuvens e ar



seco, foi relevante para a formação de *outflows* convectivos. Estes escoamentos podem constituir-se como elementos forçadores que, interagindo com a linha de convergência identificada em níveis baixos, reforçam as condições para movimentos ascendentes e estabelecem zonas preferenciais para nova convecção, ao longo da linha, num processo sucessivo que determina a retropropagação do sistema; trata-se de uma propagação no sentido oposto (ou quase) ao do escoamento médio que dirige as células convectivas. No caso em estudo, o escoamento médio aos 500 hPa predominava de E, e a propagação foi de NO para SE, no sentido praticamente inverso.

A natureza da propagação e a ligeira inclinação das *updrafts* para NO contribuíram, sem dúvida, para a queda anómala de granizo verificada. Por um lado, uma propagação de tipo retrogradante, com sucessivas células a interagirem entre si e a formarem-se sucessivamente nas vizinhanças das que as antecederam, leva a que a precipitação possa afectar áreas limitadas, aumentando o volume de precipitação observado em cada área. Por outro lado, a inclinação no sentido oposto ao da alimentação das células, constitui um factor favorável à sua longevidade e, portanto, a maiores tempos de residência (ou seja, de crescimento) do granizo em altitude. Estes elementos serão discutidos com a apresentação de um modelo conceptual, mais adiante.

## 4.2 Características cinemáticas inferidas a partir do campo da velocidade Doppler

A análise do campo da velocidade Doppler, observado entre os 500 e os 11000 m de altitude, permitiu sustentar algumas ideias relevantes quanto ao escoamento sobre a região de interesse.

Em geral, a circulação foi fraca a todos os níveis, durante o período compreendido entre as 12 e as 16 UTC (entre as 10 e as 12 UTC não foram observados retrodifusores suficientes para efectuar observações Doppler significativas). Da análise das observações em volume, foi visível, após as 14 UTC, a entrada de um fluxo, fraco, proveniente do quadrante O, consistente com as observações de superfície e com os campos do vento previstos pelo modelo AROME. A razão pela qual este fluxo só foi observado após as 14 UTC, mais tarde do que o evidenciado pelas observações de superfície (ver 2.1) e sugerido pelo AROME, deveu-se ao facto de o radar só observar relativamente acima da superfície e de não terem existido retrodifusores suficientes no período anterior, no sector ocidental da região de interesse. Este fluxo nunca progrediu acima dos 3000 m de altitude e foi convergente com um outro, que já se encontrava

estabelecido sobre a região, predominando do quadrante E; à medida que as células se foram desenvolvendo, as circulações secundárias por elas impostas foram-se sobrepondo ao escoamento sinóptico, bastante fraco, e tornaram-se predominantes sobre este escoamento. Finalmente, os valores da velocidade Doppler foram inferiores a 8m/s, inclusivé nos níveis mais elevados, próximo de 11000 m, o que confirma a fraca circulação presente e é consistente com a observação aerológica. A excepção a esta circulação muito fraca foi, no entanto, importante, e verificou-se em áreas identificáveis a dois níveis de altitude:

(i) por um lado, ocorreu em áreas situadas em altitude, especificamente associada à divergência típica de níveis altos das células convectivas; a comparação entre os campos de reflectividade (ver figura 29) e da velocidade Doppler (ver figura 30) em cada uma das células E e F, permite verificar que a referida assinatura é identificável na região do *core* da nuvem e área adjacente, a altitudes situadas entre 5400 e 6100 m. Esta assinatura só é francamente visível (como foi o caso) se estiverem presentes fortes circulações de divergência, por sua vez consequência de fortes *updrafts*, conclusão que reforça a avaliação efectuada sobre a célula F, aquando da discussão do significado da assinatura da bigorna.

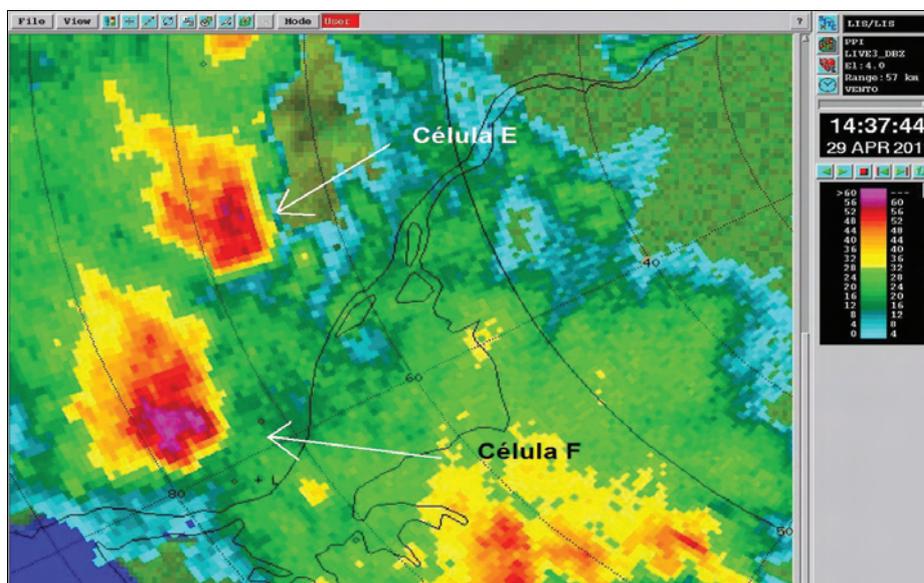


Figura 29 – PPZ (dBZ) gerado pelo radar de C/CL, 14:37 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicadas as células E e F, num plano situado a aproximadamente 5700 m de altitude, sendo visível o topo dos *cores* convectivos – máximos de reflectividade em altitude.

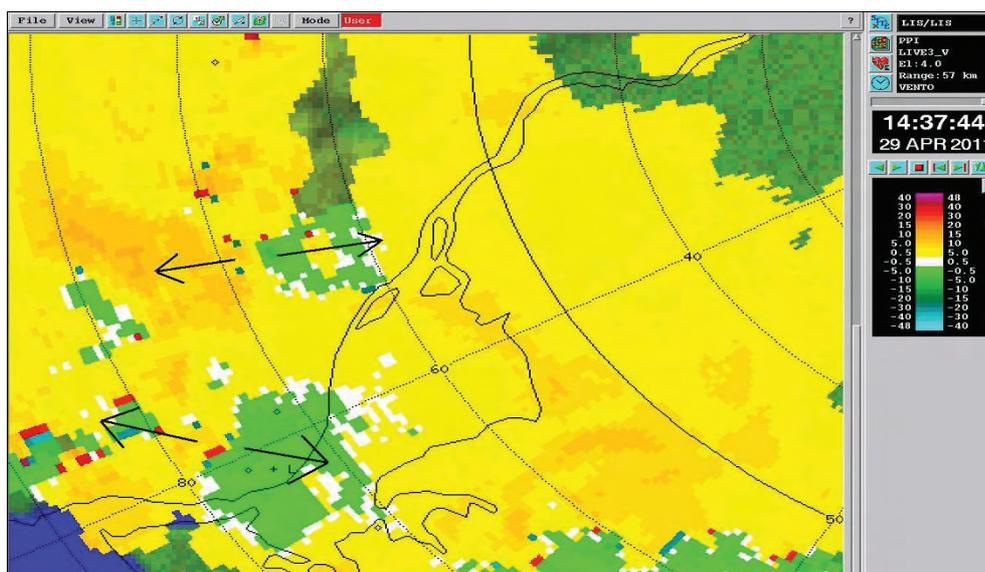


Figura 30 – PPV (m/s) gerado pelo radar de C/CL, 14:37 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicadas as assinaturas de escoamento divergente, a partir do topo dos *cores* convectivos das células E e F, num plano situado a aproximadamente 5700 m de altitude.

(ii) por outro lado, verificou-se em áreas associadas a escoamentos superficiais do tipo *outflow* convectivo, resultante de movimentos descendentes organizados, reforçados por fenómenos de arrefecimento evaporativo ocorridos em níveis mais elevados (associados às já referidas bolsas de ar seco) e pela carga induzida pela própria precipitação sob a forma de granizo; um bom exemplo pode ser observado nas imagens das figuras 31 e 32.

Conclusões mais específicas são difíceis de formular, uma vez que a circulação foi pouco intensa e essencialmente determinada por uma combinação entre fluxos à escala da convecção e fluxos à escala sinóptica, em especial após as 13:30 UTC.

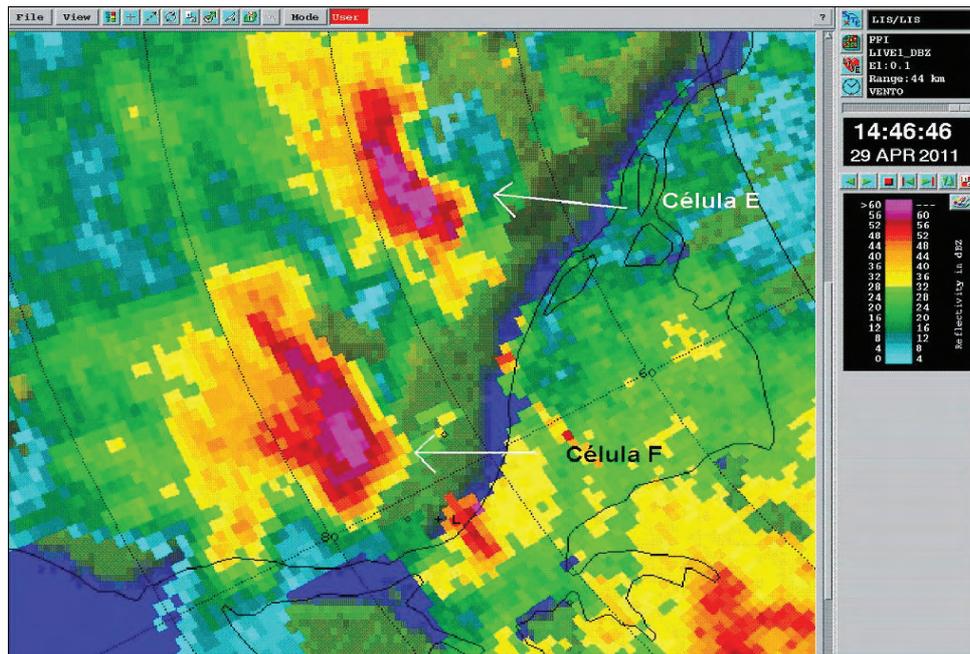


Figura 31 – PPZ (dBZ) gerado pelo radar de C/CL, 14:46 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicadas as células E e F, num plano situado a cerca de 600 m de altitude.

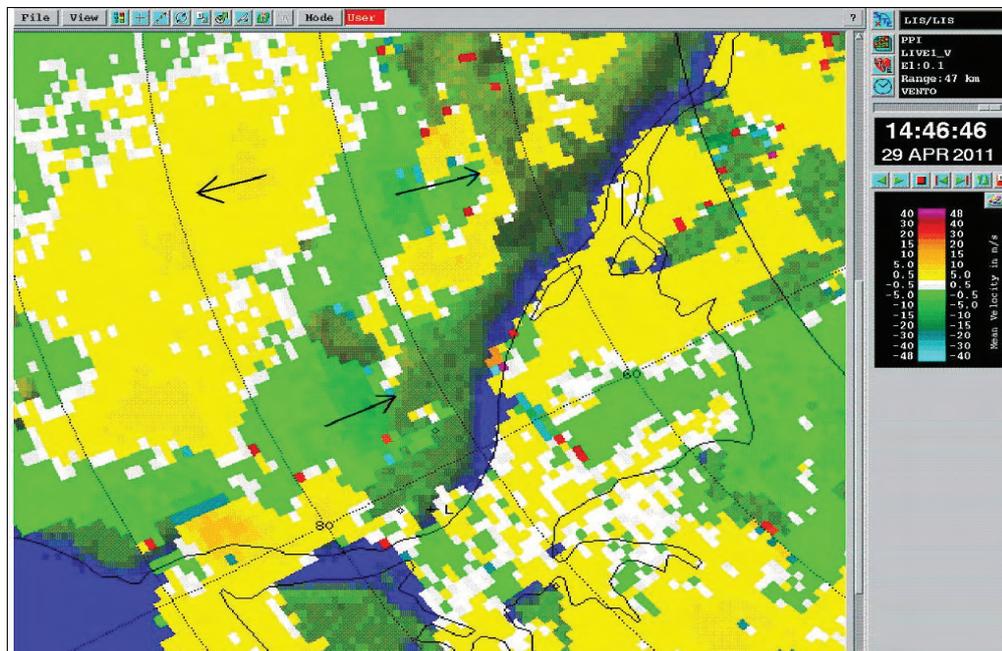


Figura 32 – PPV (m/s) gerado pelo radar de C/CL, 14:46 UTC de 29 de Abril de 2011. Indicadas as assinaturas de escoamento divergente, junto à base das células E e F, num plano situado a cerca de 600 m de altitude.



### 4.3 Observações de satélite

Dos diversos produtos disponíveis, a avaliação centrou-se nos de maior utilidade, tendo em conta a circunstância de existir bastante nebulosidade na área e período de interesse. Deste modo, foram analisadas imagens dos produtos CRR (SAF *Nowcasting*) e ASSI (SAF *Nowcasting*). O primeiro, corresponde a uma estimativa da intensidade de precipitação convectiva (mm/h); o segundo, à identificação automática de modelos conceptuais, recorrendo às bandas do Meteosat-9.

As observações baseadas no produto CRR permitem concluir que na região e período de interesse, máximos relativos na estimativa da intensidade de precipitação convectiva, são observados, como seria de esperar. Os pixels localizados sobre a região onde a queda de granizo foi mais intensa, evidenciam valores máximos daquela estimativa.

Quanto ao produto ASSI, verifica-se a identificação de uma estrutura que designa por MCS, exactamente sobre a região de interesse. Face aos critérios estritamente baseados em radar meteorológico, o sistema não foi considerado como tal, o que não significa que essa designação não possa ser encontrada com base em critérios baseados em observação de sensores instalados a bordo de satélite.

As observações com satélite a que foi possível recorrer mostram, deste modo, concordância com as observações efectuadas com radar.

### 4.4 Observações de descargas eléctricas

Durante o período 13-16 UTC, no qual foi observada a geração de sucessivas células convectivas que se organizaram num sistema multicelular, foi consultada a rede de observação de DEA, não tendo sido

observada actividade eléctrica digna de registo, quer do tipo nuvem-solo, quer do tipo intra-nuvem, associada a este sistema multicelular.

Na literatura, têm sido descritos casos em que determinados tipos de sistema convectivo não apresentam uma actividade eléctrica intensa quanto a descargas de tipo nuvem-solo, ainda que sejam prolíficos produtores de granizo. No entanto, em geral, apresentam alguma actividade intra-nuvem. Na presente situação a rede nacional, como se mencionou, não detectou qualquer



actividade associada a DEA de qualquer dos tipos, na área em que o fenómeno ocorreu. Este facto, deverá merecer investigação futura que excede, claramente, o domínio de um relatório de diagnóstico.

### 5. Queda de granizo

O sistema de radar de C/CL, com base no qual as observações foram efectuadas, é um sistema de polarização simples, pelo que não permitiu extrair conclusões inequívocas – baseadas em características físicas específicas dos retrodifusores observados - quanto às áreas onde tenha caído granizo, em níveis baixos.

Para ultrapassar esta dificuldade natural, foi adoptado um método convencional proposto por Mason (1971), que sugere a utilização do limiar de reflectividade de 55 dBZ, em níveis baixos, para distinguir chuva e granizo. Este método, que se reafirma não permitir uma distinção exacta entre chuva forte e granizo, foi adoptado por uma questão de necessidade. Não obstante esta dificuldade intrínseca, é de esperar que a distinção qualitativa que ele permite, conceda alguma competência à discussão.

Recorrendo ao produto PCZ, em plano a 900m de altitude, foi possível identificar, para a região de interesse, a sequência de observações em que áreas afectadas por reflectividade de valor igual ou superior ao limiar referido, foram detectadas. Estiveram nestas condições todas as observações compreendidas entre as 14:10 e as 15:10 UTC. Neste período foram identificadas áreas nas condições impostas, admitindo-se que regiões vizinhas a cada área tenham igualmente sido atingidas pela queda de granizo. De facto, atendendo ao processamento inerente à obtenção das imagens e ao carácter discreto das observações radar efectuadas (periodicidade de 10 minutos), estima-se que o fenómeno possa igualmente ter ocorrido numa extensão aproximada de 1 km em torno de cada área identificada, o mesmo podendo ter acontecido em áreas intermédias, entre imagens sucessivas.

Noutras áreas da Grande Lisboa a queda de granizo foi, também, observada; no entanto, pelo facto de nessas áreas a dimensão e/ou concentração do granizo ter sido relativamente baixa, a sua identificação seria mais dúbia e, por esse motivo, optou-se por não as assinalar neste relatório.

Na figura 33 é visível o conjunto das áreas afectadas, referenciadas em função da hora da ocorrência. É de salientar que antes e após este período de tempo, foi registada precipitação intensa, mas sob a forma de chuva, que também veio a contribuir para diversos problemas sentidos pela população em geral.

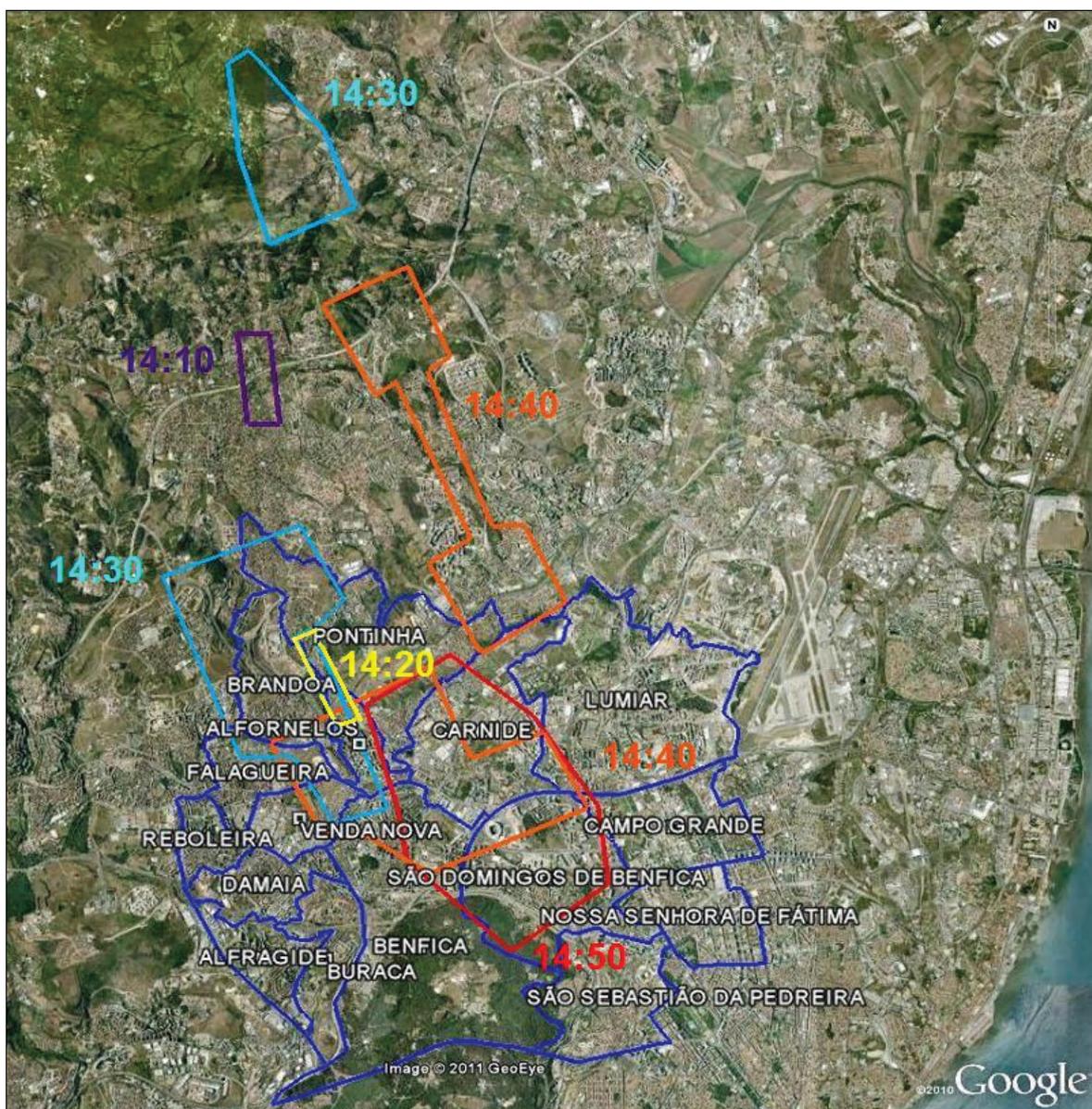


Figura 33 – Imagem Google Earth da região de Lisboa e arredores N. Áreas afectadas pela queda de granizo, estão delimitadas à cor da marcação do instante em que o mesmo ocorreu. Algumas das freguesias afectadas são delimitadas a azul, para referência.

Este episódio de intensa queda de granizo foi acompanhado por uma descida acentuada da temperatura do ar. Quando se verifica a precipitação deste tipo de hidrometeoro, em especial



se se formar uma coluna de ar descendente contendo pedras de granizo com concentração e/ou tamanho suficientemente grandes (*hail shaft*, do inglês), ocorre um significativo efeito de arrastamento de ar da própria nuvem, proveniente de níveis elevados e onde a temperatura é extremamente baixa, para níveis inferiores. O ar é, literalmente, arrastado pelo granizo em queda, o que também altera o nível da isotérmica zero na própria massa nebulosa, relativamente às suas vizinhanças. Por outro lado, um efeito de arrefecimento evaporativo resultante da mistura (*entrainment*, do inglês) entre ar da nuvem e ar não saturado, em níveis médios e altos, pode também contribuir para que o ar que chega à superfície, seja suficiente para baixar sensivelmente a temperatura do ar. Normalmente, este efeito é de, apenas, alguns graus em relativamente pouco tempo. No presente episódio, no entanto, a variação registada em estações como Amadora, Cacém e Lisboa/Benfica, foi muito mais significativa do que o habitual, tendo as descidas sido de, respectivamente, 12,1 °C entre as 13:50 e as 15:10 UTC, 4,7 °C entre as 13:50 e as 15:40 UTC e de 17,8 °C entre as 14 e as 15:10 UTC. A descida mais acentuada, observada na estação de Benfica, correspondeu à área onde a queda de granizo foi mais significativa. Esta variação apresenta-se na figura 34, a título exemplificativo.

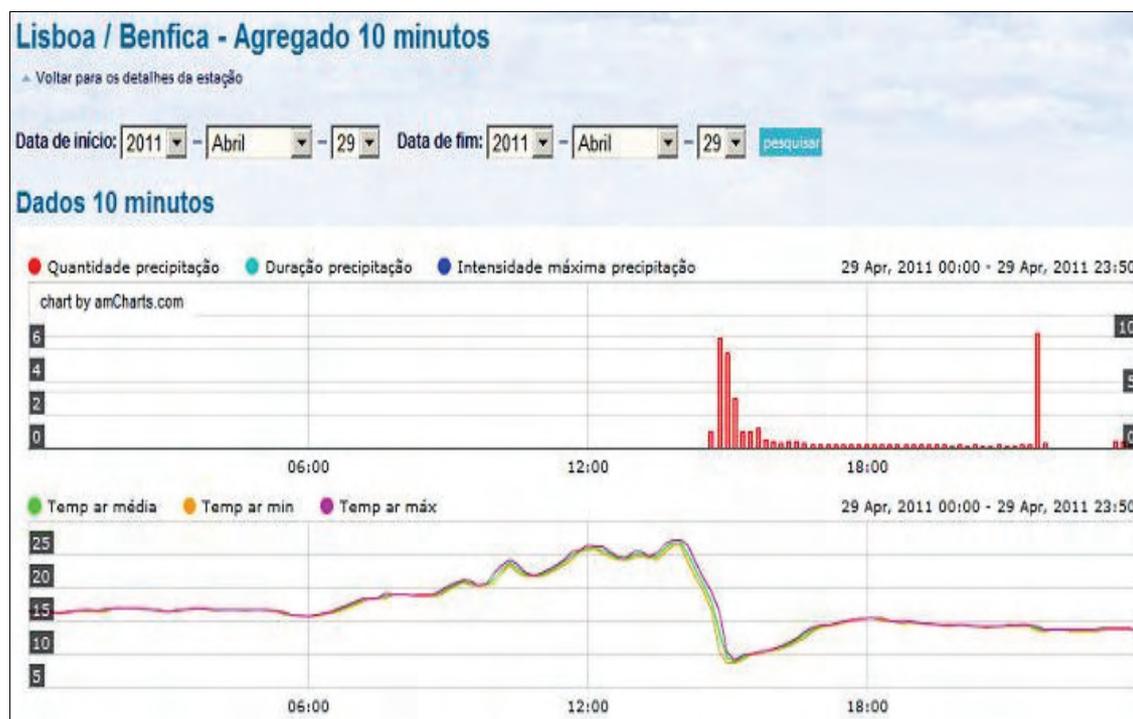


Figura 34 – Variação temporal da precipitação e temperatura do ar, observadas com periodicidade de 10 minutos, durante o dia 29 de Abril de 2011, na estação Lisboa/Benfica. Notória a brusca e intensa descida da temperatura do ar, acompanhando a precipitação sob a forma de granizo.



Confrontando o período durante o qual as observações de radar identificaram a queda de granizo sobre Benfica, com a variação da temperatura do ar na respectiva estação, é sintomático verificar que a descida de temperatura que ocorreu entre as 14 e as 15:10 UTC, se acentuou claramente após as 14:40 UTC (ver figura 34), à hora aproximada a que a queda de granizo se iniciou no local.

Finalmente, refira-se que em situações de queda de granizo, como a presente, duas questões importantes se colocam à observação de superfície. Um deles, consiste no tempo que as pedras demoram a derreter, com consequências para algum desfasamento temporal admissível na observação da precipitação. Outro, evidente no presente caso, corresponde ao facto de ser admissível que parte das pedras não fiquem concentradas na boca do udómetro, pela intensa queda de granizo. Este facto leva a uma subestima nos valores de precipitação acumulada e justificaram, por si só, a não apresentação dos valores acumulados quantitativos na estação de Benfica, embora se apresentem as barras no gráfico (ver figura 34).

## 6. Modelos conceptuais propostos

Este estudo referiu-se a um episódio em que foi diagnosticada a formação e actividade de um sistema convectivo multicelular, ao qual esteve associada uma forte tempestade de granizo, que afectou o NO da cidade de Lisboa e algumas áreas vizinhas a N. Foi discutida a coexistência de diversos aspectos considerados relevantes para o diagnóstico, quer por estrita evidência observacional (clássica e remota) quer por evidência sustentada pela consistência entre campos previstos pelo modelo numérico AROME, observações e formulação teóricamente aceite.

É útil, quando possível, fazer acompanhar alguns dos diagnósticos relativos a fenómenos de tempo severo, de modelos conceptuais. Trata-se, como se sabe, de modelos que procuram descrever, de forma sintética e abarcando diferentes escalas espaço-temporais, as características essenciais de um fenómeno meteorológico, identificando os principais processos que nele ocorrem e a sua interrelação. O autor procurou, assim, situar e integrar cada um dos aspectos discutidos num modelo conceptual, ainda que rudimentar, no sentido de procurar adquirir alguma base comparativa, para casos futuros e, na melhor das hipóteses, alguma capacidade predictiva para este tipo particular de fenómeno. Na verdade, trata-se de



dois modelos: um, relativo ao ciclo de vida de uma célula convectiva e outro, relativo à propagação do sistema convectivo multicelular (situação de 29 de Abril de 2011).

Estes modelos assumem as seguintes condições:

- (i) troposfera instável ( $LI \approx -6 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- (ii) CAPE elevada ( $\approx 2000 \text{ Jkg}^{-1}$ );
- (iii) inexistência de inibição para a convecção;
- (iv) água precipitável  $\approx 25 \text{ mm}$ ;
- (v) nível da isotérmica zero em torno de 2000 m ou ligeiramente acima;
- (vi) nível de equilíbrio  $\approx 11000 \text{ m}$ ;
- (vii) circulação fraca a todos os níveis, predominando de E acima dos 850 hPa, inclusivé, durante um período de algumas horas (10-16 UTC); *wind shear* vertical reduzido;
- (viii) presença de uma linha de convergência fraca, mas persistente por algumas horas (13-15 UTC), entre a superfície e os 925 hPa, inclusivé; a linha tem uma orientação meridional, ou seja, aproximadamente perpendicular ao escoamento médio aos 500 hPa; observa-se um movimento lento para E, durante o referido período;
- (ix) presença de ar seco (humidade relativa  $< 70 \%$ ) a todos os níveis, mas em especial acima dos 700 hPa, e apenas a E e S das vizinhanças da linha de descontinuidade;
- (x) convecção organiza-se sobre e para O da linha de convergência;
- (xi) ligeira inclinação das *updrafts* no sentido O/NO, isto é, para jusante do escoamento médio aos 500 hPa;

As representações dos modelos, em diagramas esquemáticos, apresentam-se nas figuras 35 e 36, sustentadas pelas respectivas descrições.

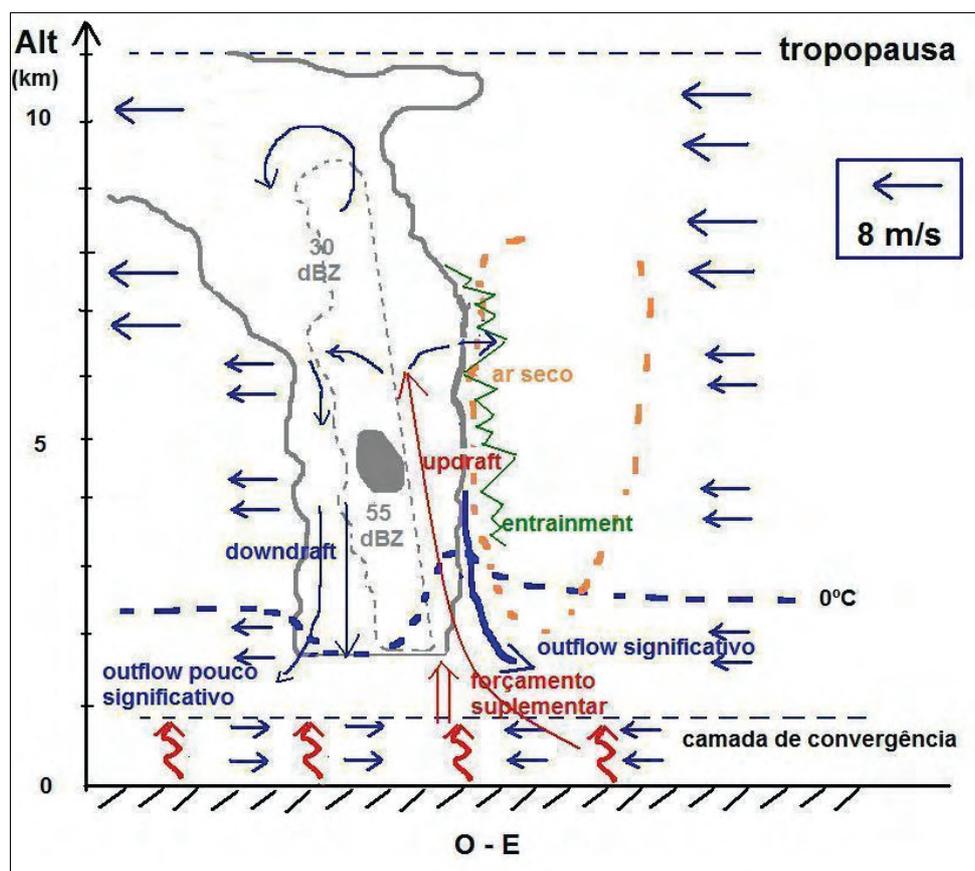


Figura 35 – Modelo conceptual do ciclo de vida de uma célula convectiva integrada no sistema multicelular associado à intensa queda de granizo de 29 de Abril de 2011 (corte O-E). Numa troposfera com CAPE elevada e instabilidade libertada logo a partir da superfície (setas verticais na camada de convergência), com circulação fraca a todos os níveis, de E, a presença de uma camada de convergência fraca (até 700 m de altitude), mas persistente, pode actuar como elemento forçador suplementar da convecção organizada. A massa de água ascende rapidamente a partir desta linha de convergência com orientação meridional, e o *core* de granizo (a cinzento, 5000 m de altitude) reflecte a pujança da convecção; na região E da massa nebulosa, ar seco presente a vários níveis, em altitude, mistura-se com matéria condensada da nuvem, num processo (referenciado por *entrainment*) favorecido pela incidência do escoamento sinóptico (de E); assim, é nesta zona que é preferencial a geração de movimentos descendentes organizados que se constituem, a E e S da célula, como *outflows* convectivos intensos, o que não ocorre para O, com tanta evidência. A inclinação da *updraft*, ao deslocalizar *updraft* e *downdraft*, favorece a longevidade da célula e, portanto, o tempo de recirculação do granizo no seu interior e o seu crescimento.

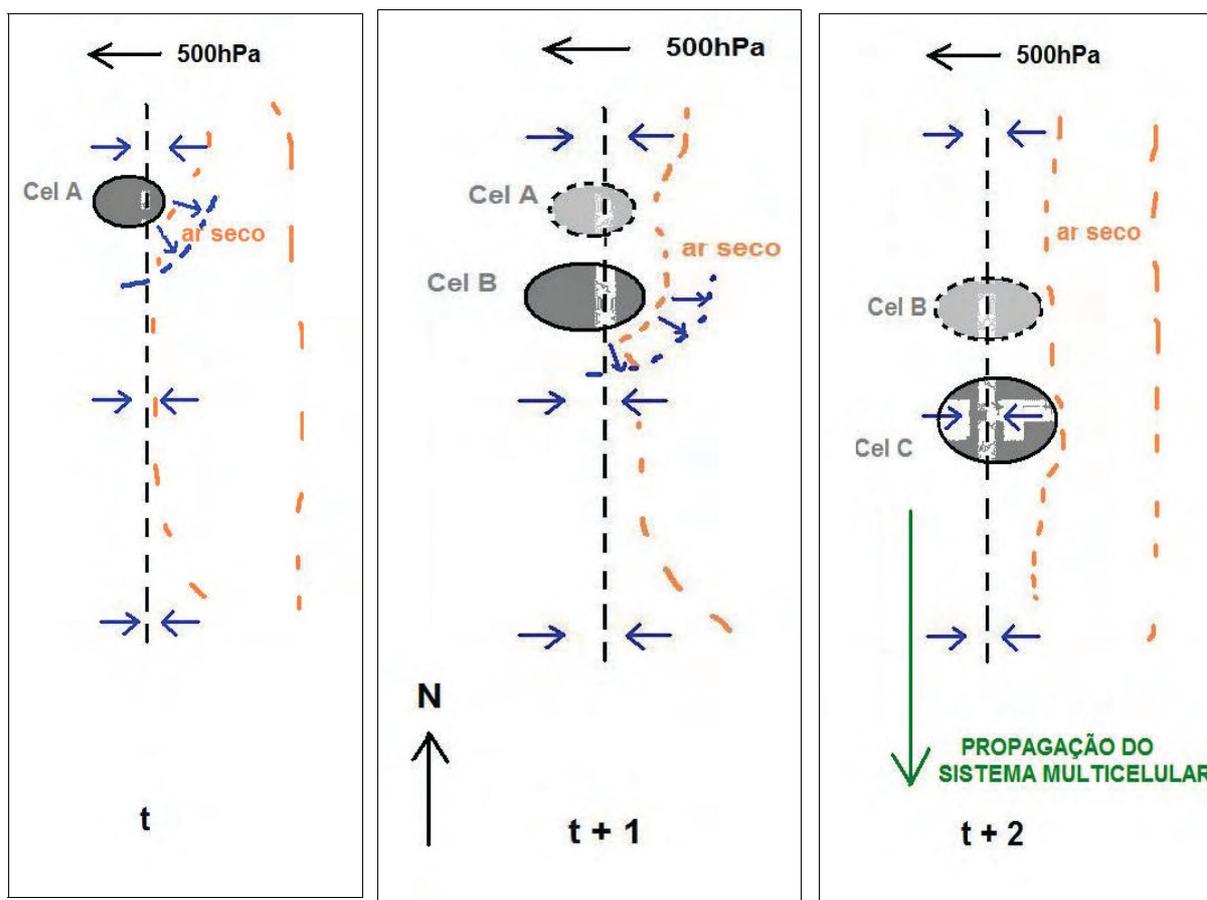


Figura 36 – Modelo conceptual da propagação do sistema convectivo multicelular associado à intensa queda de granizo de 29 de Abril de 2011 (sequência temporal de projecção horizontal). Linha de convergência fraca e pouco extensa na vertical (700 m), com orientação meridional, mas persistente no tempo ( $t$  representa 1 hora), é perpendicular ao escoamento médio aos 500 hPa (e geral), de E. A célula A gera um outflow convectivo com maior expressão para E e S (devido à distribuição do ar seco e à convergência com o escoamento sinóptico, de E). Este escoamento interage com a linha de convergência, favorecendo novo processo convectivo no sector E/SE da célula A, que se traduz na formação da célula B. O processo repete-se e forma-se uma nova célula C. Embora cada célula advecete pouco, porque o escoamento que dirige o seu movimento é fraco, a sucessiva formação de elementos convectivos para E/SE, conduz à propagação do sistema multicelular no sentido quase oposto ao do escoamento médio em níveis altos (estes diagramas constituem simplificações; na realidade, o escoamento geral foi de E/SE e a propagação foi observada para S/SE).



### 7. Conclusões

Na tarde do dia 29 de Abril de 2011, uma intensa tempestade de granizo afectou áreas do NO da cidade de Lisboa e localidades vizinhas. Para além da intensa queda de granizo, foi observada chuva forte e, a acompanhar estes fenómenos, teve lugar uma brusca e acentuada descida dos valores da temperatura do ar.

Este estudo de diagnóstico concluiu que numa troposfera caracterizada por condições de grande instabilidade, instaladas a partir da própria superfície e com um escoamento muito fraco predominante de E a todos os níveis, a presença de uma linha de convergência fraca, de orientação aproximadamente meridional e com pouca extensão vertical, mas persistente por algumas horas, terá sido determinante para a formação de um sistema convectivo multicelular, numa região compreendida entre Lisboa e Torres Vedras.

Esta linha, forçada pela circulação associada a um pequeno núcleo depressionário sobre a região e, eventualmente, reforçada pela topografia, apresentou um movimento, lento, para E, durante algumas horas, em oposição ao escoamento médio observado em níveis médios e elevados. A presença de colunas de ar seco a E e S da linha de convergência, favoreceu claramente esse sector, na formação de *outflows* convectivos. Estes escoamentos secundários, em interacção com a linha de convergência estabelecida, terão organizado o estabelecimento preferencial de zonas para nova convecção, nas vizinhanças da referida linha. Este comportamento, sucessivo, determinou uma quase retropropagação do sistema multicelular, como um todo.

A natureza da propagação e a ligeira inclinação das *updrafts* para O/NO contribuíram para a anómala queda de granizo verificada. Se, por um lado, uma propagação de tipo retrogradante, com sucessivas células a interagir entre si e a formarem-se sucessivamente nas vizinhanças das que as antecederam, leva a que a precipitação possa afectar áreas muito limitadas, aumentando o volume de precipitação observado em cada uma, por outro, a inclinação das *updrafts* no sentido oposto ao da alimentação das células, constituiu um factor favorável à longevidade destas e, em última análise, ao diâmetro razoável, por vezes superior a 1 cm, das pedras observadas.

O modelo AROME (ou qualquer outro de que o autor tenha tido conhecimento) subestimou claramente os valores da precipitação observada, por razões que não são do âmbito do



presente estudo discutir. No entanto, o padrão espacial foi bastante aproximado, facto que é de assinalar. Este modelo ofereceu, como é patente neste estudo, uma grande contribuição para a discussão desenvolvida, tendo revelado, uma vez mais, o seu excelente potencial enquanto ferramenta de diagnóstico, designadamente quando se trate de fenómenos dirigidos por escalas reduzidas.

Em última análise, o autor quer ressaltar a importância do papel desempenhado pela presença de linhas de convergência, na camada limite, quer no desenvolvimento, quer na organização dos processos convectivos, uma vez presentes os demais ingredientes essenciais ao seu estabelecimento. A identificação destas linhas de convergência utilizando, designadamente, imagens de reflectividade radar, revela-se, assim, de extrema importância em *Nowcasting*, embora se reconheça que essa identificação nem sempre é possível com recurso a observações radar, como foi o presente caso.



## 8. Bibliografia e Referências

Brown, R.A., and K. L. Torgerson, 2003: Interpretation of Single-Doppler radar signatures in a V-shaped hailstorm: Part I – Evolution of reflectivity based features. *National Weather Digest*, vol 27, 1-14.

Brown, R.A., and K. L. Torgerson, 2005: Interpretation of Single-Doppler radar signatures in a V-shaped hailstorm: Part II – Evolution of updraft interactions with ambient mid-altitude flow. *National Weather Digest*, vol 29, 65-80.

Brown, R.A., C. A Kaufman, and D. R MacGorman, 2002: Cloud-to-ground lightning associated with the evolution of a multi cell storm. *J. Geophys. Res.*, 107(D19), 4397, doi: 10.1029/2001JD000968.

Browning et al., 1976: Structure of an evolving hailstorm, part V: Synthesis and Implications for hail growth and hail suppression. *Monthly Weather Review*, vol 104 603-610.

Byers, H. R, and R R Braham, Jr., 1948: Thunderstorm structure and circulation. *J. Meteor.*, 5, 71-86.

Houze, R. A. Jr., 1993, *Cloud dynamics*, Academic Press, San Diego, 573pp

Mason, B. J., 1971: *The Physics of Clouds*, Clarendon Press, Oxford UK.

Stalker, J. R., and K. R. Knupp, 2003: Cell Merger Potential in Multicell Thunderstorms of Weakly Sheared Environments: Cell Separation Distance versus Planetary Boundary Layer Depth. *Monthly Weather Review*, vol 131, 1678-1695.