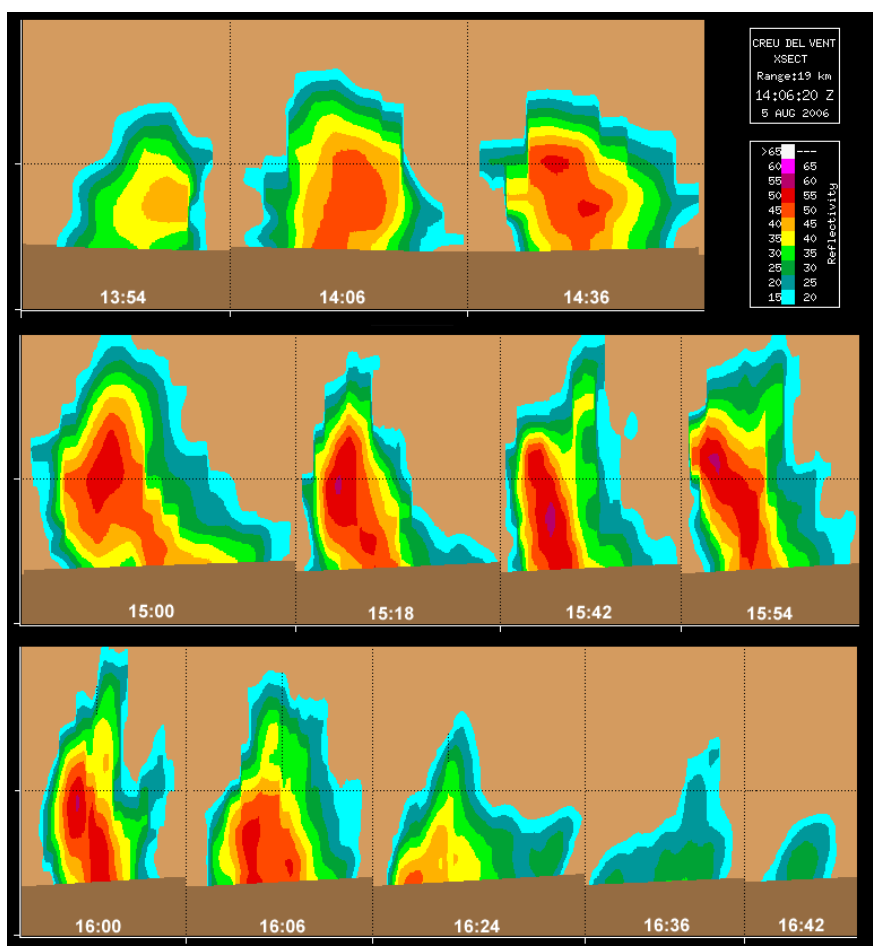




Servei Meteorològic  
de Catalunya

**Notes d'Estudi del Servei Meteorològic de Catalunya, núm. 72**

*Estudi i modelització del  
cicle de vida de les tempestes  
amb tècniques de teledetecció*



**Tomeu Rigo, Nicolau Pineda i Joan Bech**  
**Equip de Teledetecció, Àrea de Predicció, Servei Meteorològic de Catalunya**

**Rigo, Tomeu**

Estudi i modelització del cicle de vida de les tempestes amb tècniques de teledetecció. – (Notes d'estudi del Servei Meteorològic de Catalunya ; 72)

Bibliografia

ISBN 9788439378297

I. Pineda, Nicolau II. Bech, Joan III. Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge IV. Servei Meteorològic de Catalunya V.

Col·lecció: Notes d'estudi del Servei Meteorològic de Catalunya ; 72

1. Tempestes – Teledetecció 2. Tempestes – Models matemàtics

551.577:621.398



Generalitat de Catalunya  
**Departament de Medi Ambient  
i Habitatge**

Servei Meteorològic de Catalunya

Primera edició: octubre 2008

Tiratge: 500

Impressió: VALANT 2003

Autor del text: Tomeu Rigo, Nicolau Pineda i Joan Bech

Equip de Teledetecció

Servei Meteorològic de Catalunya

Dipòsit legal: B-xxxxx-2008

## ÍNDIX

<b>Objectius del treball .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Introducció .....</b>	<b>5</b>
1.1. Les tempestes i les seves característiques .....	5
1.2. El cicle de vida d'una tempesta .....	6
1.3. Classificació de les tempestes.....	9
1.4. Integració de dades de sistemes de teledetecció: radar, satèl·lit i detectors de descàrregues elèctriques .....	12
1.5. El <i>nowcasting</i> o predicció a molt curt termini.....	14
1.6. Un mètode orientat a objectes.....	15
<b>2. Dades emprades.....</b>	<b>16</b>
2.1. Observacions de la xarxa de radars .....	16
2.2. Observacions de la Xarxa de Detecció de Descàrregues Elèctriques .....	19
2.3. Període i zona d'estudi .....	21
2.4. Dades complementàries.....	22
<b>3. Metodologia .....</b>	<b>23</b>
3.1. Identificació de tempestes amb radar.....	23
3.2. Identificació de tempestes des del punt de vista dels llamps .....	24
3.3. Integració de la informació de radar i de llamps sobre les tempestes.....	25
<b>4. Resultats .....</b>	<b>27</b>
4.1. Anàlisi del cicle de vida de les tempestes .....	27
4.2. Identificació de fases en el cicle de vida.....	28
4.3. Distribució de tempestes .....	29
4.4. Fases de la tempesta .....	31
4.5. Intensitat de la tempesta.....	34
4.6. Tempestes amb desenvolupament únic i de múltiple desenvolupament .....	39
4.7. Anàlisi de patrons generals de cicle de vida.....	42
<b>5. Valoracions i treball futur .....</b>	<b>47</b>
5.1. Valoracions generals .....	47
5.2. Treball futur.....	51
<b>6. Bibliografia.....</b>	<b>52</b>
<b>7. Glossari .....</b>	<b>56</b>

## Objectius del treball

Aquest estudi presenta un mètode de seguiment de tempestes i anàlisi del seu cicle de vida, desenvolupat per l'equip de teledetecció del Servei Meteorològic de Catalunya. El mètode combina dades radar i de llamps, considera les tempestes com a objectes i integra aquesta informació en una única estructura per tal de fer de manera més correcta la identificació, el seguiment en el temps i la predicció a molt curt termini (*nowcasting*).

El mètode orientat a objectes que s'ha desenvolupat inclou les característiques pròpies (àrea, posició i evolució) i les característiques dels objectes radar i de llamps associades (per exemple, el nombre total de descàrregues elèctriques, el nombre de llamps núvol a núvol —NN— i de núvol a terra —NT—, la reflectivitat radar màxima o el percentatge de precipitació convectiva, entre d'altres). Aquesta tècnica s'ha implementat en un nivell inicial, en què s'identifica en temps real estructures de precipitació amb activitat elèctrica o sense.

Per tal de validar el mètode desenvolupat, s'han analitzat diverses estructures observades durant el període entre l'1 de juliol i el 15 de setembre de 2006. L'objectiu d'aquest estudi és modelitzar aquestes estructures per tal d'integrar-les en el futur en els algorismes de *nowcasting*.

L'estudi està dividit en les seccions següents. Primer, es fa una introducció a les tempestes i les seves característiques. Després es presenten les dades emprades en l'estudi i el mètode desenvolupat. A continuació, en els resultats s'analitzen els estadístics obtinguts i es classifiquen les diferents estructures identificades. Finalment, es presenten les conclusions i el treball futur.

# 1. Introducció

## 1.1. Les tempestes i les seves característiques

Un dels fenòmens meteorològics que provoquen més danys a la Mediterrània occidental i, específicament, a Catalunya és el de les inundacions sobtades (de l'anglès *flash-floods*), les quals es donen especialment a finals d'estiu i principis de tardor (Llasat, 2001, Pineda *et al.*, 2007). Aquests episodis de pluges intenses, en què predominen processos de precipitació de tipus fred, són generalment localitzats i de curta durada i poden estar acompanyats d'un gran nombre de descàrregues elèctriques i de fenòmens de temps sever, com ara pedra o ratxes de vent fortes (Doswell *et al.*, 1996, Pascual, 1999). En general, els valors de precipitació acumulats totals no solen ser tan elevats com en episodis de pluja de tipus càlid que també es donen a la nostra zona. No obstant això, a causa d'un gran nombre de factors (com ara la complexa orografia de les zones afectades), és molt habitual que es produeixin inundacions sobtades. Aquestes poden provocar la pèrdua de vides humanes i importants danys materials.

Les prediccions dels models numèrics no són prou acurades a l'hora de determinar en quin moment i en quina regió concreta es donaran les pluges més intenses en aquests episodis d'inundacions sobtades, entre d'altres motius a causa de les baixes resolucions espacial i temporal en què solen operar. L'ús de les eines de teledetecció ha permès millorar tant la predicció a molt curt termini de l'evolució de les tempestes que produeixen aquests fenòmens com els resultats dels models numèrics, gràcies a la inserció d'aquestes dades en el procés de càlcul dels models (Keenan *et al.*, 2003, Sairouni *et al.*, 2007). Aquestes millores permeten als predictors fer avisos d'observacions de fenòmens meteorològics adversos amb alguns minuts d'anticipació a l'arribada a regions sensibles. Tanmateix, el temps que transcorre entre l'avís i el fenomen no és gaire gran i, per aquest motiu, al Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) es treballa per desenvolupar tècniques que ajudin el meteoròleg a prendre una determinació amb més antelació.

En els episodis d'inundacions sobtades predomina la precipitació de tipus fred (Martín *et al.*, 2001). La característica més important és que els sistemes que les causen poden arribar a desenvolupar-se fins a nivells alts de la troposfera, amb valors molt intensos de reflectivitat a les imatges radar en altures considerables. El fet que es donin corrents ascendents molt intensos permet assolir nivells superiors als 500 hPa (el que es coneix com a convecció profunda). En aquestes condicions, a l'interior de les tempestes les partícules precipitants poden estar en estat líquid o sòlid, quan es formen a temperatures molt baixes, a partir de minúsculs cristalls de gel i aigua en estat de subfusió.

Vist des del radar meteorològic, el més important és que es detecten reflectivitats molt intenses a altures bastant elevades. Per aquest motiu els valors d'aigua líquida a la vertical són alts i l'altura màxima en què s'observa certa reflectivitat indica que les altures assolides poden ser properes a la tropopausa. Gràcies al seu gran desenvolupament vertical, aquestes estructures poden ser identificades fins i tot a grans distàncies, encara que el

meteoròleg ha de conèixer fins a quin punt les imatges són representatives del que realment passa en superfície.

Pel que fa als llamps, generalment són molt nombrosos quan es dona precipitació de tipus fred, ja que es tenen processos molt marcats d'electrificació i apareixen descàrregues tant de núvol a núvol com de núvol a terra. En certs períodes temporals (quan el centre de les càrregues negatives se situa a una altura considerable a causa dels corrents ascendants) és possible que els llamps negatius pràcticament desapareguin, mentre que hi ha un fort increment dels positius. Per tant, una xarxa de detecció de llamps pot ser molt útil a l'hora de fer el seguiment d'aquest tipus d'estructures convectives, combinant aquesta informació amb d'altres camps procedents de radar o satèl·lit.

## 1.2. El cicle de vida d'una tempesta

Tot i que la mateixa definició de tempesta inclou que s'hi han d'observar descàrregues elèctriques durant la seva evolució, per motius històrics el seu cicle de vida sol ser caracteritzat a partir de dades radar (Doswell, 2001, 2007). La durada d'una tempesta pot anar des de poc més de 20 minuts fins a diverses hores, i durant el cicle de vida es distingeixen tres etapes:

- Inici o desenvolupament: és la fase en la qual predominen els corrents verticals ascendants, que fan que les petites partícules de gel creixin fins a tenir un pes tal que s'anul·la la força ascendent amb el propi pes.

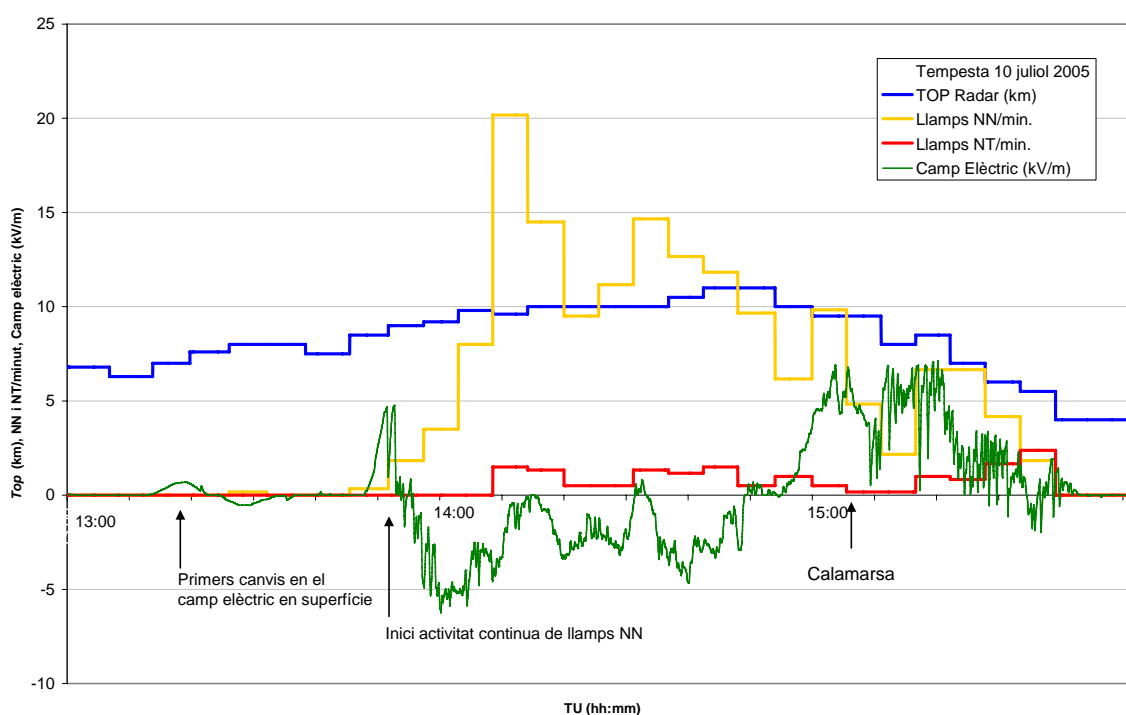
- Maduresa: s'inicia quan comença a caure la precipitació que s'ha format en la fase anterior. Les partícules de precipitació formen un nou corrent descendent, que contraresta l'ascendent. A mesura que el corrent descendent s'apropa als nivells més baixos, provoca un procés d'evaporació, el qual accelera el moviment descendent que refreda l'aire. Quan el corrent arriba a la superfície es genera una petita bossa d'aire fred i un front de ratxa, el qual serà més intens com més fort sigui el corrent descendent.

- Dissipació: etapa en la qual únicament predomina el corrent descendent (per tant, el núvol deixa d'alimentar-se) i es forma un plomall residual associat a l'enclusa, el qual pot produir precipitació de tipus estratiforme.

Des del punt de vista experimental, els avenços obtinguts en la identificació de cèl·lules convectives des dels anys 90 ha facilitat el coneixement del seu cicle de vida. Entre els aspectes analitzats hi ha la durada, les dimensions o la reflectivitat. Si bé els algorismes utilitzats són diversos, els resultats a què s'arriba en general són similars. Així, solen tenir una durada més llarga les cèl·lules que se situen dins d'estructures més complexes (que s'identifiquen fàcilment al voltant dels 30 minuts, encara que es poden arribar a superar les 2 hores) que les que tenen un caràcter individual, difícilment identificades durant més de 50 minuts, segons Martín *et al.* (2007). Per exemple, en el cas dels treballs elaborats utilitzant l'algorisme TITAN (*Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting*, Dixon i Wiener, 1993) es constata una certa relació entre la durada de les tempestes simples i el seu volum i la màxima reflectivitat (Henry, 1993). Tanmateix, els resultats obtinguts per MacKeen *et al.* (1999) amb l'algorisme SCIT (*Storm Cell Identification and Tracking algorithm*) posen en evidència que utilitzar un únic paràmetre no produeix uns resultats gaire satisfactoris. En concret, MacKeen *et al.* (1999)

van analitzar 16 paràmetres (reflectivitat màxima, VIL, volum, massa, àrea, etc.) sense obtenir per a cap d'aquests un comportament que es pugui relacionar de manera clara amb el cicle de vida. En canvi, sí que es va trobar una correlació múltiple entre la durada de l'estructura convectiva i l'evolució conjunta de tots els paràmetres esmentats.

Respecte a la modificació del camp elèctric atmosfèric i els llamps associats a les tempestes, els estudis que s'han fet per analitzar com evoluciona una tempesta en el temps (Pineda *et al.*, 2004; Montanyà *et al.*, 2007) mostren que el primer que s'observa en formar-se una tempesta són modificacions i intensificacions del camp elèctric en superfície (figura 1). Pel que fa al núvol de tempesta, quan aquest assoleix unes certes dimensions, comencen a aparèixer descàrregues elèctriques al seu interior, que d'ara en endavant anomenarem llamps núvol-núvol (NN).



**Figura 1.** Evolució de l'activitat elèctrica durant el cicle de vida d'una tempesta. Camp elèctric mesurat en superfície (kV/m). Llamps núvol-núvol i llamps núvol-terra. Altura de la precipitació de la tempesta segons el producte top radar. Adaptat de Montanyà *et al.*, 2006.

L'activitat de llamps NN, que s'intensifica a mesura que creix la tempesta, acostuma a patir un brusc augment quan el núvol de tempesta assoleix el màxim desenvolupament vertical i la tempesta entra en la fase de maduresa. És en aquesta fase en què l'activitat NN assoleix el màxim; llavors comença a decreixre, fins que s'acaba amb l'extinció de l'activitat i de la mateixa tempesta. L'activitat de llamps núvol-terra (NT) acostuma a seguir una evolució similar a la de llamps NN, malgrat que el nombre total de llamps NT és menor que els NN. A més, aquesta activitat NT està desplaçada en el temps respecte de l'activitat NN. Aquesta demora en l'aparició de l'activitat NT respecte de la NN és un dels paràmetres que s'utilitzen com a indicador de la intensitat de la tempesta, i aquesta augmenta en distanciar-se l'aparició dels llamps NT respecte dels NN. Els llamps NT també assoleixen un màxim

durant la fase de maduresa, moment a partir del qual decau la seva activitat fins a extinguir-se. Així com l'activitat NN va associada en el temps al desenvolupament del núvol, l'activitat NT conflueix en el temps amb els fenòmens en superfície, sigui pluja, calamarsa o pedra.

L'estructura elèctrica dels núvols de tempesta és complexa, i avui en dia encara és motiu d'investigació. Ja l'any 1920 es va definir una estructura convencional basada en un dipol de càrrega elèctrica, en la qual la part superior del núvol acumula càrregues positives i la inferior de negatives. Aquest model ha evolucionat a mesura que s'han anat fent mesures més acurades. Williams (1989) introdueix l'estructura tripolar, en la qual hi ha una petita regió de càrrega positiva a la base dels núvols. Mesures posteriors amb globus sonda (Stolzenburg *et al.*, 1998) han portat a models conceptuals que incorporen fins a sis estrats de càrrega elèctrica en altura que van alternant la polaritat.

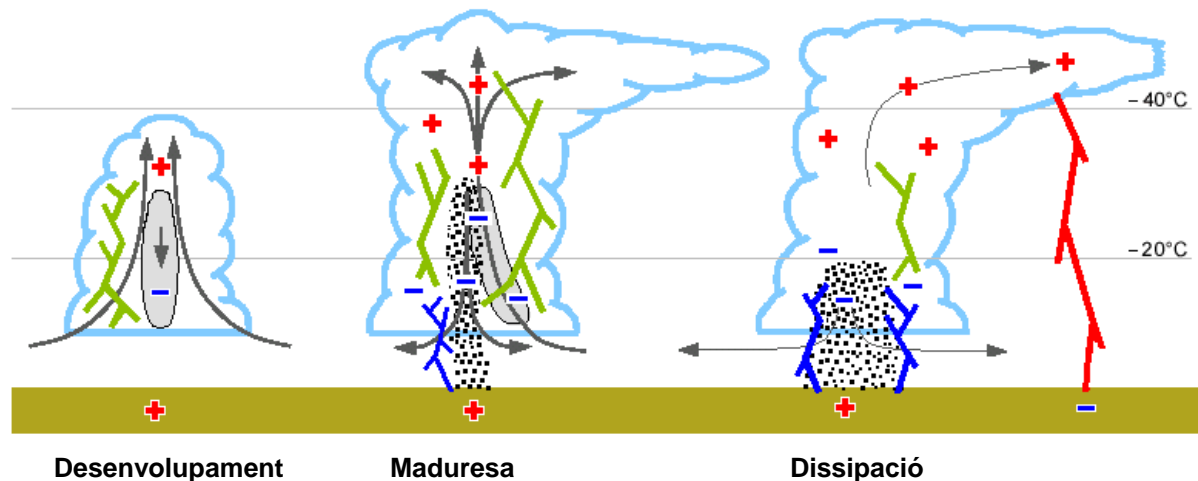
La separació de càrregues a l'interior dels núvols està relacionada amb els canvis de fase dels hidrometeors que formen el núvol. Els forts corrents ascendents associats amb la convecció transporten les partícules dels núvols fins a altures considerables. Malgrat que avui en dia no es té una explicació general de la gran quantitat de càrrega que s'acumula en els diferents dipols a l'interior del núvol, sí que s'han estudiat i descrit processos que contribueixen a aquesta transferència de càrrega (Rakov i Uman, 2003).

Des del punt de vista pràctic és interessant destacar que les altituds on hi ha els diferents centres de càrrega estan ben definides per les isoterms. Aquestes isoterms de referència varien una mica segons els estudis. Per exemple, considerant un model conceptual senzill com el definit per Dotzek *et al.* (2005), les isoterms que defineixen els centres principals de càrrega són la de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  per a les càrregues negatives i la de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  per a les càrregues positives.

Pel que respecta al cicle de vida de les tempestes, des del punt de vista de l'activitat elèctrica es divideix en les fases següents (figura 2):

- Desenvolupament: inici dels mecanismes d'electrificació (separació de càrregues) durant la convecció i desenvolupament vertical del núvol. Generació d'un dipol intern i inici de les descàrregues NN.
- Maduresa: s'inicia amb l'assoliment del màxim desenvolupament vertical del núvol de tempesta. En aquesta fase s'inicien les descàrregues NT. Durant la maduresa, la fase més llarga de les tres, s'arriba al màxim de les descàrregues NN i també el màxim de les descàrregues NT. Ara bé, aquests dos màxims no són coincidents en el temps; primer s'arriba al màxim de NN i després el de NT.
- Dissipació: disminució progressiva de l'activitat NN i NT fins a l'acabament.





**Figura 2.** Representació esquemàtica de les tres fases d'activitat elèctrica en les tempestes. A la figura també s'hi representen les isoterms que defineixen els centres principals de càrrega, juntament amb els signes positius i negatius que indiquen les zones on s'acumulen les càrregues d'un mateix signe. Els llamps es representen en tres colors diferents, segons si són NN (verd), NT negatius (blau), NT positius (vermells). Figura adaptada dels mòduls COMET (UCAR).

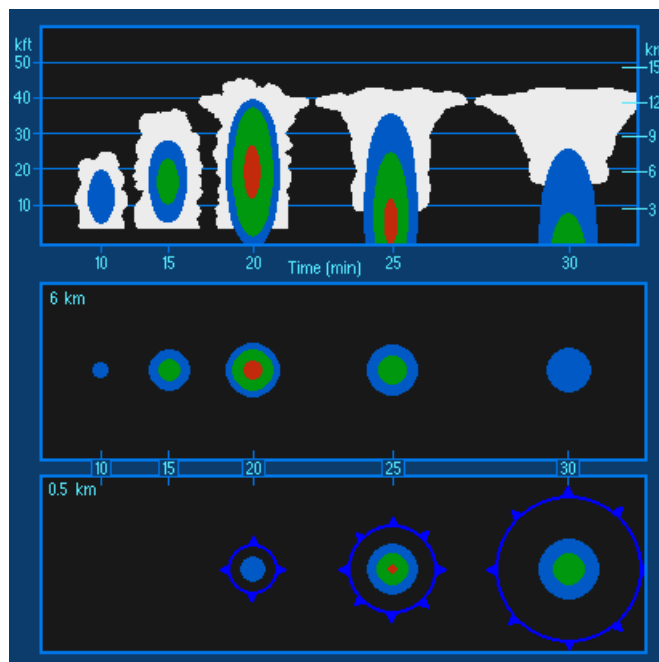
### 1.3. Classificació de les tempestes

Clàssicament, les tempestes vistes pel radar es divideixen en les categories següents, segons l'organització i la dinàmica interna:

Cèl·lules simples. Es tracta d'un únic corrent ascendent, que produeix aigua líquida i gel, especialment en absència de cisalla vertical del vent (Martín *et al.*, 2001). A partir de les imatges radar es pot apreciar el cicle de vida (figura 3): els primers ecos que es detecten són observats pocs minuts després de l'inici de la formació del núvol, normalment, a certes altures (Chisholm i Renick, 1972). Com més alt es detecten els primers ecos més intensos serà el corrent ascendent i, per tant, més intensa serà la convecció. Com més feble sigui la cisalla vertical més concèntrics seran els ecos situats sobre la vertical. Els màxims s'aniran traslladant cap als nivells inferiors a mesura que es va generant la precipitació, i decreixeran en intensitat ràpidament.

Tempestes multicel·lulars. Són un conjunt de cèl·lules que tenen fluxos sortints combinats de tal manera que formen un front en ratxa de més entitat que el de qualsevol cèl·lula individual. Les cèl·lules no solen estar en la mateixa fase dins del seu cicle de vida (tot i que és possible), ja que la convergència en la part davantera del front pot disparar nous corrents ascendents, és a dir, el desenvolupament de noves cèl·lules (Collier, 1989; Weisman i Klemp, 1986). En general es produeixen en entorns amb cisalla de vent moderada i energia de flotabilitat positiva (Martín *et al.*, 2001). Un dels aspectes més interessants és la notable organització que algunes de les tempestes poden adquirir, i apareix un flanc com a preferit per formar les noves cèl·lules. Per a l'observació radar, resulta interessant la detecció d'una zona arquejada o en forma de balcó, que és causada per la formació d'una nova cèl·lula (coneguda com a "cèl·lula filla"), propera a la "cèl·lula mare" (la que en un moment concret és la que està en l'estat de maduresa). Just per sota

d'aquesta regió de valors alts de reflectivitat apareix la zona d'ecos febles, que també té una gran importància a l'hora de facilitar la classificació d'aquestes tempestes.



**Figura 3.** Cicle de vida d'una tempesta simple vista pel radar. Talls verticals (a dalt), talls horitzontals a una altura de 6 km (centre) i superfície (a baix), amb el front de ratxa associat. Procedent del mòdul de COMET "Anticipating Convective Storm Structure and Evolution", UCAR.

Tempestes supercel·lulars. Són una única parella de corrents (ascendent i descendent), amb un moviment quasi estacionari i una clara rotació (Doswell *et al.*, 1996; Martín *et al.*, 2001). El cicle de vida de les supercèl·lules és de diverses hores. El fet que tinguin un moviment en rotació resulta significatiu per identificar-los mitjançant observacions de vent Doppler del radar. L'acceleració del corrent ascendent en aquest tipus de convecció té dos components: l'habitual en les altres formes de convecció, coneguda com a flotabilitat, i una altra de més dinàmica, a causa de la interacció amb el seu entorn, que pot tenir una contribució certament important. Les supercèl·lules solen desenvolupar-se en entorns amb una gran quantitat d'humitat en nivells baixos. En aquestes tempestes és molt possible observar fenòmens com pedra, una gran quantitat de llamps i l'aparició de tornados (que superen en molts casos el nivell F3 a l'escala de Fujita). Tanmateix, també és possible que es produeixi una gran eficiència de precipitació que causi inundacions. Des del punt de vista de la imatge de reflectivitat radar, hi ha algunes similituds entre aquest tipus de tempestes i les multicel·lulars (s'observa la zona d'ecos febles o la zona arquejada), encara que hi sol haver una intensificació més gran dels ecos durant la seva fase madura (a partir, aproximadament, de l'hora i mitja de l'inici del cicle de vida), i provoca l'aparició d'una regió d'ecos febles acotada, que té una forma de ganxo molt característica, i que coincideix amb la zona de més gradient de reflectivitat en el nivell inferior. Una segona diferència és que en aquest cas no es detecten múltiples nuclis, corresponents a les diverses cèl·lules. De totes maneres, la manera més fàcil de detectar

una supercèl·lula mitjançant el radar és a partir del mode Doppler (Burgess i Lemon, 1990; Bech *et al.*, 2007), on es pot observar una zona amb dos semicercles amb valors oposats (en una part positius i a l'altra negatius), indicativa del moviment rotatori.

Des del punt de vista dels llamps observats en una tempesta, hi ha diferents tipus de classificació, en funció del tipus de llamp (NN, NT) o de la polaritat en el cas dels NT. Es pot classificar, per exemple, a partir de la intensitat de la tempesta, que normalment s'estableix en funció dels llamps totals (NN + NT) o només NT per minut. D'altra banda es fan servir característiques elèctriques dels llamps, com per exemple la polaritat de les descàrregues dels llamps NT, per estimar possibles fenòmens de temps sever associats amb la tempesta.

Diversos estudis han investigat la relació entre l'activitat elèctrica atmosfèrica i la dinàmica de les tempestes. En la majoria de tempestes, l'activitat comença amb llamps NN, després que les partícules que ascendeixen per convecció adquireixin fase sòlida en assolir certa altura. Posteriorment, l'activitat NT es dona quan el nucli central de la cel·la convectiva comença el trajecte descendent i acaba provocant pluja o fenòmens de temps sever en superfície (Williams *et al.*, 1989; MacGorman *et al.*, 1989). En la majoria de tempestes, la ràtio de llamps totals (NN + NT) per minut no supera els 10 llamps. La ràtio de llamps NT està per sota de 2 llamps/min, i predomina la polaritat negativa en les descàrregues NT (Carey i Rutledge, 1996). En tempestes severes, la ràtio de llamps totals (NN + NT) per minut pot excedir els 30. En aquestes tempestes es poden observar períodes en què hi ha més descàrregues NT positives que negatives. També s'ha observat en tempestes associades a temps sever períodes amb alta activitat NN però alhora amb baixa activitat NT (Williams *et al.*, 1999; Lang *et al.*, 2000; Carey *et al.*, 2003a i 2003b; Wiens *et al.*, 2005, Montanyà *et al.* 2007).

Resumint, les tempestes es poden classificar segons:

- Intensitat de llamps: NN, NT o combinats.
- Relació entre llamps NN i NT. Com més elevada la ràtio NN/NT, més intensitat.
- Diferència de temps entre l'aparició dels primers NN i dels primers NT. Com més temps, més intensitat.

De manera complementària, certes relacions entre tipus de llamps poden denotar tempestes atípiques i que poden tenir associats fenòmens de temps sever:

- Observació d'anomalies positives (NT+ > NT-)
- Períodes amb una alta ràtio NN/NT

La taula 1 presenta una classificació bàsica d'intensitats. Cal tenir present, però, que els valors que denoten intensitats fortes a molt fortes només s'acostumen a observar en zones tropicals. A les nostres latituds s'acostumen a abaixar els llindars.

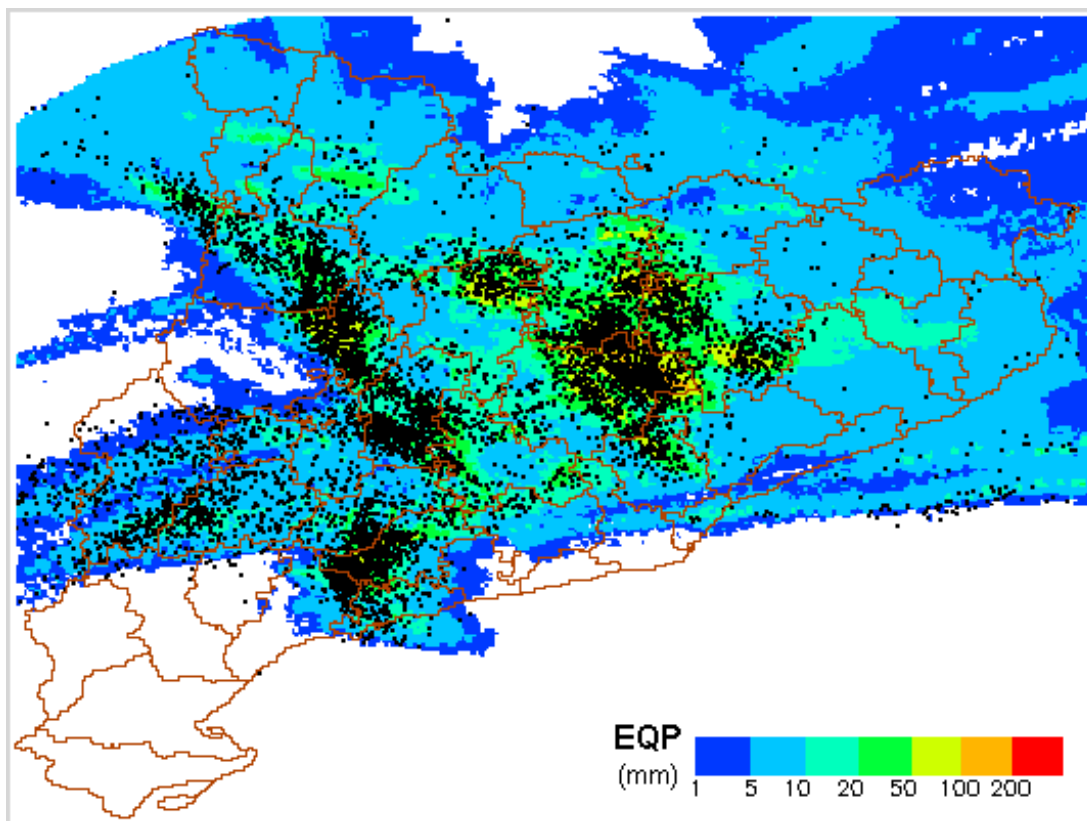
**Taula 1.** Paràmetres i llindars indicatius d'intensitat d'una tempesta (Vaisala, 2000)

<b>Intensitat</b>	<b>Feble</b>	<b>Moderada</b>	<b>Forta</b>
Llamps totals (NN + NT) / min	1	10	30-100
Ràtio NN / NT	1	10	30-100
Dif. temps 1r NN i 1r NT (min)	5	15	30-60

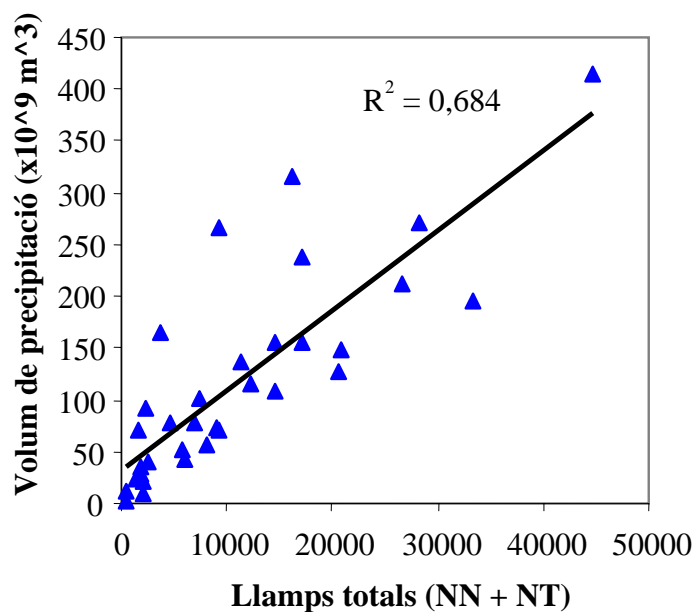
#### 1.4. Integració de dades de sistemes de teledetecció: radar, satèl·lit i detectors de descàrregues elèctriques

Tot i que hi ha eines de predicció a curt termini que encara treballen amb un únic tipus d'observació de teledetecció (tant radar com satèl·lit), cada cop és més habitual que les noves eines integrin dos o més tipus. En general, les dades de llamps i radar es combinen per identificar i caracteritzar tempestes que s'observen amb el radar a partir de l'associació dels llamps que es localitzen dintre o molt a prop de la tempesta (Wilson *et al.*, 2006; Soul *et al.*, 2002; Brovelli *et al.*, 2005; Medaglia *et al.*, 2005; Hand i Conway, 1996; Rigo *et al.*, 2005). En aquests casos, la informació dels llamps es considera com una característica afegida a altres paràmetres que permeten conèixer l'estat d'una tempesta vista pel radar (o satèl·lit) en un moment concret. Considerant l'aproximació de la programació orientada a objectes (vegeu més endavant), en aquests casos l'objecte pròpiament és l'estructura identificada pel radar o satèl·lit. Així, la predicció a molt curt termini (o *nowcasting*) es fa a partir de la informació radar o de satèl·lit, mentre que les dades de llamps (tant núvol-núvol com núvol-terra) poques vegades s'empren com a paràmetres d'entrada en aquesta predicció. Per altra banda, hi ha algunes tècniques que només consideren descàrregues elèctriques, i les agrupen com a estructures o objectes, per les quals el seguiment i el *nowcasting* es fa a partir de models lineals (Demetriades *et al.*, 2003).

Diversos estudis mostren una bona correlació entre valors elevats d'ecos radar i àrees en què es dona una elevada densitat de descàrregues elèctriques (Williams *et al.*, 1999; Soula *et al.*, 2004). Pineda *et al.* (2006) van analitzar la correlació geogràfica entre l'estimació quantitativa de pluja (EQP) a partir de reflectivitat radar (Trapero *et al.*, 2006) i els llamps NN i NT, amb dades de tempestes a Catalunya l'any 2005 (34 dies entre maig i octubre). A la figura 4 es mostren de manera conjunta l'EQP i els llamps NT d'un dels dies estudiats. La correspondència geogràfica que es pot observar entre les acumulacions de pluja més importants i els llamps es repeteix en el conjunt de dies estudiats. La relació entre el volum de precipitació i els llamps (NN + NT), sempre pel que fa a les acumulacions diàries, presenta per als casos estudiats una correlació positiva (figura 5) amb un coeficient de correlació ( $R^2$ ) de 0,68.



**Figura 4.** Exemple de llamps NT (punts negres) sobre l'estimació quantitativa de pluja (EQP) obtinguda amb la composició dels 3 radars de l'SMC per al dia 18 d'agost de 2005.



**Figura 5.** Diagrama de dispersió entre el volum de precipitació diari i el nombre de llamps totals (NN + NT) per als 34 dies d'estudi de la temporada de tempestes de 2005. La recta d'ajust lineal té un  $R^2$  de 0,68.

Tot i així, la relació entre llamps i pluja es caracteritza per una certa variabilitat, que depèn de la zona geogràfica, el tipus de tempesta, l'època de l'any i de la fase en què estigui aquesta (Rakov i Uman, 2003). Per contra, hi ha situacions en les quals aquesta relació no s'observa, com ara en tempestes seques o núvols amb una gran eficiència de precipitació i nul·la activitat elèctrica (Zipser i Lutz, 1994; Petersen *et al.*, 1996). Ara bé, aquesta variabilitat no afecta els avantatges que suposa combinar les dades de radar i llamps per millorar el coneixement del comportament de les tempestes.

### 1.5. El *nowcasting* o predicció a molt curt termini

Es considera com a *nowcasting* la predicció d'un determinat fenomen (en aquest cas meteorològic, especialment de tipus convectiu) amb detall local en un període de poques hores (Conway, 1999, i Collier, 1989). En el *nowcasting* s'apliquen diferents tipus d'algorismes matemàtics i meteorològics, com poden ser els models numèrics (de mesoescala o unidimensionals), l'extrapolació lineal, els models conceptuals, les tècniques estadístiques, els sistemes experts i de decisió o diversos d'aquests combinats.

Per fer la predicció del moviment d'una tempesta (o d'una altra característica) és habitual dur a terme anteriorment un seguiment (o *tracking*) de les estructures d'ecos de radar. Aquest es fa a partir d'una connexió o correlació entre estructures d'imatges consecutives en el temps. Una vegada s'ha pogut establir el moviment previ és possible dur a terme prediccions a molt curt termini (entre 30 minuts i 6 hores).

Una primera aproximació per predir el moviment dels ecos radar (o estructures convectives) pot fer-se a partir de possibles relacions entre el moviment de l'eco i la velocitat del vent. Aquesta informació addicional generalment millora els pronòstics del camp de reflectivitat davant les prediccions fetes per persistència (és a dir, suposant que el camp es manté estacionari). No obstant això, normalment els millors resultats s'obtenen aplicant un camp de moviment dels ecos radar deduït a partir d'una seqüència d'imatges (Martín *et al.*, 2007). Encara que de vegades resulta difícil associar a una estructura convectiva el vent a un determinat nivell, s'han obtingut alguns bons resultats per a estructures intenses associant al seu moviment el màxim de vent en nivells baixos. Un factor que pot ser molt important a l'hora de conèixer el moviment d'una estructura és saber quins tipus de processos hi predominen (Martín *et al.*, 2007): de translació, sovint dominats per l'escala sinòptica, o bé de propagació, més influïts per la mesoescala. A més, es pot intentar aplicar models conceptuals de moviments simplificats de tempesta, com ara girar un cert angle respecte al vent mitjà en algun nivell, o usar el vent mitjà on es desenvolupen els ecos o bé el vent mitjà de l'estrat entre superfície i el nivell de 6 km o bé de 500 hPa.

Un dels mètodes més habituals en el *tracking* i *nowcasting* d'estructures convectives és a partir dels centroides (o centres de massa) de les estructures. Es tracta d'un mètode que té un bon funcionament en el cas d'estructures ben aïllades, però que pot donar errades significatives quan es tracta d'estructures més complexes. Per fer la predicció del moviment futur és habitual utilitzar un ajust de mínims quadrats, a partir de les posicions dels centroides en el passat (Johnson *et al.*, 1998; Circe i Martín, 2003).

Un altre procés bastant comú és el de la correlació creuada (Collier, 1989), el qual és aplicable tant a parts concretes de la imatge com a tot el seu conjunt. Aquest mètode

considera la forma de l'estructura que està seguint i presenta menys errors a l'hora d'associar estructures d'imatges diferents. Per contra, el problema més gran és que habitualment s'aplica només a un valor de reflectivitat.

Finalment, hi ha altres mètodes més complexos, com pot ser l'ús d'anàlisi de Fourier i pics dels harmònics (Collier, 1989), la combinació d'un model amb l'experiència d'un meteoròleg (el qual ha de poder modificar la proposta feta per al model a partir del seguiment en temps real de la situació), la interacció d'algorismes que utilitzen tècniques diferents o el desenvolupament de tècniques no lineals. En tot cas, hi continua havent molts problemes a l'hora de predir el desenvolupament o la dissipació de les estructures convectives.

## 1.6. Un mètode orientat a objectes

Com ja s'ha apuntat anteriorment, en aquest estudi s'ha desenvolupat un mètode propi, basat en els mètodes orientats a objectes, els quals utilitzen "objectes" (en el nostre cas, conjunt d'ecos de reflectivitats o zones amb activitat elèctrica, els quals compleixen uns certs criteris) i les seves característiques per fer una anàlisi individualitzada de cadascun per fer un tractament de la seva evolució (tant seguiment com predicció). Està basat en diverses tècniques, incloent-hi l'herència dels moments previs, la variabilitat en la forma de l'objecte i l'acció de resumir la informació en poques variables. Un dels avantatges és que cada objecte (en aquest cas, tempesta o núvol de precipitació) es veu de manera independent i el seu tractament és individualitzat respecte a la resta.

En meteorologia, el mètode orientat a objectes en predicció (Hand, 1996) està basat en models físics conceptuals referits al cicle de vida de la tempesta. A partir de diferents tipus de dades (radar, model numèric, radiosondatges o llamps) es determina l'estat en què està el núvol segons la semblança que té amb el model teòric.

## 2. Dades emprades

### 2.1. Observacions de la xarxa de radars

El Servei Meteorològic de Catalunya disposa d'una Xarxa de Radars Meteorològics (XRAD) per proporcionar observacions de precipitació amb elevada resolució espacial i temporal. Els radars meteorològics són sistemes de teledetecció que permeten, com a principal aplicació, estimar remotament la intensitat de precipitació.

La xarxa fou dissenyada per proporcionar estimacions quantitatives de precipitació (EQP) a Catalunya, tenint present la seva complexa orografia i les implicacions que això suposa per a les observacions radar. La taula 2 mostra les coordenades dels radars de la XRAD. Cal notar que estan a una certa altitud sobre el nivell del mar per minimitzar els obstacles orogràfics que apantallen les observacions radar. En aquest treball no s'han usat les dades del radar de Tivissa - Llaberia instal·lat l'any 2008. La figura 6 indica la cobertura aproximada de la XRAD en la zona on es fan mesures tridimensionals (amb més d'una elevació).

**Taula 2.** Coordenades dels radars que integren la XRAD de l'SMC.

Nom	Codi	Indret	Longitud	Latitud	Altitud
Vallirana	PBE	Puig Bernat	1,88 °E	41,37 °N	610 m
Puig d'Arques	PDA	Puig d'Arques	2,99 °E	41,89 °N	535 m
La Panadella	CDV	Creu del Vent	1,40 °E	41,60 °N	825 m
Tivissa - Llaberia	LMI	La Miranda	0,86 °E	41,09 °N	910 m

Els radars meteorològics de la XRAD operen en banda C (5.600 a 5.650 MHz) i són de tipus Doppler. El seu transmissor està basat en tubs d'ones progressives (TWT) i tenen una potència pic d'uns 8 kW. Les antenes tenen uns 4 m de diàmetre, tret de Vallirana, que és de 3 m. Poden trobar-se més detalls tècnics de la XRAD a Bech *et al.* (2004).

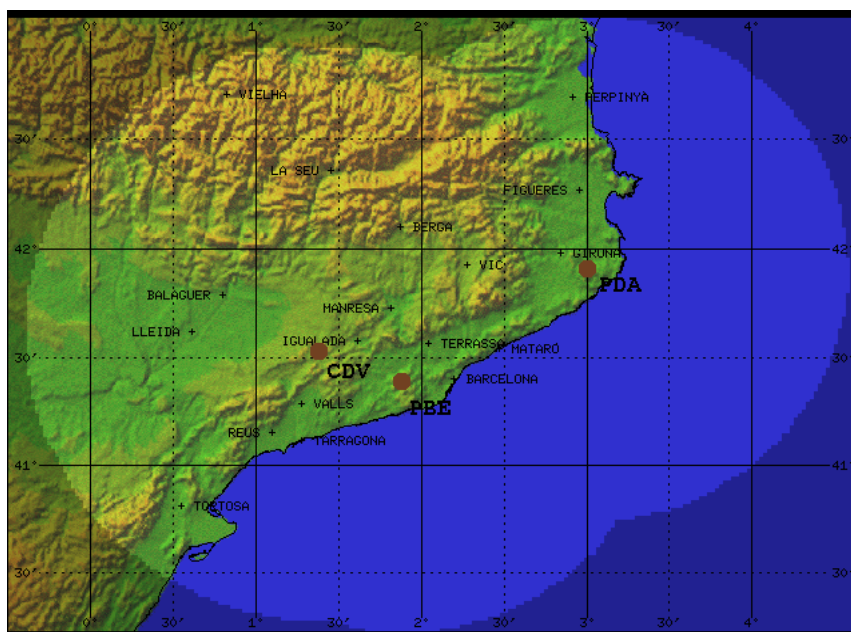
#### **Funcionament bàsic**

El funcionament bàsic d'un radar meteorològic és similar a d'altres tipus de radar — com els militars o de trànsit aeri o marítim— i pot resumir-se de la manera següent. El radar genera polsos de microones que són focalitzats i dirigits a una certa zona de l'espai mitjançant una antena. Els polsos de microones interactuen amb els blancs interceptats (pluja, neu, calamarsa, etc.) —en cas que n'hi hagi a la zona observada— i es produeix una certa energia retrodispersada (col·loquialment "eco"), una part de la qual retornarà a l'antena de radar. El processament del senyal rebut a l'antena permet calcular les magnituds observables que posteriorment s'utilitzen per generar productes radar.

El principal observable és la reflectivitat  $Z$  (una mesura de la intensitat de l'eco, expressada en dBZ) i, en els radars Doppler, la velocitat radial  $V$  (velocitat mitjana dels blancs observats en la direcció d'observació, expressada en m/s) o l'amplada espectral de



velocitats  $W$  (relacionada amb la dispersió o variabilitat de velocitats radials mesurades, expressada en m/s).



**Figura 6.** Cobertura d'observacions radar tridimensionals de la XRAD i posicions dels tres radars usats en aquest estudi: Vallirana (PBE), Puig d'Arques (PDA) i la Panadella (CDV).

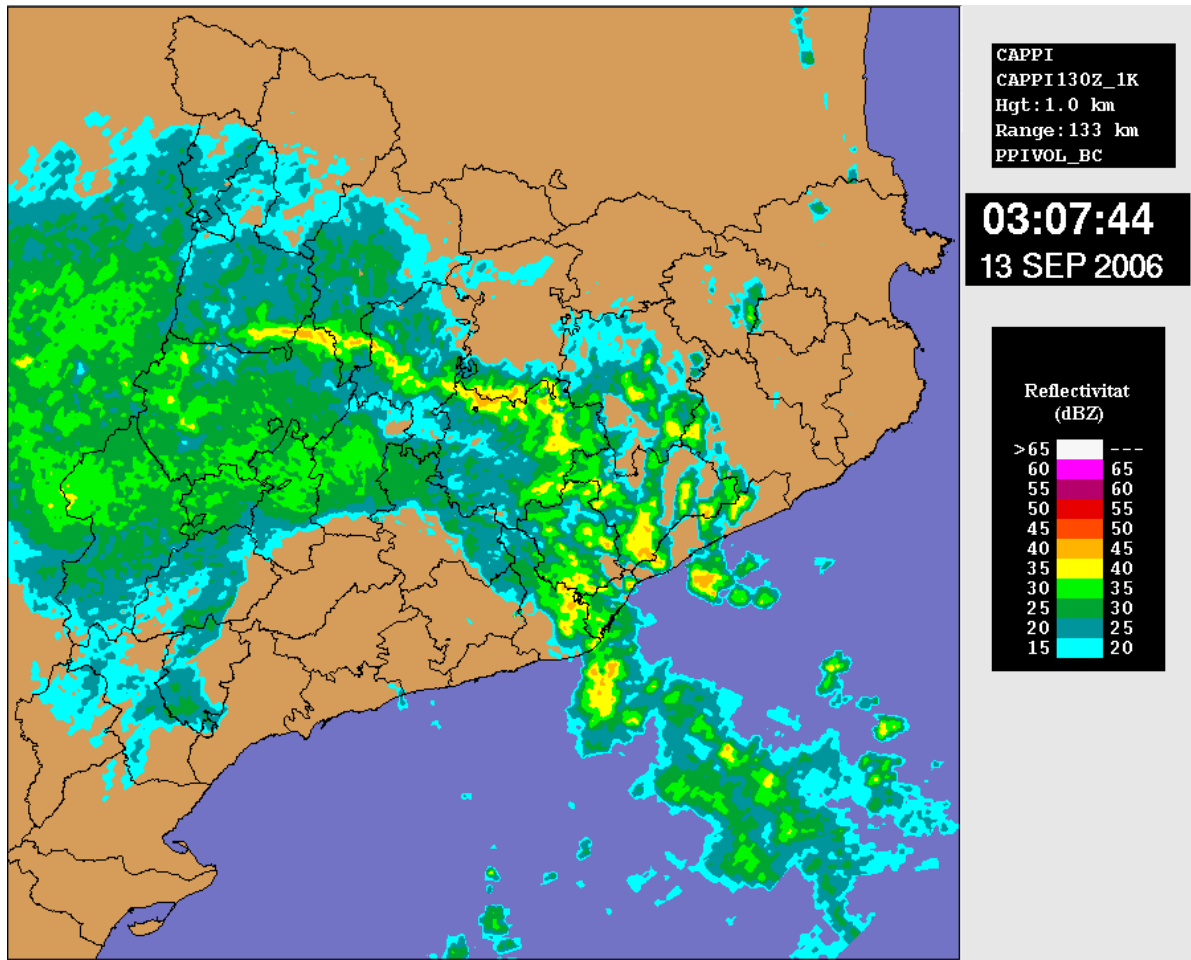
## **Productes radar**

En aquest apartat es descriuen breument els tres tipus de producte radar que s'han analitzat en aquest estudi: PPI, CAPPI i *top*.

El producte PPI (*Plan Position Indicator*) és una projecció bidimensional de les observacions radar obtingudes variant l'azimut de l'antena i mantenint fix l'angle d'elevació. A causa de la curvatura de la superfície terrestre i la variació de l'índex de refracció de l'aire, l'altura de les observacions representades en un producte PPI habitualment augmenta amb la distància al radar.

A partir d'un conjunt de PPI obtinguts amb diversos angles d'elevació s'obté un cert volum d'observacions tridimensionals de l'atmosfera. D'aquest volum pot extreure's un tall horitzontal de dades interpolades a la mateixa altura, producte radar anomenat CAPPI (*Constant Altitude PPI*). Per exemple el CAPPI 1 km de reflectivitat és un producte CAPPI en què les observacions estan aproximadament a 1 km d'altura.

A la xarxa XRAD els radars generen 14 PPI cada 6 minuts de curt abast (distància màxima de 150 km) més un PPI de llarg abast (250 km) que permet obtenir una visió general d'una àrea més gran. Cada sis minuts els PPI dels tres radars es combinen per tal de generar un producte compost de 10 CAPPI d'1 a 10 km. La figura 7 presenta un exemple d'una composició CAPPI 1 km de curt abast. La composició, en les zones de l'espai on hi ha més d'una observació disponible, es fa seleccionant el valor de reflectivitat més elevat.



**Figura 7.** Exemple d'un CAPPI a 1 quilòmetre del producte compost de curt abast (150 km) dels tres radars de la XRAD.

La resolució espacial horitzontal dels CAPPI d'1 a 10 km d'altitud és de  $2 \times 2 \text{ km}^2$  i la resolució temporal és de sis minuts. Aquestes característiques permeten identificar i fer un bon seguiment de les tempestes operativament tot i que, sovint, puguin presentar ecos amb altituds superiors a 10 km. Aquests CAPPI són el producte radar que s'ha utilitzat per elaborar aquest estudi.

Finalment cal mencionar un darrer producte radar utilitzat en aquest treball. Es tracta del *top*, a vegades denominat *echo-top* o *echotop*, segons l'expressió anglesa referida al cim o nivell d'altitud màxima assolida per ecos d'un cert nivell de reflectivitat. El producte *top*, tal com els PPI i els CAPPI, és un producte bidimensional i es defineix a partir d'un cert volum d'observacions radar tridimensional. *Top* indica, en unitats d'altitud (normalment quilòmetres) l'altitud màxima assolida per ecos d'un cert llindar de reflectivitat. Per tant, cal especificar a quin nivell de reflectivitat ens referim en parlar d'un *top*. Per exemple *top-12* indica l'altitud màxima assolida per ecos de 12 o més dBZ de reflectivitat. En aquest estudi s'ha utilitzat el *top-12* i quan es parla de producte radar *top* es refereix a aquest llindar de reflectivitat.

## 2.2. Observacions de la Xarxa de Detecció de Descàrregues Elèctriques

La Xarxa de Detecció de Descàrregues Elèctriques atmosfèriques (XDDE) de l'SMC funciona des de l'abril de 2003. La XDDE es compon de quatre estacions remotes i d'un sistema de processament central que és a la seu de l'SMC. Els quatre detectors són a Begues (el Baix Llobregat), Castellnou de Seana (el Pla d'Urgell), Muntanyola (Osona) i Amposta (el Montsià, figura 8). Ara bé, cal tenir present que les dades d'aquest estudi són anteriors a la posada en marxa del detector d'Amposta, el desembre de 2007.

### **Funcionament bàsic**

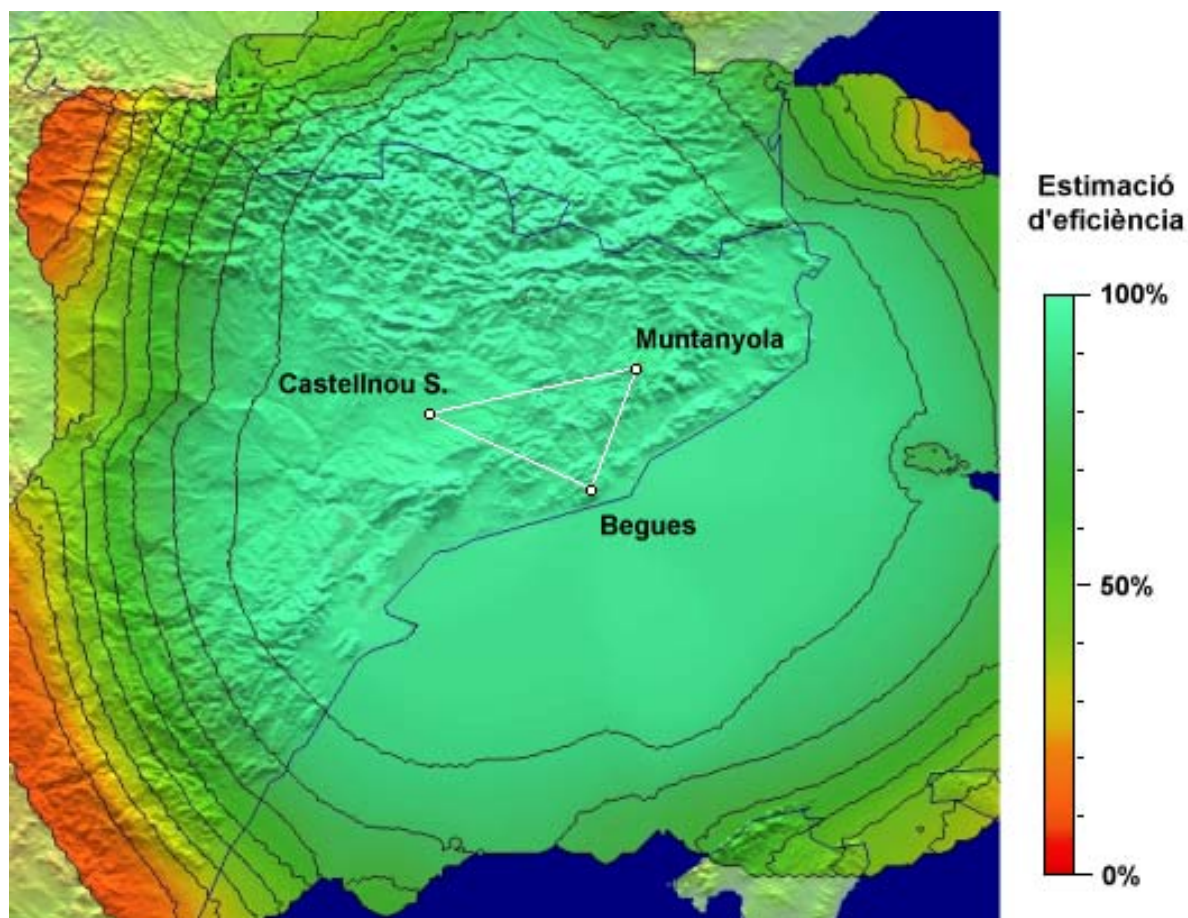
Les descàrregues elèctriques atmosfèriques generen emissions electromagnètiques en un ampli rang de l'espectre. Les diverses tècniques existents de detecció de llamps es basen a detectar aquest senyal en diferents regions d'aquest espectre, en concret a tres: a molt baixa freqüència (VLF), baixa freqüència (LF) i alta freqüència (VHF). A grans trets, es pot dir que com més petita és la freqüència d'operació més gran és l'abast d'observació del sistema, però més petita és l'eficiència del sistema i més petita la precisió en la localització geogràfica dels llamps.

La XDDE es compon de detectors tipus SAFIR (Richard i Lojou, 1996), sistema que combina un sensor VHF amb un sensor de baixa freqüència. El sensor VHF es compon d'un grup d'antenes que escolten en el rang dels 108 als 120 MHz, rang en què detecta els llamps núvol-núvol (NN). D'altra banda, el sensor de baixa freqüència treballa entre 300 Hz i 3 MHz i permet discriminar les descàrregues detectades que corresponen a llamps núvol-terra (NT), així com mesurar-ne certes característiques elèctriques.

La posició geogràfica dels llamps es determina per interferometria, tècnica que es basa en la mesura de diferències de fase de l'ona electromagnètica rebudes per un grup d'antenes col·locades radialment. Aquesta diferència de fase està directament relacionada amb la direcció d'arribada de l'ona, i es pot calcular l'azimut de la font emissora, en aquest cas el llamp. Combinant la informació azimutal rebuda de diferents antenes, es pot obtenir la localització del llamp. En concret per a la XDDE, els sensors del sistema permeten localitzar els llamps que cauen a Catalunya. L'avantatge de la interferometria respecte a altres mètodes de localització de llamps és que la tècnica és independent de la forma d'ona del senyal, ja que la mesura se centra en la diferència de fase. Aquesta característica permet localitzar les radiacions produïdes per les descàrregues elèctriques atmosfèriques a l'interior dels núvols, que anomenem llamps NN. Aquest fet és important en meteorologia, perquè aquest tipus de descàrregues són les primeres que s'observen en el desenvolupament de les tempestes. D'altra banda, la relació entre el nombre de llamps NN i NT és indicativa de l'estadi evolutiu de la tempesta així com de la seva intensitat.

Els sensors de la XDDE permeten computar un màxim de 100 deteccions per segon. Els punts d'emissió detectats s'agrupen, segons criteris de proximitat espacial i temporal, en unitats de llamp núvol-núvol. D'altra banda, els sensors detecten les descàrregues de retorn núvol-terra. Les descàrregues NT s'agrupen en unitats de llamp núvol-terra, també segons criteris de proximitat espacial i temporal. Així, les descàrregues NT amb una

mateixa posició geogràfica s'agrupen en llamps, considerant un interval màxim de temps de 500 mil·lisegons.



**Figura 8.** Estimació de la cobertura i d'eficiència de la XDDE en la detecció de llamps amb els detectors de Begues (Baix Llobregat), Castellnou de Seana (Pla d'Urgell) i Muntanyola (Osona).

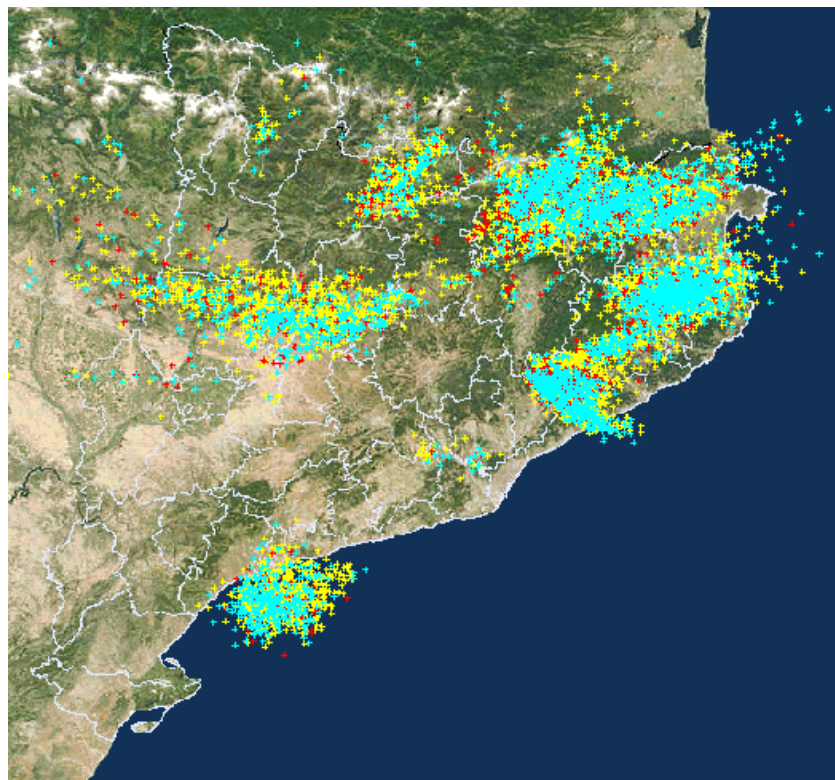
### **Productes que proporciona la XDDE**

La XDDE proporciona informació sobre:

- Descàrregues NN aïllades (una única mesura). En mesura el temps i posició. També dona informació sobre el marge d'error de la posició calculada.
- Llamps NN: trajectòria (node inicial, intermedis i final): temps i posició. Estimació de l'error de posició.
- Llamps NT: nombre de descàrregues de cada llamp, la inicial i les consecutives, si n'hi ha. Temps, posició i estimació de l'error de posició per a cada descàrrega. Característiques elèctriques de cada descàrrega: polaritat, corrent de pic i amplitud.

La figura 9 mostra els llamps NN (node inicial) i els llamps NT (descàrrega inicial) de polaritat negativa i positiva, registrats per la XDDE el 6 de juliol de 2006. Segons les

especificacions del fabricant dels sensors de la XDDE, l'eficiència del sistema està al voltant del 90%, mentre que la precisió en la localització dels llamps està entre els 500 metres i el quilòmetre. Des del punt de vista pràctic, un estudi de la Universitat Politècnica de Catalunya per als estius de 2004 i 2005 (Montanyà *et al.*, 2006) va estimar que l'eficiència de la XDDE és del 93%, mentre que la precisió en la localització dels llamps és menor a la nominal, i va establir una precisió entre 1 i 3 quilòmetres, en funció de la distància del llamp al centre de la xarxa.



**Figura 9.** Exemple dels llamps detectats el dia 6 de juliol de 2006. Llamps núvol-núvol (groc), llamps núvol-terra negatius (blau) i llamps núvol-terra positius (vermell).

### 2.3. Període i zona d'estudi

Com ja s'ha comentat a la introducció, els episodis de precipitació de tipus fred es donen majoritàriament a l'estiu. L'anàlisi de les dades de la XDDE del període 2004-2006 ha permès observar que el major nombre de llamps es registra en el període estival. En concret, els mesos de juliol, agost i setembre concentren de mitjana més del 70% dels llamps que cauen en tot l'any a Catalunya. Per aquest motiu, es va considerar com a període d'estudi per a aquest treball l'interval que va de l'1 de juliol al 15 de setembre de 2006.

La zona d'estudi es correspon a la presentada en la figura 7. En aquest període i per a la zona d'estudi definida, la XDDE va registrar més d'un milió tres-cents mil llamps NN i gairebé tres-cents mil llamps NT, distribuïts en vuitanta-quatre dies de tempesta. Aquests valors de llamps NT i de dies de tempesta suposen, respectivament, el 87% de llamps NT i el 47% del total de dies de tempesta del 2006.

## 2.4. Dades complementàries

En l'anàlisi del cicle de vida de les tempestes, a part de les dades bàsiques de radar i llamps, s'han usat dades de radiosondatge i sortides de models numèrics de predicció. S'ha utilitzat el radiosondatge de l'SMC, que es llança a Barcelona a les 00 i 12 TU, per determinar les altures de les isoterms que defineixen els centres de càrrega elèctrica en els núvols de tempesta. D'altra banda, s'han fet servir els perfils de vents sobre els punts de Lleida (41,63 N, 0,60 E) i Barcelona (41,23 N, 2,07 E), a diferents altures (properes als nivells del producte radar), a partir de les dades del model numèric MASS amb resolució de 8 km. Aquesta informació s'empra per determinar la direcció i velocitat del vent, la qual s'integra en la predicció de les tempestes identificades pels radars.

## 3. Metodologia

### 3.1. Identificació de tempestes amb radar

El mètode desenvolupat a l'SMC per al seguiment i anàlisi de tempestes identifica les estructures de precipitació mitjançant les dades de radar en dos grups: per una banda, estructures de precipitació en el CAPPI radar més baix a 1 km d'altitud, i, per l'altra, nuclis de les estructures convectives. Les estructures de precipitació les anomenarem RAD2 i les dels nuclis convectius identificats en tres dimensions RAD3.

#### **Estructures RAD2**

Pel que es refereix al primer tipus d'estructures, el procediment per identificar-lo és el següent: primerament, es fa una selecció de píxels radar que superen els 12 dBZ de reflectivitat i a continuació es fa una agrupació en regions de punts que estan connectats. Per evitar la selecció d'ecos radar anòmals que no han estat ben corregits, és imprescindible que l'àrea de la regió superi els 24 km<sup>2</sup>. Finalment, per a aquestes regions que es consideren vàlides, es fa una classificació de cada píxel segons el tipus de precipitació. Els criteris de classificació emprats són els següents:

- Els píxels que superen el valor de 43 dBZ es consideren automàticament de precipitació convectiva intensa. Aquest llindar s'ha obtingut a partir de l'anàlisi de diferents episodis.
- Per als píxels que estan entre els 12 dBZ i els 43 dBZ es fa una anàlisi del gradient de reflectivitats respecte al seu entorn (una de les característiques més importants de la precipitació convectiva és la seva elevada variabilitat espacial). En el cas que el valor sigui prou important, es considera el píxel de precipitació convectiva.
- Per als píxels no classificats, es busca si al seu voltant hi ha algun píxel convectiu. En cas afirmatiu, el píxel es considera de precipitació convectiva vella (és a dir, que procedeix d'un núvol d'origen convectiu, però cau de manera poc intensa). La resta de píxels es consideren de precipitació estratiforme.

Aquesta classificació és important, ja que a l'hora de fer la conversió de reflectivitat a intensitat de precipitació, mitjançant l'equació:

$$Z = a R^b \quad \text{Eq.1}$$

els paràmetres  $a$  i  $b$  seleccionats seran diferents i adequats per al tipus de precipitació observada; en aquesta equació la reflectivitat  $Z$  s'expressa en mm<sup>6</sup> m<sup>-3</sup> i la intensitat de precipitació  $R$  en mm/h. Una vegada s'ha identificat i caracteritzat la precipitació inclosa dins cada estructura RAD2, es busca una sèrie de paràmetres que donen informació sobre

el seu estat: posició del centre, àrea, reflectivitat màxima i mitjana, intensitat de precipitació, desenvolupament vertical màxim i mitjà, i percentatge de cada tipus de precipitació. Cal dir que per facilitar els procediments de caracterització i seguiment es converteixen aquestes estructures en el·lipses per obtenir altres informacions, com ara els radis màxim i mínim, l'excentricitat o l'angle d'orientació.

### **Estructures RAD3**

Respecte als nuclis de les estructures convectives, l'algorisme analitza tot el volum de dades radar per tal d'obtenir el màxim d'informació de l'estat de les tempestes, com a mínim de la part més activa. El procediment consisteix a analitzar cada nivell, buscant regions de píxels que superen un dels diferents llindars de reflectivitat (que van des dels 30 fins als 60 dBZ, amb intervals de 5 dBZ), i, a més, tenen una àrea superior als 18 km<sup>2</sup>. Amb aquestes restriccions s'elimina la possibilitat que s'identifiquin falses tempestes, tot i que les tempestes més febles o de petites dimensions no són ben identificades. La raó per la qual s'ha preferit seguir aquest criteri és que l'objectiu d'operativitat de l'eina fa que el meteoròleg hagi de tenir en pantalla només la informació que en aquell moment pot ser d'interès per fer un seguiment de situacions meteorològiques de risc. A més, les estructures no identificades poden ser seguides amb les estructures RAD2. Per a aquestes estructures RAD3 es busquen les característiques següents: posició del centre ( $x, y, z$ ), altura del cim i de la base, volum total i reflectivitat màxima i mitjana.

Una vegada s'han identificat i caracteritzat els dos tipus d'estructures, es fa un seguiment del seu moviment previ per conèixer-ne l'estat d'evolució dins el seu cicle de vida. El procediment és diferent per a cada tipus d'estructura. Per a les RAD2, el que es busca és una coincidència més gran de punts respecte a les estructures observades en la imatge prèvia, mentre que per a les RAD3 es busca una distància més petita entre centres. Les estructures identificades en instants successius com la mateixa han de verificar certs criteris que no contradiguin l'esquema del cicle de vida de les tempestes.

## **3.2. Identificació de tempestes des del punt de vista dels llamps**

En el cas dels llamps, les estructures s'identifiquen considerant de manera separada els NN i els NT, i se n'obtenen dos tipus independents d'objectes: XDN (per als llamps NN) i XDT (per als NT). Aquesta identificació es fa sobre la mateixa graella bidimensional que el CAPPI radar. Així, les observacions puntuals de NN i NT es transformen en píxels de la graella.

Per als dos tipus de llamps la metodologia d'identificació és la mateixa: de primer, per a cada píxel on s'han observat llamps es considera un cercle centrat sobre el punt i de 5 km de radi. A partir d'aquí, tots els píxels inclosos en el cercle s'agrupen en un únic objecte. Finalment, es determinen les característiques de l'objecte: àrea, posició del centre, nombre total de descàrregues elèctriques i densitat màxima i mitjana de descàrregues.

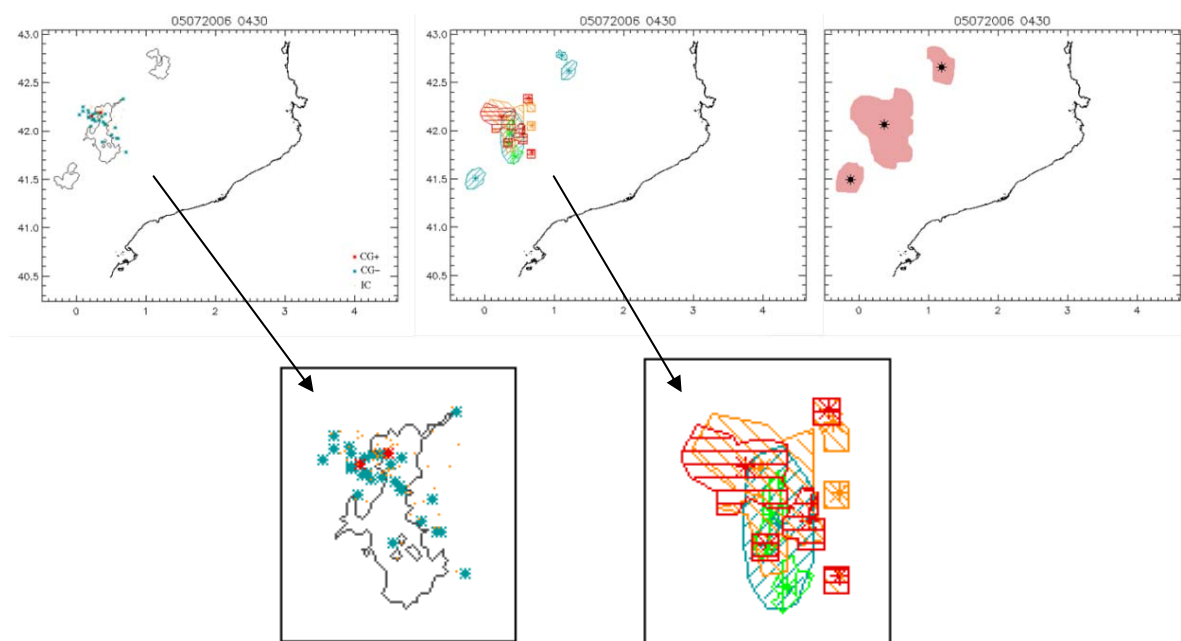


El procediment per al seguiment de les estructures XDN i XDT és molt semblant al que es fa per a les estructures 2D, és a dir, cerca d'àrees amb més coincidència, mirant si hi ha una bona correlació dins de l'evolució dels paràmetres en el seu cicle de vida.

### 3.3. Integració de la informació de radar i de llamps sobre les tempestes

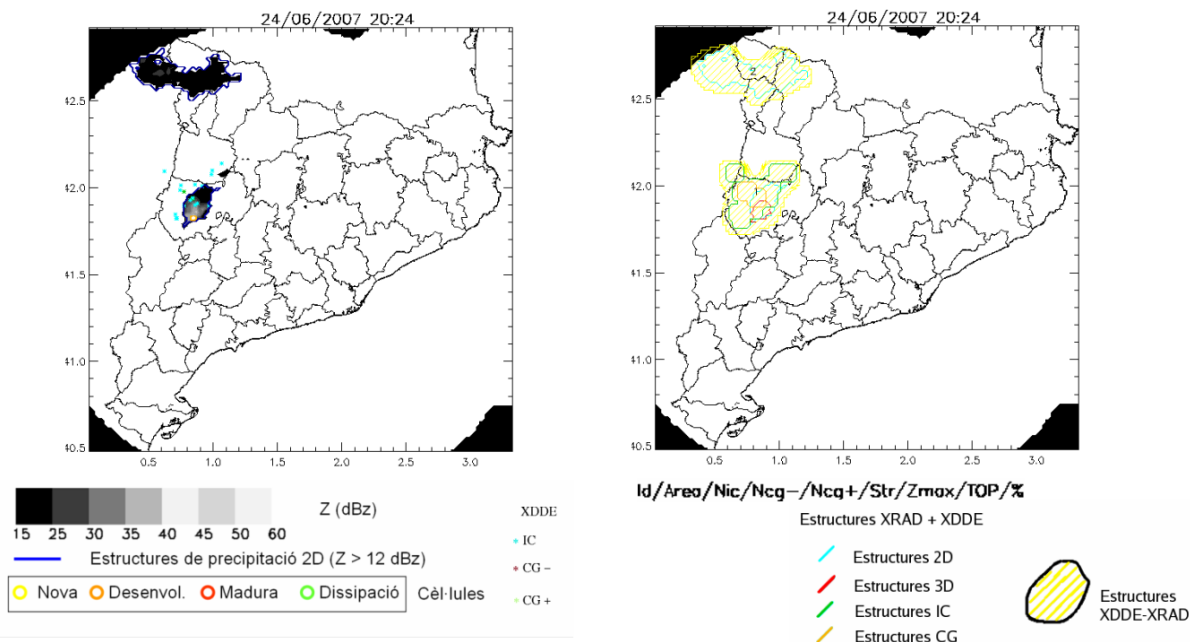
És important tenir en compte que els quatre tipus d'objectes (RAD2, RAD3, XDN, i XDT) s'identifiquen de manera independent, és a dir, per identificar-ne un no és necessari disposar d'informació sobre la resta. A més, per a cada tipus s'apliquen tècniques de seguiment per conèixer l'evolució de cada estructura. Així, per a cada tipus d'estructura es calculen noves variables (durada, variació de l'àrea i d'altres paràmetres) i s'integren en els paràmetres que caracteritzen l'objecte. Fins ara, les tècniques de *nowcasting* s'apliquen només a les estructures radar, tot i que està planejat aplicar algorismes per tal d'obtenir prediccions a curt termini dels objectes de llamps.

La integració de tots els objectes es duu a terme a partir d'un algorisme de superació de llinars: així, per un temps  $t$  se superposen sobre la mateixa malla totes les estructures radar i de llamps identificades, i es considera per a cada píxel el nombre de tipus d'estructures diferents que s'observen (figura 10). Llavors, el procediment busca els píxels en els quals s'ha observat almenys un tipus d'objecte. Tots els píxels agrupats dins d'un mateix contorn conformen un nou objecte, pel qual es determinen diferents propietats: posició, àrea, nombre d'estructures de cada tipus i el número que identifica cada objecte associat a la nova estructura "integradora". Finalment, es fa un creixement (filtre morfològic) de l'estructura per evitar en el futur fusions o fissions d'aquesta estructura.

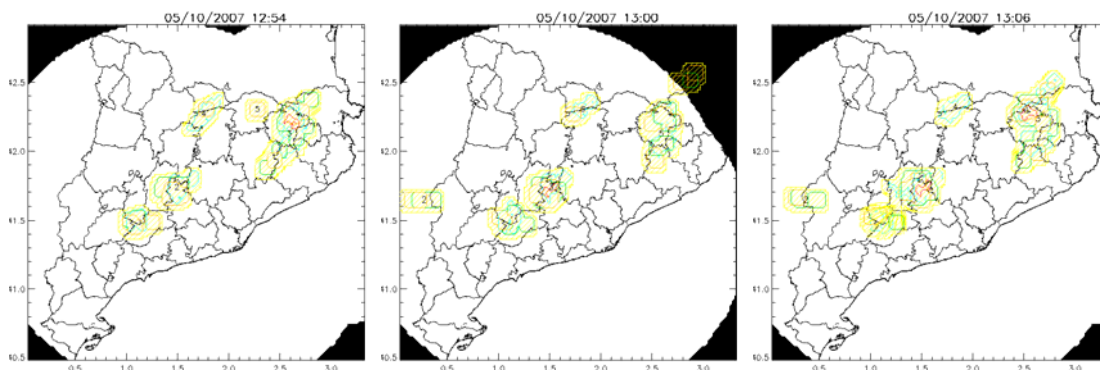


**Figura 10.** Exemple de l'aplicació de la metodologia. A l'esquerra es presenten els ecos radar que superen els 12 dBZ (línies fines de color negre) i descàrregues elèctriques (asteriscs de color vermell —NT positius—, blau —NT negatius— i groc —NN—). Al centre, les característiques radar i elèctriques de la imatge anterior s'han transformat

en objectes: blau (estructures de precipitació), verd (cèl·lules convectives), taronja (descàrregues NN) i vermell (descàrregues NT). A la dreta, agrupació de tots els objectes en estructures que integren tota la informació. Els asteriscs negres indiquen la posició del seu centre.



**Figura 11.** Exemple de visualització en temps real de l'aplicació a la intraweb de l'SMC. A l'esquerra, imatge radar amb informació integrada de descàrregues elèctriques. A la dreta, estructures que contenen tota la informació radar i elèctrica.



**Figura 12.** Evolució de les estructures radar-llamps per al dia 5 d'octubre de 2007, entre les 12.54 i les 13.06 TU. A la imatge central es pot veure (zona negra) que la cobertura de la xarxa en aquell moment és inferior a la resta, a causa del fet que les dades del radar del Puig d'Arques no han estat incloses dins el producte, i malgrat tot se segueix veient l'estructura del NE gràcies a les dades de llamps.

## **4. Resultats**

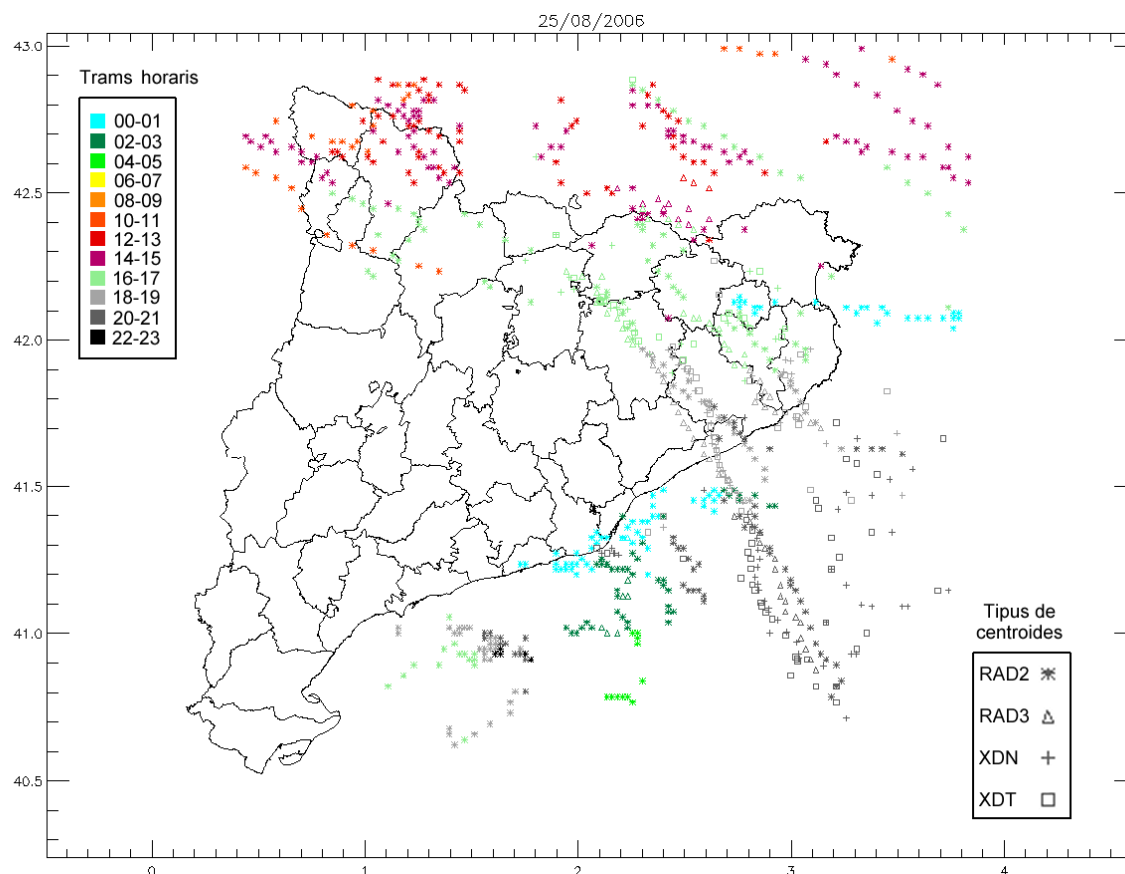
### **4.1. Anàlisi del cicle de vida de les tempestes**

L'estudi de l'evolució temporal de les tempestes, a través de la combinació de paràmetres de radar i de llamps, s'ha dut a terme per establir un patró del cicle de vida d'aquesta. L'enfocament d'aquesta anàlisi en particular està orientat a ajudar el predictor en les seves tasques de vigilància i, tenint en compte aquesta finalitat, es busquen referents del cicle de vida de la tempesta que no tenen per què correspondre exactament amb les fases del cicle de vida conceptuals que s'han descrit a la introducció.

El mètode de seguiment de tempestes descrit anteriorment s'ha aplicat al conjunt de tempestes del període analitzat. En total, el mètode ha detectat 425 estructures. A l'hora d'establir un patró del cicle de vida d'aquestes estructures, no s'han fet servir totes, sinó que s'ha partit d'una mostra de 66 estructures, seleccionades seguint els criteris següents:

- La tempesta comença i acaba dins l'àrea d'estudi, que està delimitada per l'abast de la Xarxa de Radars Meteorològics.
- Els casos estudiats contenen els quatre tipus d'objectes (RAD2, RAD3, XDN i XDT).
- El seguiment no resultava complex durant tot el seu cicle de vida (no hi havia fusions ni fissions amb altres tempestes).
- La seva durada superava 50 minuts.

A la figura 13 s'hi pot observar un exemple per al dia 25 d'agost de 2006, amb els centroides dels quatre tipus d'objectes RAD2, RAD3, XDN i XDT identificats per separat i per diferents trams horaris. En aquest cas és molt fàcil fer un seguiment visual del moviment de les diferents tempestes que van recórrer Catalunya. Destaquen les que van començar al Ripollès i es van desplaçar cap al sud-est (en colors verd clar i grisos, entre les 16 i les 21 TU), que van arribar fins a mar ben endins. Cal dir que en altres situacions, aquest seguiment visual no és tan obvi i es fa necessària l'anàlisi de les dades numèriques.



**Figura 13.** Exemple de detecció al llarg d'un dia dels objectes detectats, en les quatre categories definides: RAD2, RAD3, XDN i XDT. Els colors dels objectes corresponen als diferents trams horaris.

## 4.2. Identificació de fases en el cicle de vida

Com ja s'ha comentat a la introducció, els processos d'electrificació dels núvols de tempesta van lligats a l'altura que assolixen aquests. En l'anàlisi de les estructures sotmeses a estudi, s'ha observat que l'activitat NN no comença fins que el producte *top* (12 dBZ) radar no assolix altures d'uns 7 km. Per al període estudiat, segons dades del radiosondatge de l'SMC, aquesta altura es correspon aproximadament amb la isoterma  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Seguint l'evolució de la tempesta, un cop iniciada l'activitat NN, el núvol segueix creixent fins a assolir altures per sobre dels 10 km. Una vegada el *top* radar ha superat aquesta altura és quan es produeix un ràpid increment del nombre de llamps NN per minut. Segons dades del radiosondatge, en el període estudiat la isoterma  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  està al voltant dels 9,5-10 km. Així, aquestes observacions es corresponen amb el model teòric proposat per Dotzek *et al.* (2005), que situa el nucli principal de càrregues negatives en la regió dels  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  i les positives al voltant dels  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Una vegada el *top* ens indica que el núvol ha assolit aquesta altura, podem considerar que hi ha nucli consistent de càrregues positives en altura que desapareixen l'activitat NN. Aquest increment continuat d'altura va acompanyat

d'un increment continuat en l'àrea de l'estructura detectada pel radar. Resumint, es considera que aquests tres criteris indiquen que s'ha iniciat l'etapa de maduresa:

- El *top* supera la isoterma  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  i es manté per sobre d'aquesta altura.
- Ràpid increment de l'activitat NN.
- Creixement continuat de l'àrea de l'estructura.

Després d'aquest període de maduresa, que presenta durades força variables en la mostra de tempestes analitzades, ve la dissipació i acabament de l'estructura. Així com l'activació de les descàrregues elèctriques s'ha observat que va lligada a l'assoliment d'una certa altura del núvol, també s'ha observat que quan el *top* comença a perdre altura de manera continuada l'activitat de llamps també entra en recessió. La davallada del *top* també coincideix en el temps amb la pèrdua d'àrea de l'estructura. Resumint, el pas de maduresa a dissipació es regeix pels tres criteris següents:

- El *top* perd l'altura de la isoterma  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  i segueix en descens en imatges successives.
- Caiguda continuada de l'activitat NN.
- Caiguda continuada de l'àrea de la tempesta.

Cal tenir present que en aquest estudi es consideren unes fases del cicle de vida de la tempesta que no necessàriament coincideixen amb les del model teòric descrit a la introducció. Per exemple, la fase inicial o de desenvolupament en el nostre cas considera l'existència de precipitació a nivells baixos, mentre que l'exposada a la introducció es defineix com a prèvia a la caiguda de precipitació (caracteritzada per ecos elevats). Les fases proposades de cicle vida pretenen ser de la màxima utilitat en tasques operatives.

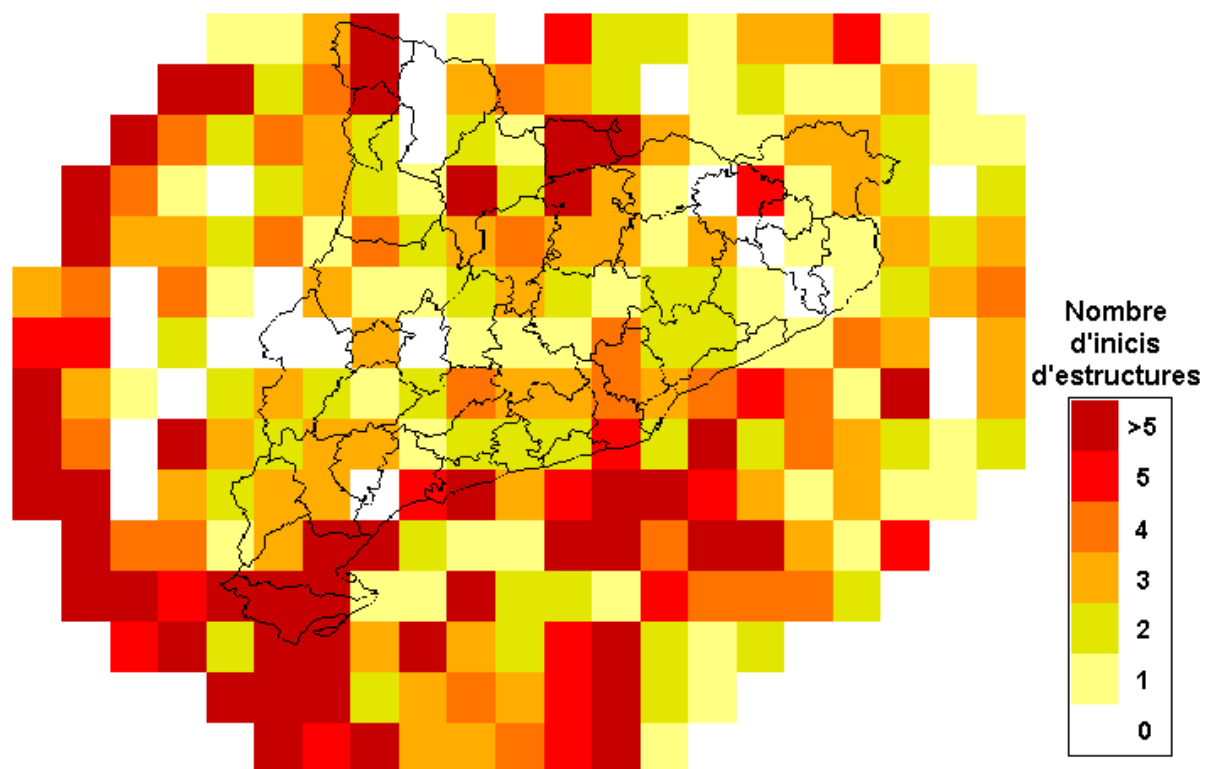
### 4.3. Distribució de tempestes

Una de les premisses, a l'hora de triar la mostra de tempestes d'aquest estudi, és que aquestes tempestes comencin i acabin dins de l'àrea d'estudi, la qual s'estableix per la cobertura de la xarxa de radars. Aquesta premissa limita bastant el nombre de tempestes estudiades, ja que moltes de les que van afectar Catalunya l'estiu de 2006 s'havien iniciat fora de l'àrea d'observació. Aquest fet no impedeix que sigui interessant analitzar la distribució de totes les tempestes observades, tenint present que són força més que les que finalment s'han analitzat.

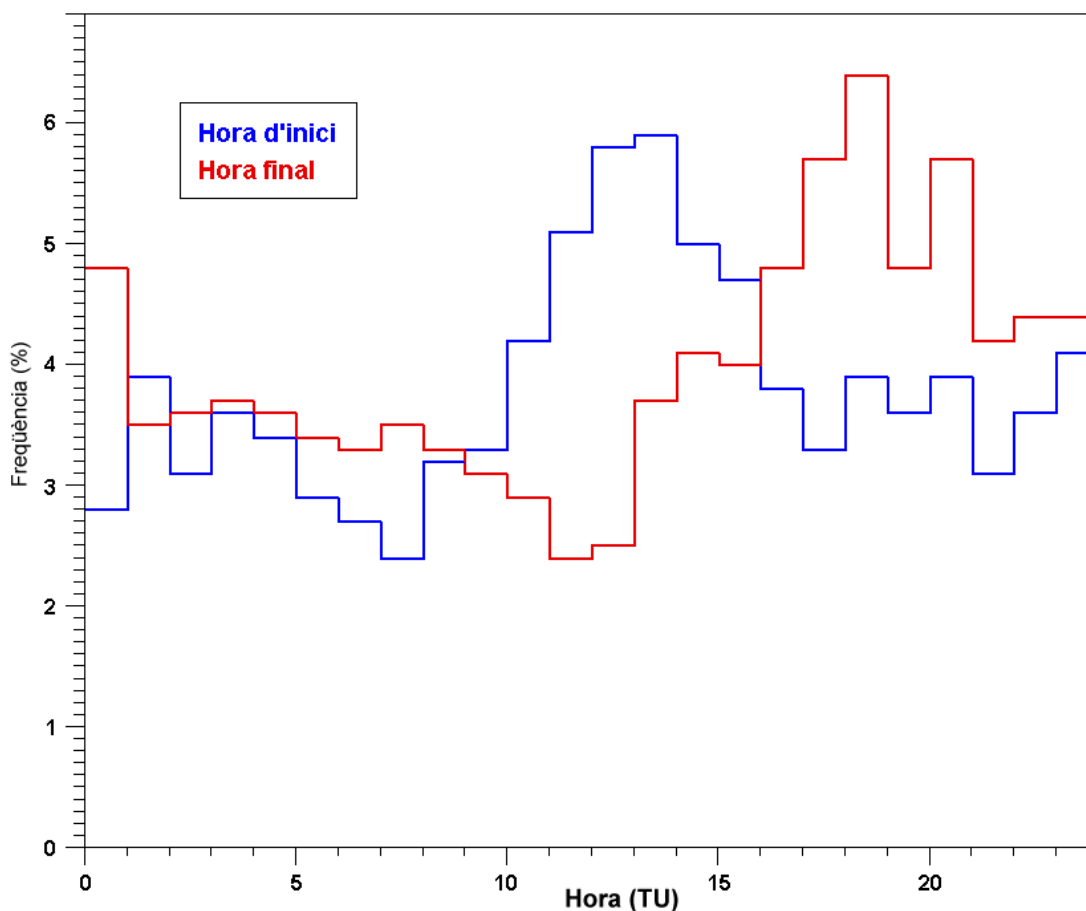
Per aquest motiu, prèviament a l'anàlisi de les tempestes iniciades i acabades a la zona d'estudi, s'examinen breument en aquesta secció alguns aspectes de totes les tempestes. A la figura 14 es presenta la densitat de l'inici de les estructures RAD2, a partir del moment en què el mètode aplicat les detecta (que als límits de la zona d'estudi no és necessàriament el moment d'inici de la tempesta). La figura mostra una sèrie de patrons interessants. El més evident és l'alta densitat en la zona frontera del SW. És per aquesta zona on entren més tempestes a Catalunya, bàsicament provenint de la Serralada Ibèrica, on es formen. De fet la zona del Sistema Ibèric és la que presenta més densitat de llamps a

Espanya (Rivas Soriano *et al.*, 2005). Encara que no tant extensa, també hi ha una alta densitat a la zona de frontera del NW, relativa a les nombroses tempestes que vénen dels Pirineus més occidentals. Aquesta alta densitat de l'oest contrasta amb la baixa densitat de l'est. Pel que fa a l'inici de tempestes dins de l'àrea estudiada, destaquen les comarques de Vall d'Aran, la Cerdanya i el Berguedà als Pirineus, així com el Baix Ebre i el Montsià.

Si ens fixem en l'hora en què es detecten aquestes tempestes, representada a la figura 15, s'observa clarament una correspondència amb el cicle d'escalfament diürn, amb un màxim d'inici cap a les 13 TU (moment de més escalfament solar) i un altre de final cap a les 18 TU (que és quan la radiació solar comença a minvar de manera notable). Val a dir que en tota l'anàlisi es fa servir l'hora en temps universal (TU).



**Figura 14.** Distribució geogràfica dels inicis de les 425 estructures RAD2 detectades per l'eina, dins del període d'estudi.



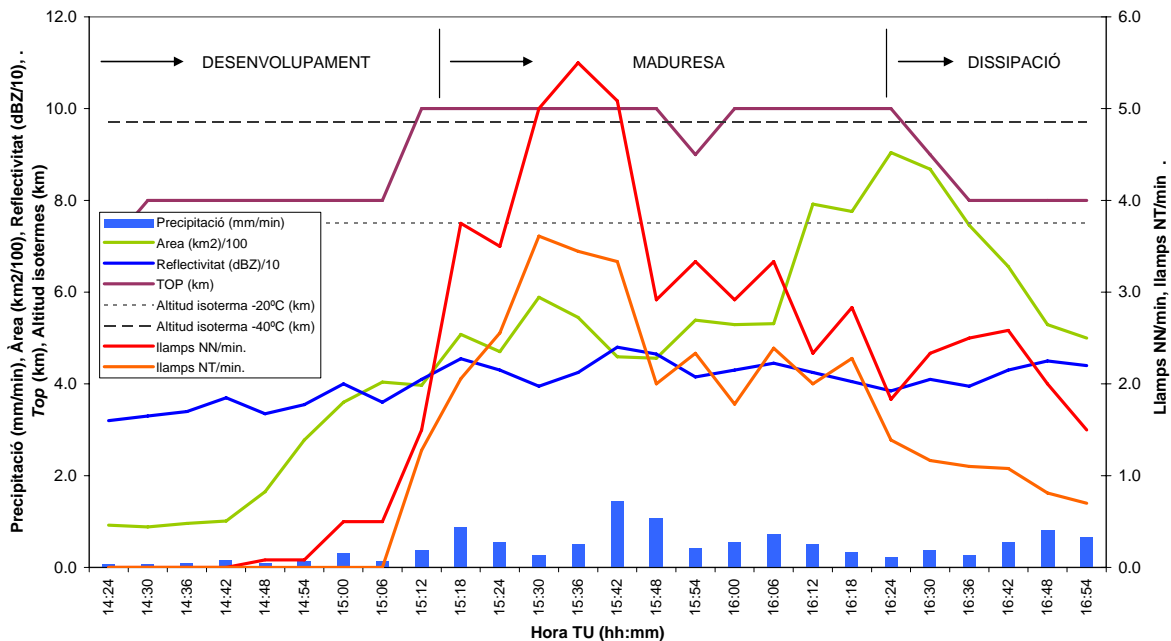
**Figura 15.** Hora d'inici i final de detecció de les estructures RAD2 observades a l'àrea d'estudi. Cal remarcar que aquestes hores no coincideixen necessàriament amb les hores d'inici i final de la tempesta quan aquests moments corresponen a una posició de la tempesta a la frontera de la zona d'estudi.

#### 4.4. Fases de la tempesta

A partir de l'anàlisi dels paràmetres radar i de llamps de les 66 tempestes estudiades, s'ha establert una seqüència en el cicle de vida del radar, i s'estableixen tres fases diferenciades: el desenvolupament, la maduresa i la dissipació.

A la figura 16 es mostra un exemple de l'evolució dels diferents paràmetres estudiats en una tempesta de la tarda del 25 de juliol de 2006, amb inici als voltants d'Isil (Pallars Sobirà) i final a prop de Sort. El sistema detecta l'estructura a les 14.24 TU, en un estadi de desenvolupament en què l'altura (*top-12*) i l'àrea augmenta. La reflectivitat màxima està en aquest estadi entre 30 i 35 dBZ. El *top* supera la isoterma  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (7,5 km) a les 14.30 TU, i 12 minuts més tard es comencen a registrar descàrregues a l'interior del núvol. A les 15.06 hi ha un punt d'inflexió, el *top* supera l'isoterma  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (9,7 km) i es dispara la intensitat de llamps NN. L'àrea creix imatge rere imatge. És en aquest moment (entre 15.12 i 15.18 TU) quan entrem en la fase de maduresa. En aquesta fase els llamps NN i NT assoleixen el màxim, amb més de 5 llamps NN/min i més de 3 llamps NT/min. En aquesta fase el *top* es manté per sobre de la isoterma  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , malgrat una davallada puntual. En el màxim de reflectivitat radar s'assoleix una imatge després, amb valors per sobre els 45 dBZ. Aquest

desplaçament entre el màxim de l'activitat de llamps i el màxim en la reflectivitat també és característic i ha estat estudiat més a fons a Pineda *et al.* (2004). També és destacable el comportament diferenciat de l'àrea, que segueix augmentant, i assolix el màxim just abans la fase de dissipació.



**Figura 16.** Exemple de seguiment del cicle de vida d'una estructura detectada el 25 de juliol de 2006 a la zona del Pallars. S'indiquen les fases i els moments de canvi de fase segons els criteris esmentats al punt 4.2.

El punt d'inflexió següent es produeix entre les 16.24 i les 16.30, moment en el qual comença la davallada del *top*, l'àrea i l'activitat NT. Malgrat que en aquest cas l'activitat NN repunta, ja fa estona que aquesta està en decreixement. En aquest moment comença la fase de dissipació, que dura fins a les 16.54, en què el sistema deixa de veure l'estructura.

En el conjunt del cicle de vida de l'estructura, els llamps NT segueixen una pauta evolutiva similar als NN, encara que apareixen 12 minuts més tard. Aquest desplaçament en el temps entre l'activitat NN i NT és una característica general de les tempestes (Pineda *et al.*, 2004).

La taula 3 resumeix les característiques de les tres fases en què s'han dividit les tempestes. Per al conjunt de casos analitzat, s'han trobat durades entre 54 minuts a gairebé vuit hores, encara que de mitjana les tempestes analitzades duren unes 3 hores i mitja. Les fases de desenvolupament i dissipació tenen una durada similar, mentre que la maduresa és la fase més llarga. En aquesta fase és on es concentra l'activitat elèctrica, amb més del 80% dels llamps NN i NT. La distribució entre les altres dues fases no és equitativa com passava amb la durada, ja que es registren tres vegades més llamps en la dissipació respecte de la fase d'inici.



La intensitat de llamps també és més elevada durant la maduresa, durant la qual es registren una mitjana de gairebé 5 llamps per NT per minut. Aquesta intensitat es redueix a la meitat en la dissipació i és força més baixa durant el desenvolupament.

Pel que fa als paràmetres radar, els valors més elevats de reflectivitat es donen, de mitjana, en la fase de maduresa, i arriben a superar en més de 4 dB els valors de dissipació i 6 dB els de desenvolupament. Per altra banda, per la mateixa natura del cicle de vida de les tempestes, és bastant coherent que el percentatge de precipitació convectiva més elevat es doni a la fase de desenvolupament ja que, en aquesta, l'enclusa no està formada i gran part de la precipitació està associada al desenvolupament vertical.

**Taula 3.** Resum de paràmetres de cada fase per al conjunt total d'estructures

		Total	Desenvol.	Maduresa	Dissipació
Durada mitjana (min)	(min)	204	48	108	48
	Mínim (min)	54	12	18	12
	Màxim (min)	474	132	246	144
Nombre de llamps NN	(%)		4,5%	81,7%	13,1%
Nombre de llamps NT	(%)		4,9%	81,3%	13,1%
Intensitat mitjana de NN	(min-1)	7,8	1,3	11,0	5,4
Intensitat mitjana de NT	(min-1)	3,3	0,6	4,8	2,1
Àrea mitjana	(km <sup>2</sup> )	509	323	631	503
Reflectivitat mitjana	(dBZ)	43,8	40,6	47,1	42,9
Precipitació convectiva	(%)	38,2%	43,8%	39,8%	33,4%
Intensitat precipitació mitjana	(mm/min)	1,3	0,7	1,8	1,1
Anomalies positives (NT+ > NT-)		220	57	110	53

La polaritat dels llamps NT és predominantment negativa, però s'han observat tempestes amb domini de llamps NT positius, sigui en el conjunt de la tempesta o durant períodes d'aquesta. Diversos estudis, com per exemple el de Carey *et al.* (2003b), relacionen el domini de llamps NT+ amb fenòmens de temps sever, com la pedra. A l'hora d'analitzar l'evolució de les tempestes, la relació entre NT-/NT+ és un dels paràmetres que s'ha tingut en compte. El terme *anomalia positiva* (AP) es refereix a intervals 6-minutals en què s'han observat més NT+ que NT-. En els casos d'estudi s'ha observat anomalia positiva en 6 estructures. Una anàlisi detallada d'aquestes estructures mostra que en tres casos la intensitat de llamps NT és baixa, i les anomalies positives són puntuals, en moments de pocs llamps. Aquests tres casos amb pocs llamps s'han descartat perquè són poc representatius. Ara bé, en els altres tres casos aquesta AP es pot relacionar amb la presència de calamarsa o pedra. En el cas del 28 de juliol la tempesta és sobre el mar, però en els altres dos casos hi ha observacions de calamarsa. En la tempesta del 12 d'agost hi ha constància de calamarsa (< 10 mm de diàmetre). En la tempesta del 8 de juliol hi ha observacions de pedra (2-3 cm diàmetre).

Encara que 3 episodis són pocs, caldrà tenir present aquest paràmetre com a possible indicador en les tasques de vigilància meteorològica de fenòmens de temps sever associats a tempestes.

## 4.5. Intensitat de la tempesta

A l'hora d'analitzar les característiques dels episodis estudiats, aquests s'han agrupat en tres grups d'intensitat, en funció de la mitjana dels llamps NT per minut durant la fase de maduresa. Els més destacats són intensitat feble, moderada i forta. Els llindars de canvi de categoria (taula 4) s'han determinat a partir dels valors trobats en diversos estudis, i resumits a Lang i Rutledge (2002). L'aplicació de llindars independents a la mostra estudiada fa que les mostres no es distribueixin regularment en les categories, però és imprescindible aplicar uns llindars per obtenir resultats quantitatius.

**Taula 4.** Categories de les estructures estudiades en funció de la mitjana de llamps NT/min durant la fase de maduresa

	Intensitat mitjana de NT ( $\text{min}^{-1}$ )	Nombre d'estructures	Rang d'intensitats NT mitjanes ( $\text{min}^{-1}$ )	Durada mitjana de l'estructura (min)
Baixa	<2	28	0,1 - 1,7	165
Moderada	2-10	28	2,1 - 6,1	210
Forta	>10	10	10,1 - 43,9	290

Com era d'esperar, la durada de l'estructura està relacionada amb la seva intensitat. A la figura 17 s'analitza la freqüència de la durada de l'estructura. S'hi poden observar dos màxims, relacionats amb la moda de les tempestes febles (150 min) i la moda de les d'intensitat moderada (225 min). Les tempestes fortes no tenen una moda tan diferenciada i presenten dos màxims similars (275 i 350 min).

La taula 5 presenta els resultats separant fases i categories. És interessant observar com la durada del desenvolupament i de la dissipació és similar entre categories, mentre que la diferència més marcada és la dels períodes de maduresa (vegeu la figura 18a). Així com en les tempestes febles la maduresa no supera en durada el conjunt de desenvolupament i dissipació, en les tempestes d'intensitat moderada la maduresa ja suposa la meitat de la duració total, i en les d'intensitat forta la maduresa suposa de mitjana més del 60% del temps de vida. És important tenir en compte aquest aspecte pel que fa a la predicció d'aquest tipus de tempestes, ja que és en aquesta etapa quan s'observen la majoria de fenòmens de temps sever (pedra, ratxes de vent fort, tornados).

De fet, és en aquest període de maduresa en què es produeixen la majoria de llamps, tant NN com NT (vegeu la figura 18b), per als tres tipus d'intensitat. No obstant això, els valors més importants es donen quan més intensa és la tempesta (pràcticament el 90% de totes les descàrregues es donen a la fase de maduresa). La relació que abans s'apuntava, en què la durada estava relacionada amb el nombre de llamps NT, es pot centrar en aquest període. Tanmateix, cal tenir en compte que fins i tot en els últims minuts del cicle de vida de la tempesta es poden observar descàrregues elèctriques, fet que cal considerar quan es fan tasques de vigilància meteorològica.

**Taula 5.** Resultats dels paràmetres analitzats separats per categories d'intensitat, tant per al conjunt de la durada de la tempesta com per a les 3 fases.

	Durada (min)	Z (dBZ)	Àrea (km <sup>2</sup> )	TOP (km)	Int.Pop. (mm/min)	TPC (%)	NN (num)	NT (num)	NN (%)	NT (%)	AP (num)	Int.max. NN/min	Int.max. NT/min	Z.max (dBZ)	A.max (km <sup>2</sup> )
<b>TOTAL</b>	165	41.2	353.9	7.4	0.77	37.9	159	101	100	100	21	3.6	2.3	51.2	624.0
Feble	210	44.5	521.1	7.5	1.36	38.3	929	470	100	100	30	14.7	8.0	54.8	902.4
Moderada	290	48.9	915.0	9.0	2.56	38.6	10216	3783	100	100	6	102.5	37.1	57.9	1682.5
<b>DESENV.</b>															
Feble	42	38.8	239.6	7.1	0.48	42.2	8	6	4.3	5.1	49	0.4	0.3	44.8	340.9
Moderada	52	41.2	344.8	7.4	0.87	44.2	56	29	5.6	5.8	32	2.9	1.5	47.4	512.6
Forta	45	44.2	498.7	9.0	1.12	46.8	138	60	1.6	1.6	28	8.3	3.5	49.1	684.0
<b>MADURESA</b>															
Feble	78	44.5	450.8	8.8	1.09	39.4	126	78	81.3	79.3	21	3.6	2.3	51.2	624.0
Moderada	111	48.2	647.7	9.4	1.93	40.1	773	395	79.9	80.9	18	14.7	8.0	54.8	902.4
Forta	181	51.6	1089.3	10.0	3.12	40.2	8868	3291	87.5	88.2	15	101.1	36.6	57.9	1682.5
<b>DISSIPACIÓ</b>															
Feble	45	40.4	375.5	7.5	0.68	33.6	25	17	13.8	14.7	91	1.4	1.0	47.7	512.1
Moderada	47	43.2	499.6	8.1	1.09	33.5	100	46	13.6	12.6	80	6.6	3.0	49.9	730.6
Forta	64	49.1	871.4	9.4	2.49	32.6	1210	432	10.1	9.7	49	58.1	21.4	57.2	1382.1

**Llegenda de les columnes**

- Durada (min):** mitjana de la durada de l'estructura, en minuts.
- Z (dBZ):** mitjana de la reflectivitat radar, en dBZ.
- Àrea (km<sup>2</sup>):** mitjana de l'àrea de l'estructura, en km<sup>2</sup>.
- Top (km):** mitjana del top de l'estructura, en quilòmetres.
- Int. prec. (mm/min):** mitjana d'intensitat de precipitació estimada, en mil·límetres per minut.
- TPC (%):** percentatge de precipitació convectiva sobre el total de precipitació estimada.
- i 8. NN i NT:** mitjana del nombre de llamps NN i NT per estructura.
- i 10. NN (%) i NT (%):** percentatge de llamps NN i NT en cada una de les fases respecte del total de llamps de cada estructura.
- AP:** nombre de períodes de 6 minuts amb anomalia positiva (més llamps NT positius que negatius).
- i 13. Int. màx.:** intensitat màxima de llamps NN i NT, en llamps/minut.
- Z màx. (dBZ):** reflectivitat màxima registrada, en dBZ.
- A. màx. (km<sup>2</sup>):** àrea màxima assolida per l'estructura, en km<sup>2</sup>.

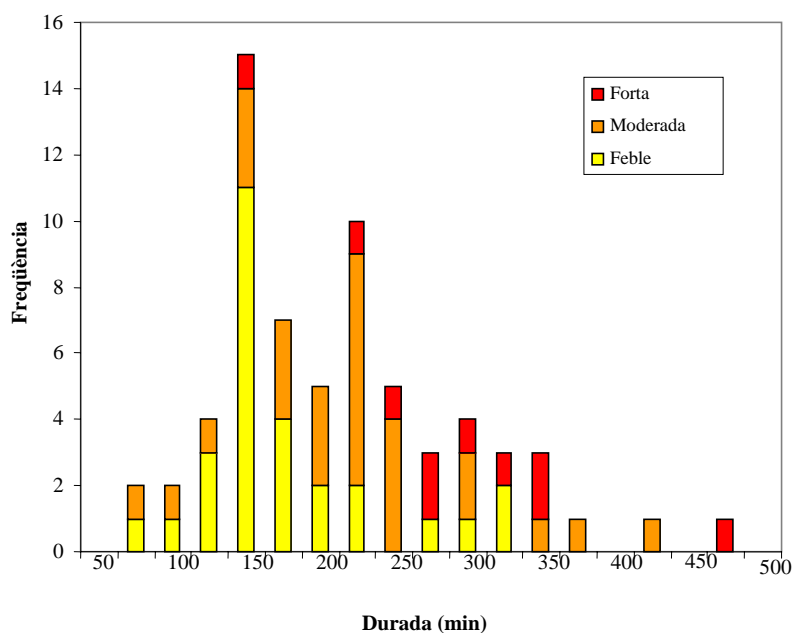


Figura 17. Freqüència de la durada de l'estructura en minuts, per a les tres categories d'intensitat.

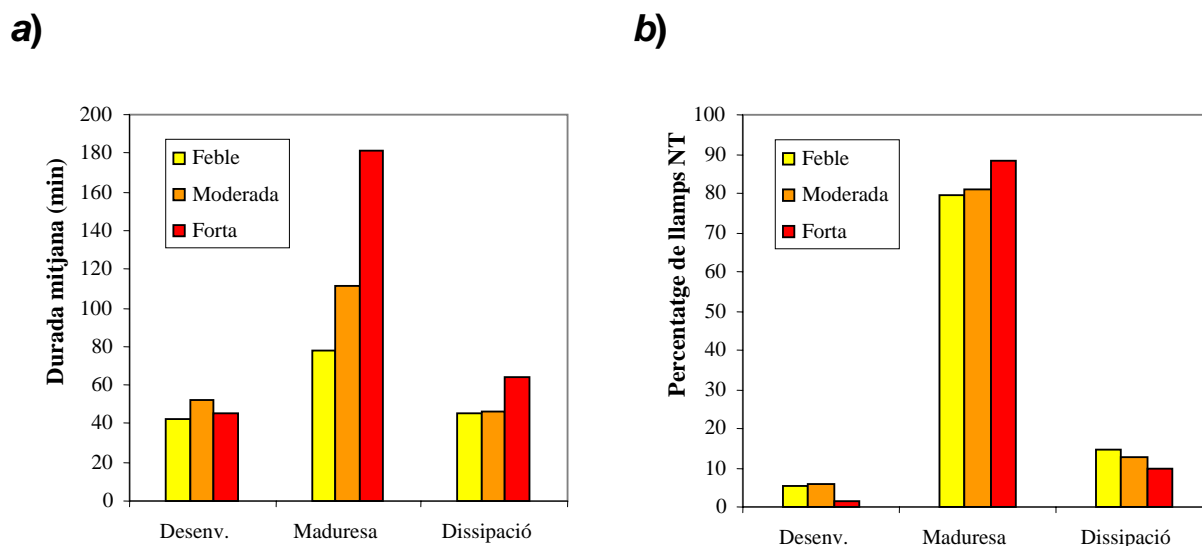
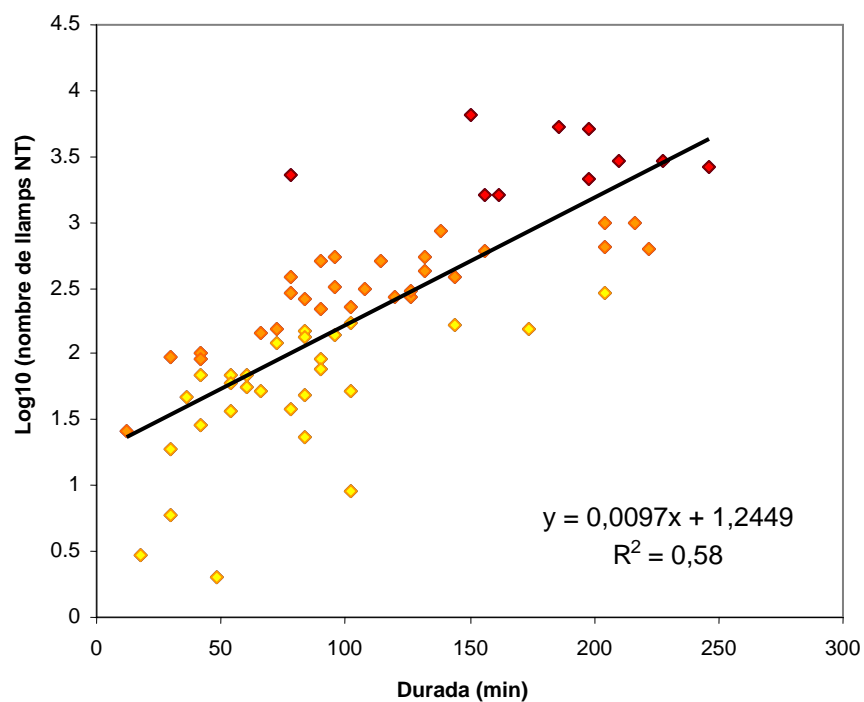


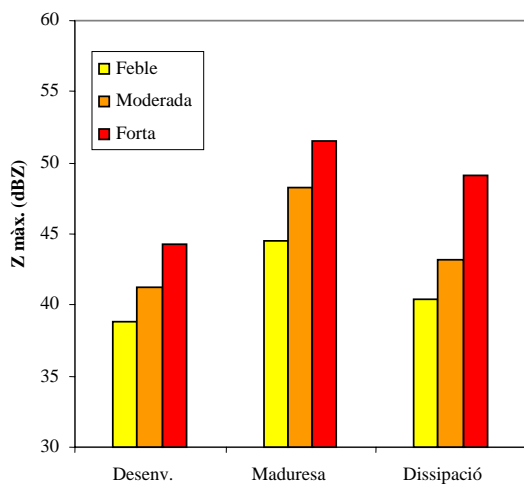
Figura 18. a) Durada mitjana i b) percentatge de llamps NT per als diferents tipus de tempestes a cadascuna de les seves etapes.

La figura 19 concreta aquesta relació, ja que mostra una correlació positiva entre la durada del període de maduresa i el logaritme del nombre de llamps NT observats durant la maduresa de l'estructura per als 66 casos analitzats. Aquesta correlació ja va ser observada per Peckham *et al.* (1984) a Florida.

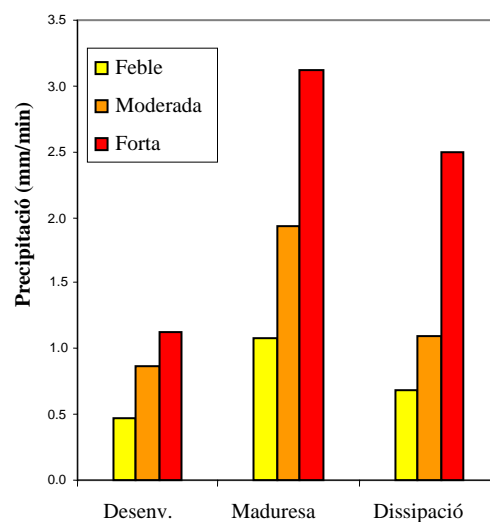


**Figura 19.** Correlació entre el nombre de llamps NT i durada del període de maduresa de l'estructura. Els tres colors corresponen a les tres categories d'intensitat: feble (groc), moderada (taronja) i forta (vermell).

a)



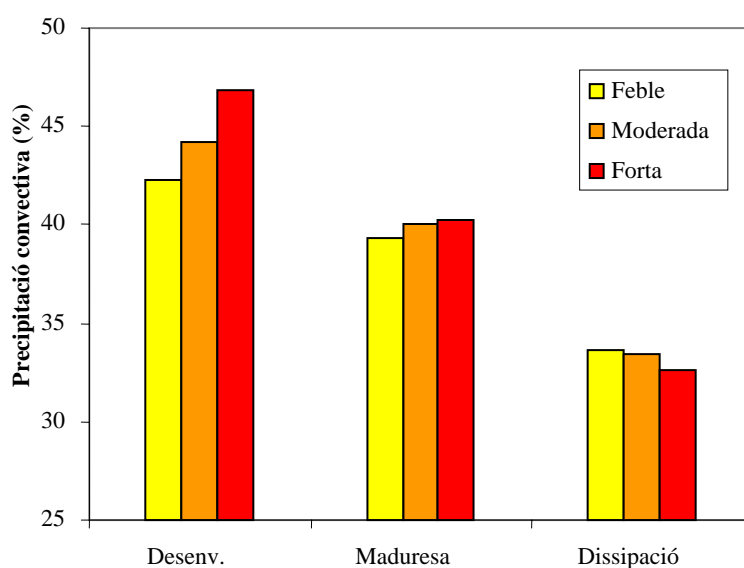
b)



**Figura 20.** Característiques radar (reflectivitat màxima i intensitat de precipitació estimada) per als diferents tipus de tempestes a cadascuna de les seves etapes.

Seguint amb els resultats de la taula 5, si ara ens fixem amb els paràmetres radar, és interessant destacar el següent. La mitjana de tots els màxims (exceptuant-ne el percentatge de precipitació convectiva) s'observa en la fase de maduresa (figura 20). A més, hi ha una relació entre la intensitat de la tempesta i la màxima reflectivitat, l'àrea màxima de l'estructura i la precipitació total estimada. Així, com més intensa és la tempesta (més llamps NT/min) més desenvolupada està l'estructura.

D'altra banda, el percentatge de precipitació convectiva (percentatge de píxels amb precipitació convectiva respecte al total de píxels amb precipitació) està relacionat amb la fase de l'estructura. Es pot apreciar que, a mesura que l'estructura avança en el seu cicle de vida, aquest percentatge es redueix (figura 21).



**Figura 21.** Percentatge de precipitació convectiva per fases i categories d'intensitat.

El percentatge de precipitació convectiva està relacionat amb la fase de la tempesta, de manera que com més avançada està en el seu cicle de vida menys precipitació convectiva cal esperar. Aquest fenomen està associat amb el mateix comportament de les estructures convectives, ja que les intensitats més elevades es donen als moments inicials, mentre que, a mesura que l'àrea de precipitació creix, aquestes intensitats decreixen.

Per a totes les intensitats de les tempestes, la fase de maduresa és la que té una durada més llarga. Però és en el cas de les més intenses quan s'observa una diferència més gran, ja que aquesta fase pot doblar la suma de les durades de les altres dues etapes.

Finalment, tant per a les descàrregues NN com per a les NT s'observa una distribució per etapes bastant semblant: pràcticament tota l'activitat elèctrica es dona a la fase de maduresa, quan el desenvolupament de les tempestes és més gran.

## 4.6. Tempestes amb desenvolupament únic i de múltiple desenvolupament

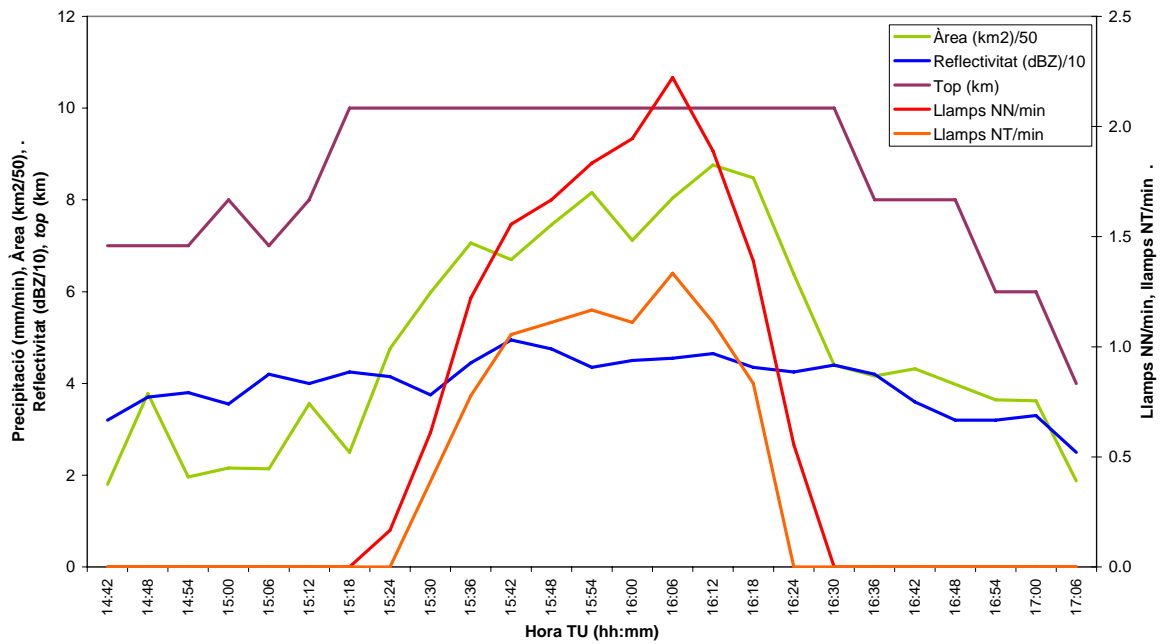
De les 66 estructures estudiades, 25 corresponen a tempestes amb un únic màxim (38%), és a dir, amb un sol desenvolupament del corrent ascendent, mentre que les 41 (62%) restants corresponen a tempestes amb més d'un desenvolupament vertical (cosa que significa que després del primer desenvolupament es produeixen un o més desenvolupaments associats a noves cèl·lules que creixen de manera successiva). Les figures 22 i 23 presenten un exemple dels dos casos. En les de múltiple desenvolupament, durant la maduresa de l'estructura s'observa més d'un màxim d'activitat, màxims successius que corresponen a desenvolupaments convectius que es van encadenant en l'estructura.

La taula 6 presenta la durada total de la fase de maduresa per a les tres categories d'intensitat. Aquesta durada no té en compte si la tempesta és d'un o múltiples desenvolupaments. Si es fa l'exercici de comptar els màxims en cada cas (vegeu taula 6) i es divideix el temps de durada de la fase de maduresa pel nombre de màxims relatius, s'obté una distribució com la que es mostra a la figura 24.

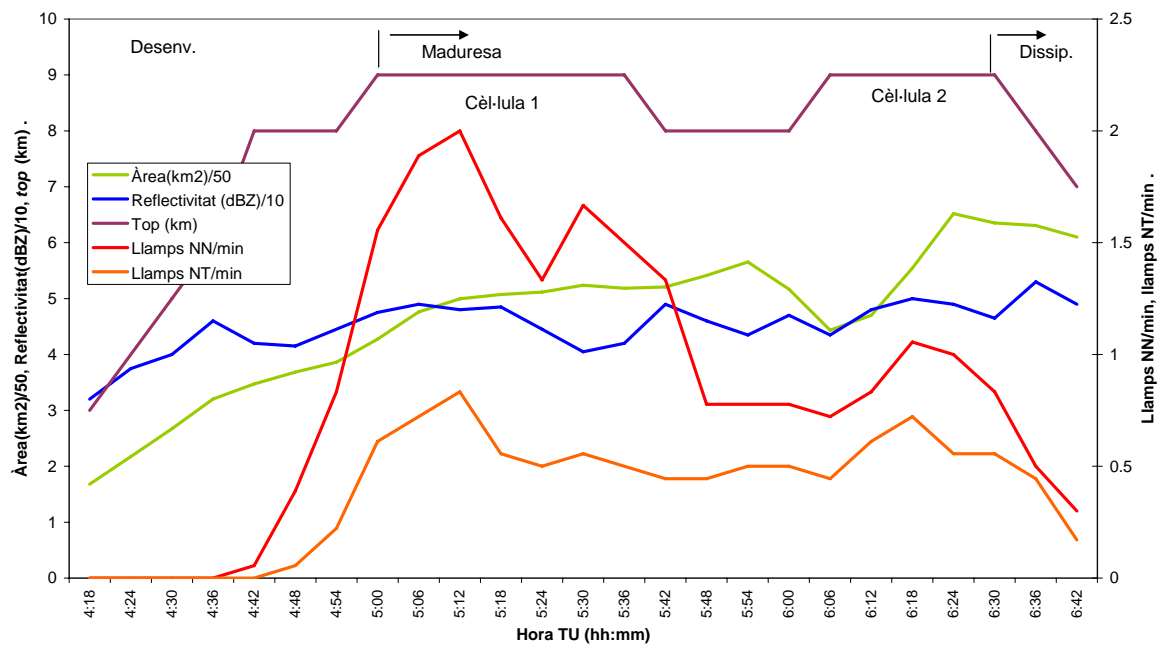
**Taula 6.** Màxims relatius de la fase de maduresa segons les categories d'intensitat.

Màxims	Feble	Moderada	Forta
1	13	11	1
2	13	13	5
3	2	4	4
Total	28	28	10

La durada de la fase de maduresa de les estructures varia en funció de la categoria, i la durada s'allarga en augmentar-ne la intensitat. De mitjana, les estructures d'intensitat feble duren al voltant de 50 minuts, les d'intensitat moderada 60 minuts i les d'intensitat forta 80 minuts. Per contra, la durada de les estructures no sembla dependre del nombre de cèl·lules contingudes a l'estructura (figura 25). Així, no s'observa una agrupació de categories per temps ja que la mitjana de durada per a les tres categories de màxims és similar i volta els 60 minuts.

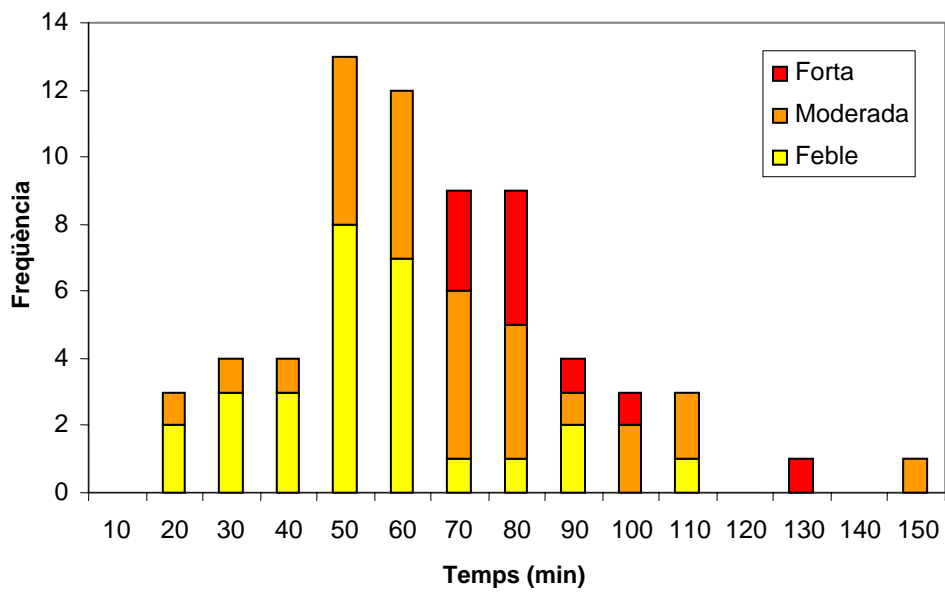


**Figura 22.** Exemple de cicle de vida d'una estructura unicel·lular o de desenvolupament vertical únic (un únic màxim).

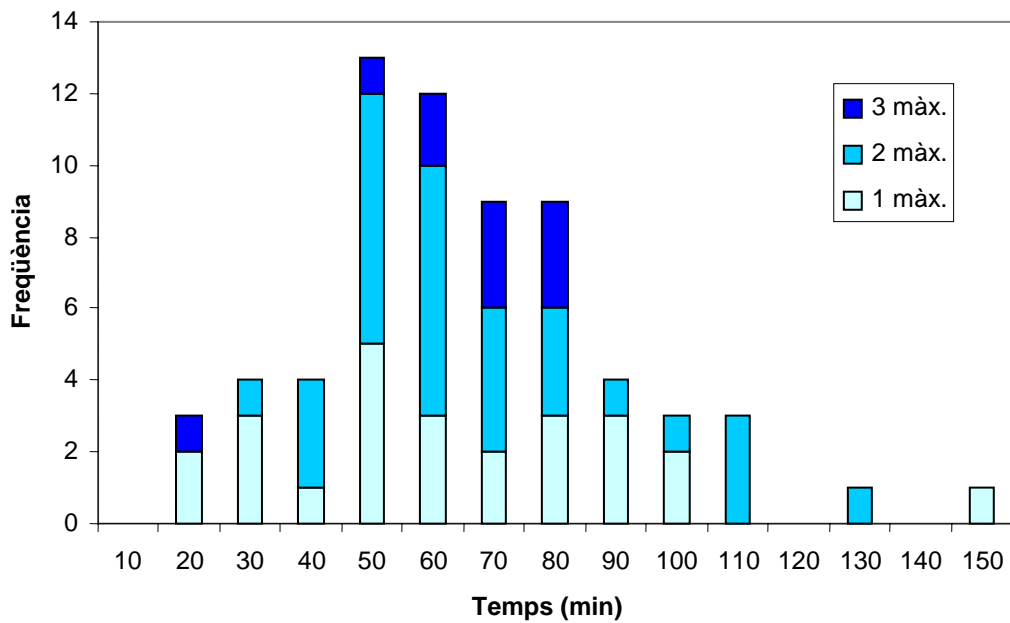


**Figura 23.** Exemple de cicle de vida d'una estructura de múltiple desenvolupament (màxims successius).





**Figura 24.** Freqüència de la durada de la fase de maduresa per a les estructures amb un únic desenvolupament vertical.



**Figura 25.** Freqüència de la durada de la tempesta segons el nombre de desenvolupaments verticals observats al llarg del seu cicle de vida.

#### 4.7. Anàlisi de patrons generals de cicle de vida

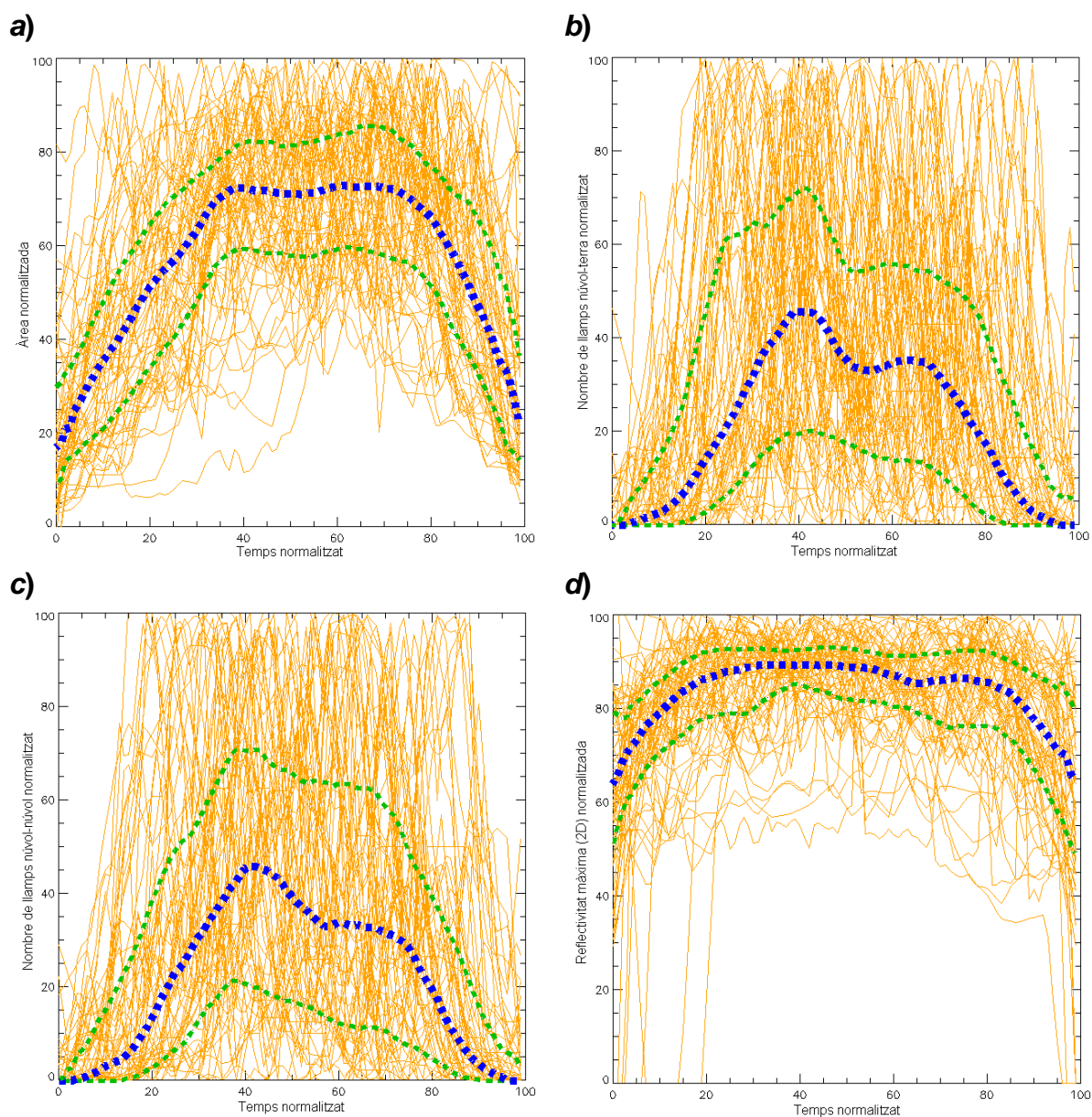
Arran dels resultats exposats anteriorment sembla raonable preguntar-nos si hi ha patrons generals de cicle de vida en els sistemes convectius de precipitació estudiats. Més enllà de l'interès teòric d'aquesta qüestió, si certament existeixen aquests patrons i som capaços de relacionar-los amb una estructura tempestuosa observada, llavors podria derivar-se'n informació pràctica molt interessant per a les tasques de predicció i vigilància meteorològica.

Per exemple, donada una tempesta i identificant el moment en què està en el seu cicle de vida, podria estimar-se la durada que li queda, si té tendència a intensificar-se o dissipar-se, etc. Atesa la gran complexitat de factors que intervenen en el cicle de vida d'una estructura tempestuosa i l'enorme diversitat d'organització de les estructures reals (estructures unicel·lulars, multicel·lulars, etc.) *a priori* sembla difícil establir patrons generals de cicle de vida que puguin resultar d'utilitat amb una mínima fiabilitat.

Per tal de buscar patrons generals s'ha visualitzat simultàniament l'evolució de les diferents estructures considerades. Atesos els diferents valors màxims assolits per a cada estructura s'ha optat per normalitzar respecte a 100 les magnituds considerades. Igualment s'ha normalitzat respecte a 100 la durada de cada estructura. D'aquesta manera es pot apreciar el cicle de vida en termes relatius de màxims comparables entre les diferents estructures, sense importar el valor absolut assolit per cadascuna ni la seva diferent durada.

Seguint aquest procediment s'ha elaborat la figura 26, que mostra la visualització d'evolucions temporals normalitzades de quatre magnituds: àrea de l'estructura, densitat de descàrregues núvol a terra, densitat de descàrregues núvol a núvol i reflectivitat radar màxima de l'estructura convectiva 2D (RAD2). Per obtenir informació addicional, per a cada instant de temps (discretitzats d'1 a 100) també s'ha calculat els percentils 25, 50 i 75 de la distribució de valors de cada magnitud. Això permet obtenir una mesura de la dispersió de la distribució.

La inclusió de les corbes de percentils 25, 50 i 75 (P25, P50 i P75) apunta patrons de comportament generals per a les tres magnituds examinades durant el cicle de vida de les estructures. Totes tres magnituds segueixen clarament una fase inicial de creixement, una fase intermèdia en què el creixement s'atura o comença a invertir-se i una tercera fase final en què predomina el decreixement. Aquest fet sembla remarcable, tenint present que a l'anàlisi s'hi inclouen tant estructures unicel·lulars com multicel·lulars. Cal notar que aquestes tres fases no coincideixen necessàriament amb les proposades en apartats anteriors ja que aquí les fases es deriven de l'evolució de magnituds individuals i no del conjunt de magnituds.



**Figura 26.** Evolució temporal de quatre magnituds de les estructures convectives normalitzades respecte als valors màxims absoluts (eix y) i respecte a la seva durada (eix x): cada línia taronja representa l'evolució temporal de la magnitud d'una sola estructura. També s'hi representen els percentils 25 i 75 (línies verdes) i percentil 50 (línia blava) de totes les estructures per a un instant concret. Les magnituds representades són: a) àrea de l'estructura, b) densitat de descàrregues NT, c) densitat de descàrregues NN i d) reflectivitat radar màxima de l'estructura convectiva 2D.

La figura 26a mostra que el 50% de les estructures tenen una fase inicial de creixement de la seva àrea durant el 40% del seu cicle de vida total. A la fase intermèdia, que per a la mediana correspon del 40 al 70% del temps, l'àrea (mediana) de les estructures no varia substancialment del 70% del màxim normalitzat. Cal aclarir que per a la major part d'estructures és en aquesta part on s'assoleix el valor màxim de tot el cicle de

vida. Finalment, es pot remarcar que la fase de decreixement és relativament més breu que la fase inicial: l'estructura minva la seva àrea durant el 25% final del seu cicle, enfront del 40% del temps requerit per al creixement. Globalment, malgrat aquesta lleugera asimetria en la fase de creixement i decreixement, les corbes de percentils són gairebé simètriques respecte al temps. A més, sembla interessant constatar que la distància interquartil, definida com la diferència entre P75 i P25, es manté gairebé constant al llarg de tot el cicle de vida (aproximadament un 10% del valor màxim normalitzat).

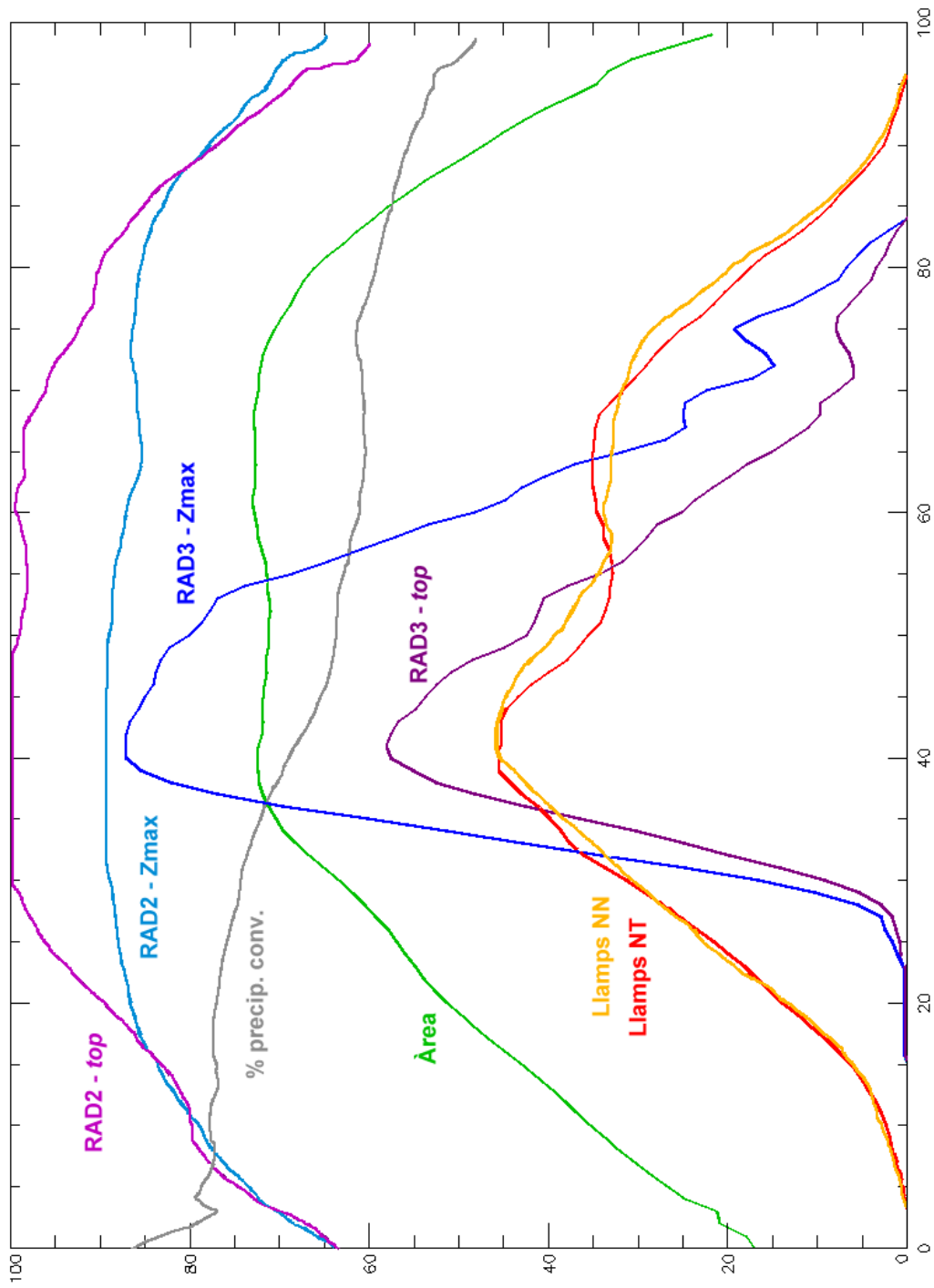
A les figures 26b i 26c s'aprecia com els patrons dels cicles de vida de la densitat de descàrregues NN i NT són similars i lleugerament diferents del patró d'àrees representat a la figura 26a. Efectivament, ara els patrons són més asimètrics que abans i mostren, en tots dos casos, un primer màxim situat al 40% del cicle de vida, una certa dissipació que es frena al voltant del 70% i, a partir d'aleshores, un descens decidit en la fase final. Una altra diferència remarcable és que ara les distribucions de densitats varien apreciablement al llarg del cicle de vida: la distància interquartil varia entre 20% i valors que poden superar el 50% a la fase de maduresa. A més ara la corba de la mediana no arriba a superar el 40% dels valors màxims normalitzats. És interessant observar com les descàrregues elèctriques defineixen un patró d'estructures amb dos màxims: un màxim principal en el 40% del temps i un de secundari en el 70%. Aquests màxims, en canvi, no es reflecteixen en el cicle de vida de l'àrea. Una possible explicació és que els màxims secundaris apareixen en estructures que ja estan ben definides i que no perden àrea —ni n'augmenten— fins que entren en dissipació.

La figura 26d mostra el valor de reflectivitat màxima observat a l'estructura convectiva radar 2D (RAD2). En aquest cas es veu com els percentils P25, P50 i P75 estan per sobre del 50% del valor màxim durant tot el temps. No obstant això, la forma de l'evolució general és similar als casos anteriors i presenten les tres etapes temporals típiques (inicial, intermèdia i dissipació).

La figura 27 presenta l'evolució normalitzada de la mediana (percentil P50) del conjunt de magnituds analitzades. A part de les quatre magnituds presentades amb més detall a la figura 26, la figura 27 inclou la mediana del *top*, tant per a estructures 2D com 3D, de la reflectivitat màxima (2D i 3D) i del percentatge d'àrea de precipitació convectiva respecte al total d'àrea amb precipitació. Es pot observar com la mediana del *top* de les estructures 2D se satura quan l'estructura arriba als voltants del 30% de la durada normalitzada. Aquest valor del 100% no és un error, sinó que indica que arribat a aquest punt del cicle de vida la mediana del *top* supera els 10 km, valor en què se satura la magnitud calculada (els *top* superiors agafen aquest valor).

Respecte del comportament diferenciat dels dos paràmetres d'estructures 3D representats a la figura 27, cal tenir present els llindars que s'apliquen als paràmetres radar per definir aquestes estructures. La durada total de l'estructura està determinada per l'estructura 2D, i només quan l'estructura assolix un major grau de desenvolupament, es donen les característiques perquè l'estructura sigui 3D. Aquestes condicions es donen al voltant del 30% de la durada normalitzada del cicle de vida, moment en el qual s'observen grans desenvolupaments verticals a l'estructura. L'increment sobtat del *top* i del *Zmax* 3D en aquest punt no indica que els valors de *Zmax* o de *top* s'incrementin en poc temps en un 80%, sinó que aquests han superat el llindar 3D. Així mateix, les estructures 3D s'extingeixen abans que les 2D, al voltant del 80% del temps del cicle de vida.

Finalment, el percentatge de precipitació convectiva és l'única magnitud que no es comporta seguint el patró creixement-decreixement, sinó que bàsicament decreix al llarg de tot el cicle de vida. Aquest comportament, que ja es mostrava a la figura 21, reflecteix com els processos de convecció van perdent presència a mesura que l'estructura avança en el seu cicle de vida.



**Figura 27.** Evolució temporal de la mediana (P50) del conjunt de magnituds estudiades de les estructures convectives normalitzades respecte als valors màxims assolits (eix y) i respecte a la seva durada (eix x).

## 5. Valoracions i treball futur

### 5.1. Valoracions generals

La necessitat de conèixer en temps real l'evolució i l'estat actual d'una estructura de precipitació vista a partir de les xarxes de radars (volums de la composició dels diferents radars) i de detectors de descàrregues elèctriques atmosfèriques (descàrregues de núvol a núvol i de núvol a terra) del Servei Meteorològic de Catalunya ha motivat el desenvolupament d'una eina que combina les observacions d'ambdós sistemes i permet l'estudi del cicle de vida de les estructures.

La informació generada per aquesta eina ha permès fer un seguiment de diferents tempestes que van afectar Catalunya durant l'estiu de 2006. Aquestes dades han servit per desenvolupar models de comportament de diferents paràmetres, tant radar com referits a llamps, amb l'objectiu de tenir un més bon coneixement d'aquelles tempestes que produeixen temps sever o una elevada quantitat de llamps.

En total, s'han seleccionat 66 tempestes que complien els requisits següents:

- Tenien una durada superior a 50 minuts.
- Eren fàcils de seguir en el temps i l'espai: no s'observava fusió ni fissió d'estructures.
- Començaven i acabaven a la zona d'estudi.
- S'observaren descàrregues elèctriques en algun moment.

El resum de les característiques generals de les estructures observades durant l'estiu de 2006 està caracteritzat per:

- Moltes de les estructures que afectaren Catalunya es formaven fora de l'abast del producte radar emprat, concretament a la zona del Sistema Ibèric, i es desplaçaven cap a l'est.
- Cal tenir present que les estructures examinades representen el 16% del total d'estructures observades durant el període d'estudi; no obstant això, basant-nos en els resultats obtinguts, aquesta mostra es considera prou representativa.
- Pel que fa a les tempestes nascudes dins de la cobertura de la XRAD, la gran majoria es van generar a les comarques pirinenques (especialment, la Cerdanya, el Berguedà i la Vall d'Aran) i a les del sud (el Montsià, el Baix Ebre, el Baix Camp i el Tarragonès), així com a sobre del mar.

- La formació de les més allunyades de la influència marítima es deu al màxim en el cicle d'escalfament diürn (cap a les 12 TU), mentre que les que es generaren a prop de la costa o sobre el mar ho feren més a la nit.
- S'observà una clara influència del cicle diürn en la formació d'un gran nombre d'estructures, ja que moltes es generaren entre les 12 i les 14 TU i finalitzaren entre les 17 i les 19 TU.

A partir de la bibliografia consultada en aquest estudi, s'ha considerat necessari fer una sèrie de consideracions:

- L'estructura té l'evolució següent durant el seu cicle de vida: desenvolupament, maduresa i dissipació. S'ha considerat que els paràmetres que delimiten aquestes fases són el desenvolupament vertical vist des del radar (*top*), els llamps núvol-núvol i l'àrea total de l'estructura.
- Segons el seu cicle de vida, una tempesta pot presentar un únic desenvolupament vertical (el que es coneix generalment com a cèl·lula individual) o diferents desenvolupaments (que s'han de produir de manera consecutiva i no han de coincidir en el temps).
- A partir de la intensitat de la tempesta (mitjana de llamps per minut durant la fase de maduresa) s'han classificat en febles (< 2 NT/min), moderades (2-10 NT/min) i fortes (> 10 NT/min).

A partir dels aspectes anteriors, es poden treure les valoracions següents de les tempestes analitzades:

- Només un 38% de les 66 estructures analitzades presenten un únic desenvolupament, és a dir, que en un gran nombre de casos en què es dona activitat elèctrica hi ha un sistema de regeneració de les cèl·lules convectives. Cal recordar que en aquest estudi no s'han considerat estructures amb més d'una cèl·lula convectiva simultànies.
- La durada mitjana de les estructures analitzades és superior a les 3 hores, i la fase de maduresa és la que abasta la major part del seu cicle de vida (poc més de la meitat).
- La major part de llamps es donen durant la fase de maduresa, tot i que no cal descartar observar llamps en les altres etapes, especialment en la de dissipació. Tot i que no és gaire habitual, s'ha observat en alguns casos el fenomen de l'anomalia positiva (més descàrregues positives que negatives), el qual pot indicar fenòmens de temps sever.
- L'àrea de l'estructura i la reflectivitat mitjana també presenten els seus màxims durant la maduresa, mentre que el tant per cent màxim de precipitació convectiva es dona durant el desenvolupament. Això s'explica per la natura de les tempestes, que tot i intensificar-se durant la maduresa (fase en què també

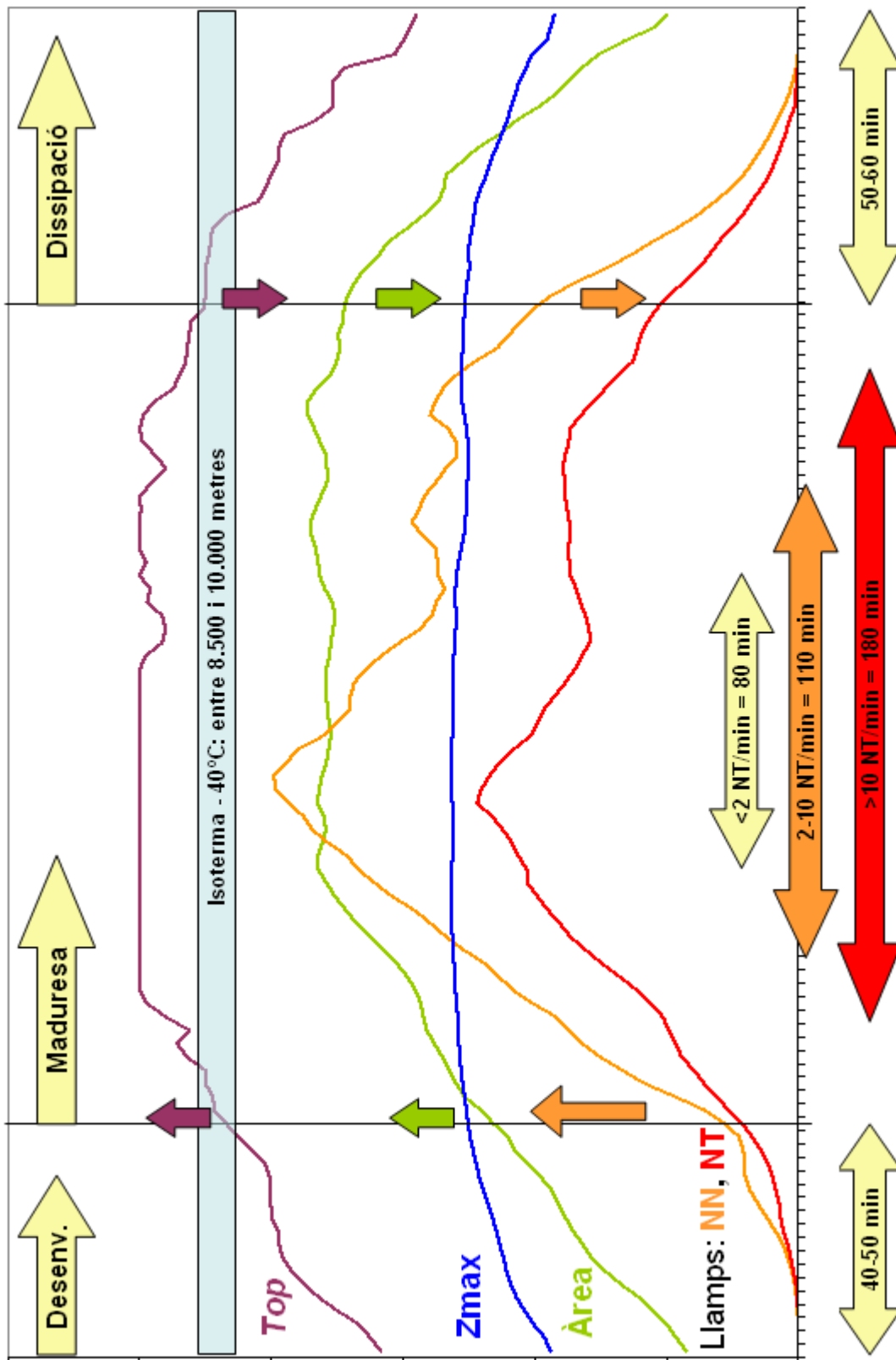


s'observen la major part dels fenòmens de tipus sever) també presenten més precipitació de tipus estratiforme a les zones exteriors.

- Considerant la relació entre la intensitat i les diferents fases de la tempesta, s'ha pogut observar que les característiques lligades a activitat elèctrica i paràmetres radar són més accentuades (per exemple, més activitat elèctrica a la fase de maduresa) com més intensa és l'estructura. També cal destacar que hi ha una bona correlació entre la durada de la tempesta i la seva intensitat de descàrregues elèctriques.

A partir de les observacions anteriors es conclou que, tot i que hi ha excepcions, sembla possible obtenir uns patrons generals del comportament de les tempestes a partir del cicle de vida de diferents paràmetres d'observacions combinades de radar i detectors de descàrregues elèctriques. Per aquest motiu, es va aplicar només a tempestes amb un únic desenvolupament vertical una normalització de diferents variables, tant pel que respecta a la mateixa magnitud com pel que fa a la durada. A més, es van calcular els percentils de 25, 50 i 75 de la distribució de valors de les diferents magnituds per cada instant de temps normalitzat. S'ha pogut observar com les corbes del percentil 50 mostren un clar patró de comportament entre les diferents variables. Aquestes corbes es podrien aplicar en un futur per millorar la predicció a curt termini de l'evolució de les variables associades a cada tempesta.

A tall de resum, a la figura 28 es presenta un esquema de l'evolució temporal de les estructures convectives analitzades. Les magnituds que s'hi presenten són les que són de més fàcil seguiment per a un predictor amb les eines de què disposa per a les tasques de vigilància meteorològica en temps real. La figura inclou els criteris considerats en la identificació de les fases del cicle de vida, així com la durada mitjana de les fases, segons els resultats de la taula 5. Segons aquests resultats, la durada de les fases de desenvolupament i dissipació són bastant similars en totes les estructures. D'altra banda, la durada de la fase de maduresa és força variable, i en la figura s'observen les durades mitjanes en funció de la intensitat mitjana de NT/min, magnitud que es fa servir a l'hora de definir la intensitat de la tempesta.



**Figura 28.** Patró de l'evolució temporal de les estructures convectives. Les unitats dels eixos són arbitràries, perquè tant el valor de les magnituds (eix y) com la durada de la vida de les estructures (eix x) varien en funció de cada estructura; no és el cas del patró de comportament temporal, que és el que es reflecteix a la figura.

## 5.2. Treball futur

Els resultats obtinguts en aquest estudi permeten aportar informació sobre el comportament general de les estructures i semblen confirmar l'existència de patrons definits en les dades analitzades. Confirmar aquest patró permetria aplicar-lo en sistemes de predicció immediata, per exemple incorporant una informació del cicle de vida en les estructures observades i projectar una tendència en el pronòstic segons el seu creixement, manteniment o decreixement. En aquest sentit, com a treball futur es consideren diverses tasques:

- Ampliar l'anàlisi, diferenciant l'existència d'un o més màxims en la freqüència de descàrregues elèctriques, per tal d'avaluar si els patrons de cicle de vida associats en cada cas difereixen dels obtinguts en aquesta primera anàlisi.
- Donada una estructura observada, es planteja identificar operativament la fase en què està segons el model de cicle de vida desenvolupat.
- Atesos els resultats prometedors de la metodologia desenvolupada per estructures amb un únic nucli convectiu simultani, es planteja ampliar aquest treball a estructures multicel·lulars.
- Aplicar una tècnica de predicció a curt termini o *nowcasting* per als objectes integrats, basat en àrees de probabilitats i el model de cicle de vida, per tal d'ajudar en les tasques de vigilància als predictors del Servei Meteorològic de Catalunya.

## **6. Bibliografia**

- Aran, M., A. Sairouni, J. Bech, J. Toda, T. Rigo, J. Cunillera, J. Moré, 2007: Pilot project for intensive surveillance of hail events in Terres de Ponent (Lleida). *Atmos. Res.* 83, 2-4, 315-335.
- Bech, J., E. Vilaclara, N. Pineda, T. Rigo, J. López, F. O'Hora, J. Lorente, D. Sempere, F. X. Fàbregas, 2004: The weather radar network of the Catalan Meteorological Service: description and applications. *Proceedings of ERAD (2004)*: 416–420. Copernicus GmbH.
- Bech, J., R. Pascual, T. Rigo, N. Pineda, J. M. López, J. Arús, M. Gayà, 2007: An observational study of the 7 September 2005 Barcelona tornado outbreak. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 129–139.
- Brovelli, P., S. Sényesi, E. Arbogast, P. Cau, S. Cazabat, M. Bouzom, J. Reynaud, 2005: Nowcasting thunderstorms with SIGOONS: a significant weather object oriented nowcasting system. *Proceedings of the International Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting (WSN05)*.
- Burgess, D., L.R. Lemon, 1990: Severe Thunderstorm Detection by Radar. *Radar in Meteorology*. (Ed. D. Atlas). American Meteorological Society, 619-647.
- Carey, L. D., S.A. Rutledge, 1996: A multiparameter radar case study of the microphysical and kinematic evolution of a lightning producing storm. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 59, 33– 64.
- Carey, L. D., S. A. Rutledge, W. A. Petersen, 2003a: The relationship between severe storm reports and cloud-to-ground lightning polarity in the contiguous United States from 1989 to 1998. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 1211-1228.
- Carey, L. D., W. A. Petersen, S. A. Rutledge, 2003b: Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, SD supercell of 30 May 1998, *Mon. Weather Rev.*, 131, 1811 – 1831.
- Chisholm, A. J., J. H. Renick, 1972: The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms, *Alberta Hail Studies*, 1, Rep. 72-2, 24-31.
- Circe, M., F. Martín, 2003: Identificación y seguimiento automático de estructuras convectivas a partir de datos de radares meteorológicos. *Nota técnica del STAP*, nº 39. Instituto Nacional de Meteorología.
- Collier, C.G., 1989: *Applications of Weather Radar Systems*. Ellis Horwood Ltd., ISBN 0-7458-0510-8, 249 pp.
- Conway, B.J., 1999: An Overview of Nowcasting Techniques. SAF Training Workshop: Nowcasting and Very Short Range Forecasting. EUMETSAT. EUM p 25, 1999. ISBN 92-9110-030-7, 34-43.
- Demetriades, N., M., Murphy, P. Richard, 2003: The advantages of total lightning over CG lightning for thunderstorms cell identification and tracking and its complements to radar reflectivity. *Proceed. 12th International Conference on Atmospheric Electricity*.
- Dixon, M., Wiener, G., 1993, TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A Radar-based Methodology, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10 (6), 785–797.

- Doswell, C.A. III, 2001: Severe Convective Storms – An Overview; Severe Convective Storms, Meteor. Monogr., 28, no. 50, Amer. Meteor. Soc., 13-26.
- Doswell, C.A. III, 2007: Historical overview of severe convective storms research. E-Journal of Severe Storms Meteorology, 2, 1, 1-25.
- Doswell, C.A. III, H.E. Brooks, R. A. Maddox, 1996: Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology. Wea. Forecasting, 11, 560–581.
- Dotzek, N., R.M. Rabin, L.D. Carey, D.R. MacGorman, T.L. McCormick, N.W. Demetriades, M.J. Murphy, R.L. Holle, 2005: Lightning activity related to satellite and radar observations of a mesoscale convective system over Texas on 7-8 April 2002. Atmos Res., 76, 127-166.
- Fontserè, E., 1948: Assaig d'un vocabulari meteorològic català. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona. Versió en línia a: <http://www.infomet.fcr.es/assaig>
- Hand, W.H., 1996: An object oriented technique for nowcasting heavy showers and thunderstorms. Meteorol. Appl., 3, 31–41.
- Hand, W.H., B. J. Conway, 1996: An object-oriented approach to nowcasting showers. Wea. Forecasting, 10, 327-341.
- Henry, S. G., 1993: Analysis of thunderstorm lifetime as a function of size and intensity. Preprints of the 26<sup>th</sup> Conference on Radar Meteorology, Norman, OK. 3 pp.
- Johnson, J.T., P.L. MacKeen, A. Witt, E.D. Mitchell, G.J. Stumpf, M.D. Eilts, K. W. Thomas., 1998: The storm Cell Identification and Tracking (SCIT) Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm. Wea. Forecasting. 13, 263-276.
- Keenan, T., P. Joe, J. Wilson, C. Collier, B. Golding, D. Burgess, P. May, C. Pierce, J. Bally, A. Crook, A. Seed, D. Sills, L. Berry, R. Potts, I. Bell, N.I. Fox, E. Ebert, M. Eilts, K. O'Laughlin, R. Webb, R. Carbone, K. Browning, R. Roberts, C. Mueller, 2003: The Sydney 2000 World Weather Research Programme Forecast Demonstration Project: Overview and current status. Bulletin of the American Meteorological Society, 84, 1041-1054.
- Lang, T. J., S. A. Rutledge, J. E. Dye, M. Venticinque, P. Laroche, E. Defer, 2000: Anomalously low negative cloud to ground lightning flash rates in intense convective storms observed during STERAOA. Mon. Wea. Rev., 128, 160-173.
- Lang, T. J., S.A. Rutledge, 2002: Relationships Between Convective Storm Kinematics, Microphysics, and Lightning. Mon. Wea. Rev., 130, 2492-2506.
- Llasat, M.C., 2001: An objective classification of rainfall events on the basis of their convective features. Application to rainfall intensity in the North-East of Spain. Int. J. Climatol., 21, 1385-1400.
- MacGorman, D. R., D. W. Burgess, V. Mazur, W. D. Rust, W. L. Taylor, B. C. Johnson, 1989: Lightning rates relative to tornadic storm evolution on 22 May 81. J. Atmos. Sci., 46, 221–250.
- MacKeen, P. L., H.E. Brooks, and K. L. Elmore, 1999: Radar reflectivity-derived thunderstorm parameters applied to storm longevity forecasting. Wea. Forecasting, 14, 289-295.
- Martín, F., F. Elizaga, O. Carretero, I. San Ambrosio, 2007: Diagnóstico y Predicción de la Convección Profunda Nota Técnica del STAP N° 35. STAP/INM.
- Medaglia, C.M., C. Adamo, M. Formenton, F. Piccolo, 2005: Nowcasting of convective cells over Italian Peninsula. Advances in Geosciences, 2, 173–176.

- Montanyà, J., N. Pineda, V. March, A. Illa, D. Romero, G. Solà, 2006: Experimental evaluation of the Catalan Lightning Location Network, in: 19th Int. Lightning Detection Conf., Tucson, Arizona, USA.
- Montanyà, J., S. Soula, N. Pineda, 2007: A study of the total lightning activity in two hailstorms J. Geophys. Res., 112, D13, D13118.
- Pascual, R. 1999: Estudio de precipitaciones intensas en la comarca catalana del Maresme. Nota Técnica del Centro Meteorológico Territorial de Catalunya N°1. Instituto Nacional de Meteorología.
- Peckham, D. W., M. A. Uman, C.E. Wilcox, Jr., 1984: Lightning phenomenology in the Tampa Bay area. J. Geophys. Res. 89, 11789- 11805.
- Petersen, W. A., S. A. Rutledge, R. E. Orville, 1996: Cloud-to-ground lightning observations in TOGA COARE: Lightning location algorithms and selected results. Mon. Wea. Rev., 124, 602-620.
- Pineda, N., T. Rigo, J. Bech, X. Soler, 2007: Lightning and precipitation relationship in summer thunderstorms: Case studies in the North Western Mediterranean region. Atmospheric Research, Atmospheric Research, 85, 2, 159-170.
- Pineda N., Bech, J., Rigo, T., Montanyà, J., 2004: A study of thunderstorm characteristics using lightning and weather radar observations. In 18th Int. Lightning Detection Conf.. Helsinki, Finland. Ref. 25, p.14.
- Pineda, N., J. Bech, T. Rigo, L. Trapero, 2006: Comparison of radar precipitation fields with lightning observations. Fourth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD2006), Barcelona 18-22 September 2006.
- Rakov, V.A., Uman, M.A., 2003: Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, 687 pp.
- Richard, P., J.Y. Lojou, 1996: Assessment of application of storm cell electrical activity monitoring to intense precipitation forecast. Proceedings of the 10th International Conference on Atmospheric Electricity, June 10-14, Osaka, Japan, 284-287.
- Rigo, T., M.C. Llasat, 2004: A methodology for the classification of convective structures using meteorological radar: Application to heavy rainfall events on the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4 (1), 59-68.
- Rigo, T., J.Bech, N. Pineda, 2005: Combining lightning and radar data to improve the nowcasting of summer thunderstorms. Proceedings of the International Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting (WSN05).
- Rivas Soriano, L., F. De Pablo, C. Tomas, 2005: Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula. J. Atmos. Terr. Phys., 67 (16), 1632–1639.
- Sairouni, A., J.R. Miró, J. Moré, J. Bech, T.Rigo, 2007: Impact of assimilation of observations into the MASS and MM5 models short-range forecast. EGU General Assembly 2007.
- Soul, K.M., E.J. Archibald, P.J. Hardaker, A. Hounsell, 2002: Using the GANDOLF system as a tool to aid the forecasting of lightning strikes. Meteorol. Appl., 9, 229-238.
- Soula, S., Y. Seity, L. Feral, H. Sauvageot, 2004: Cloud-to-ground lightning activity in hail-bearing storms, J. Geophys. Res., 109, D2.
- Stolzenburg, M., W. D. Rust, T. C. Marshall, 1998: Electrical structure in thunderstorm convective regions. 2. Isolated storms. J. Geophys. Res., D103, 14079-14096.

- Trapero, L., T. Rigo, J. Bech, N. Pineda, R. Sánchez-Diezma, 2006: Assessing the uncertainty of quantitative precipitation estimates of the Meteorological Service of Catalonia weather radar network. Fourth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD2006), Barcelona 18-22 September 2006.
- UCAR, The University Corporation for Atmospheric Research, "Anticipating Convective Storm Structure and Evolution", mòduls COMET: <http://www.comet.ucar.edu/>
- VAISALA, Inc., 2000, Manual of SAFIR: Total lightning and thunderstorm forecasting system.
- Weisman, M.L., Klemp, J.B., 1986: Characteristics of isolated convective storms. Mesoscale meteorology and forecasting. In: Ray, P.S. (Ed.), Amer. Meteor. Soc., 331–357.
- Wiens, K. C., S. A. Rutledge, S. A. Tessendorf, 2005: The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure. J. Atmos. Sci., 62, 4151– 4177.
- Williams, E.R., Weber, M.E., Orville, R.E., 1989: The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds. J. Geophys. Res. 94 (D11), 13213–13220.
- Williams, E., B. Boldi, A. Matlin, M. Weber, 1999: The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. Atmos. Res., 51, 245-265.
- Williams, E.R., 1989: The tripole structure of thunderstorms, J. Geophys. Res. 94, 13151–13167.
- Wilson, N.L., D. W. Breed, C. K. Mueller, T. R. Saxen, N. W. S. Demetriades, 2006: The performance analysis of total lightning in NCAR's Auto-Nowcaster. Proceed. Second Conference on Meteorological Applications of Lightning Data.
- Zipser, E. J., K. R. Lutz 1994: The vertical profile of indicator of storm intensity and lightning probability. Mon. Wea. Rev., 122, 1751-1759.

## 7. Glossari

**Calamarsa:** d'acord amb el manual d'estil de l'SMC, la calamarsa és un hidrometeor constituït per grans de glaç arrodonits i mig transparents, inferiors a 10 mm de diàmetre. Aquesta definició és similar però menys restrictiva que la de l'*Assaig de vocabulari* de Fontserè (1948), "grans d'aigua solidificada, mig transparents, rodons, rarament cònics, de 2 a 5 mm de diàmetre. Sovint tenen un nucli de calabruix cobert per una clovella de glaç. Àdhuc quan cauen sobre un terreny dur, el cobreixen sense trencar-se, i són difícils d'aixafar".

**CAPPI:** sigla de l'expressió anglesa *constant altitude plan position indicator*. Es tracta d'un producte radar obtingut a partir d'una sèrie de PPI (vegeu PPI en aquest glossari) representatiu d'una mateixa altitud. Per exemple, en el CAPPI 1 km de reflectivitat, les observacions corresponen aproximadament a 1 km d'altitud.

**Convecció profunda:** la que es desenvolupa en entorns de forts corrents ascendents, i els cims dels núvols arriben a superar el nivell de 500 hPa.

**EQP:** sigla de *estimació quantitativa de precipitació*, expressió usada sovint en relació amb la mesura indirecta de precipitació obtinguda a partir de les dades de reflectivitat del radar meteorològic. Cal recordar que la reflectivitat és una mesura de la intensitat de l'energia retrodispersada pels blancs il·luminats per l'energia emesa pel radar. La conversió de reflectivitat a precipitació no és trivial i depèn de nombrosos factors.

**Escala de Fujita:** segons el diccionari de la Societat Meteorològica Americana, escala que associa de manera indirecta la intensitat d'un tornado amb els danys estructurals que aquest provoca.

**Flotabilitat:** (de l'anglès *buoyancy*) segons el glossari de la Societat Meteorològica Americana, propietat d'un objecte que permet que aquest floti a la superfície d'un líquid, o bé pugi pel seu interior mantenint-lo lliurement suspès en un fluid compressible tal com ara l'atmosfera.

**Llamp (*lightning flash*):** descàrrega elèctrica que es produeix entre dos núvols, entre diferents parts d'un mateix núvol o bé entre un núvol i la superfície terrestre. En els dos primers casos parlem d'un llamp núvol-núvol (NN, *intracloud flash*) mentre que si l'impacte es produeix entre un núvol i el terra parlem d'un llamp núvol-terra (NT) (*cloud-to-ground flash*).

**Pedra:** d'acord amb el manual d'estil de l'SMC, la pedra és un hidrometeor format per grans de glaç arrodonits i mig transparents, amb un diàmetre igual o superior a 10 mm. Segons l'*Assaig de vocabulari* de Fontserè (1948), "trossets de glaç irregulars, d'una grandària des de la d'un pèsol fins a la del puny. Són o bé enterament transparents, o bé fets de clovelles alternativament clares i opaques".



**Polaritat:** la descàrrega de retorn (*return stroke*) associada al llamp origina un fort corrent elèctric. Si el llamp connecta una zona de càrrega negativa del núvol amb una zona de càrrega positiva del terra, la descàrrega de retorn és negativa. Si la distribució de càrregues és a la inversa, llavors la descàrrega és positiva. El llamp pot contenir diverses descàrregues, que acostumen a tenir el mateix signe. Només en alguns casos hi ha una barreja de descàrregues negatives i positives en el mateix llamp. Aquests llamps s'anomenen de polaritat mixta. A l'hora de catalogar aquests llamps en una de les dues polaritats, es considera la polaritat de la primera descàrrega de retorn.

**PPI:** sigla de l'expressió anglesa *plan position indicator*. Mode d'adquisició d'observacions radar consistent a fer un escombratge d'antena amb un angle d'elevació constant i variant l'azimut. A causa de l'angle d'elevació (habitualment positiu), de la curvatura de la superfície terrestre i de la variació de l'índex de refracció de l'aire, l'altura de les observacions representades en un PPI habitualment augmenta amb la distància al radar. Per tant, en una imatge PPI les observacions estan a més altitud a mesura que ens allunyem del radar.

**Precipitació de tipus càlid:** segons el diccionari de la Societat Meteorològica Americana, "pluja formada dins un núvol el cim del qual està per sota de l'altura de la isozero, i que s'ha generat únicament per processos de xoc entre gotes per formar-ne de més grans (coalescència)".

**Precipitació de tipus fred:** pluja formada a partir de forts corrents ascendents verticals ascendents, motiu pel qual el procés predominant és el de congelació de les partícules d'aigua, ja que aquestes arriben a nivells molt elevats (és molt habitual que se superi la tropopausa).

**Tempesta severa:** la definició més acceptada d'aquest terme, procedent del Servei Meteorològic dels Estats Units, es refereix a episodis de precipitació convectiva on hi ha present com a mínim algun dels fenòmens següents:

1. Pedra (diàmetre igual o superior a 2 cm)
2. Tornado
3. Vents amb ratxes superiors a 25 m/s

Cal remarcar, per tant, que no es té en compte ni la intensitat/acumulació de precipitació ni la quantitat de llamps.

**Top:** altura màxima a què arriben els ecos radar que superen un determinat llindar de reflectivitat per a una determinada columna de l'atmosfera.

**VIL:** de l'anglès *vertical integrated liquid*, quantitat d'aigua líquida que el radar és capaç de detectar en una columna de l'atmosfera.

## **AGRAÏMENTS**

Volem agrair als companys del Servei Meteorològic de Catalunya Oriol Argemí, Manel Ceperuelo, Roger Bordoy i Eliseu Vilaclara els seus comentaris constructius, que han ajudat a millorar la versió final d'aquest treball.