



METEOROLOGIA DE MUNTANYA

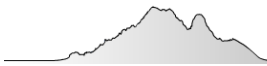
Estudi de la precipitació al Pirineu català

Albert Zaragoza Alòs

Treball final de màster
Tutora: Ma. Carme Llasat

Màster de Meteorologia (Facultat Física de la UB)

- setembre 2008 -



Índex de continguts

1	Resum.....	5
2	Introducció.....	7
3	Estat de l'art.....	9
3.1	Classificació de les publicacions.....	9
3.2	Climatologies de zones de muntanya.....	10
3.3	Efectes a gran escala i mesoscala.....	10
3.4	Comportament local, en zona de muntanya.....	12
3.5	Riscos en muntanya.....	13
3.5.1	Riscos no meteorològics.....	14
3.5.2	Riscos mixtos vinculats amb la meteorologia.....	14
3.5.3	Riscos meteorològics.....	16
3.5.4	Impacte, prevenció i sensibilització.....	16
3.6	Precipitació en muntanya.....	17
3.7	Canvi climàtic en zones de muntanya.....	18
3.8	Grups i projectes.....	19
3.9	Motivació personal.....	20
4	Dades.....	21
4.1	Pluviometria.....	21
4.1.1	Estacions AEMET.....	21
4.1.2	Estacions SAIH.....	22
4.1.3	Estacions XEMA.....	22
4.2	Definició del domini d'estudi.....	23
4.3	Dades sinòptiques.....	24
4.4	Presentació del lloc.....	25
5	Metodologia.....	28
5.1	Anàlisi EOF.....	28
5.2	Llenguatge de programació IDL.....	30
5.3	Esquema del treball.....	30
5.4	Enllaç entre escales.....	32

6 Resultats.....	35
6.1 Camps de pluja acumulada mitjana.....	35
6.2 Detecció de mesos amb precipitació anòmala.....	38
6.3 Anàlisi EOF de l'anomalia mensual de precipitació (pp')	40
6.4 Anàlisi EOF de les anomalies mensuals totals sinòptiques.....	42
6.4.1 Geopotencial.....	42
6.4.2 Humitat relativa.....	46
6.4.3 Temperatura.....	47
6.5 Anàlisi EOF de l'anomalia de geopotencial a 1000 hPa (gp'_{1000})	49
6.5.1 Mostra mensual total.....	49
6.5.2 Mostra mensual agregada estacionalment.....	54
6.6 Variabilitat dels camps.....	58
6.7 Anàlisi del camp de geopotencial mensual pels mesos secs: estratègia 1.....	59
6.8 Anàlisi del camp de geopotencial mensual pels mesos secs: estratègia 2.....	61
6.9 Caracterització de les sequeres al Pirineu.....	64
6.10 Episodi de març – abril de 2008.....	71
7 Discussió i conclusions.....	73
8 Treball futur.....	77
9 Agraïments.....	78
10 Referències.....	79
11 Annexos.....	85
11.1 Mapes de l'Atles Climàtic de Catalunya del SMC.....	85
11.2 Altres EOFs dels camps sinòptics.....	87
11.3 PC màxima dels diversos camps sinòptics per a cada mes.....	88
11.4 Camps gp'_{1000} mitjans dels mesos amb PC elevada.....	89
11.5 Mesos anòmals segons diferents llindars areals i de valor tipificat.....	90
11.6 Camps de $\overline{gp}_{1000}$ mensual per a les quatre estacions.....	91

1 Resum

La meteorologia de muntanya és una àrea amb una rellevància especial ja que afecta a diversos temes de gran interès. S'ha realitzat un estat de l'art de la meteorologia de muntanya, i s'ha fet una proposta de classificació de les diverses publicacions d'aquesta disciplina. De les diverses branques, el treball se centra en la precipitació, ja que és de gran importància en l'àmbit dels riscos naturals, i de la gestió de l'aigua, essent aquesta d'especial actualitat per l'ocurrència de sequeres que últimament afecten al territori català.

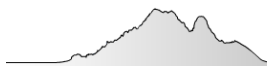
Amb la pretensió d'entendre millor la precipitació al Pirineu català s'ha delimitat un domini d'estudi que cobreix la zona de longitud $\in [0.51, 2.89]$ i latitud $\in [41.74, 42.88]$. Per a la realització del treball es recopilen registres de tres xarxes d'estacions: AEMET, XEMA i SAIH. Un total de 431 estacions meteorològiques que s'interpolen entre elles (kriging) obtenint una malla de 1984 punts de $0,05^\circ$ de resolució amb valors de precipitació mensuals des del 1940 fins al 2008. D'altra banda es té una mostra de reanàlisis diaris de les 00 UTC pel període 1958-2006, de diversos camps sinòptics per l'Europa occidental, per una malla de 325 punts (13×25) amb una resolució de $2,5^\circ$ per la finestra de -30°W a 30°E per la longitud, i de 30°N a 60°N per la latitud. Així doncs es tenen dades de dues escales espacials diferents i es pretenen acoblar per tal de caracteritzar les anomalies de precipitació mensual al Pirineu català amb algun camp sinòptic.

Pel que fa a l'escala local del domini del Pirineu, primerament es calculen els camps de pluja acumulada anual, trimestral i mensual, per a tota la sèrie que es té, essent una primera aproximació a la climatologia de la regió. En base a la mitjana i la desviació de cada punt s'ha confeccionat un valor estandarditzat a partir del qual es pot ajustar la detecció d'anomalies, per mitjà de dos filtres consecutius, puntual i areal. Posteriorment s'aplica un anàlisi EOF sobre la fluctuació del camp de precipitació, per tal d'extreure els patrons de distribució més representatius del Pirineu català.

A nivell sinòptic el tractament de les mostres es realitza per mitjà d'anàlisi EOF sobre la fluctuació dels camps, calculada restant de cada element la mitjana temporal del mes i punt de malla corresponent. Prenent tota la mostra disponible s'ha aplicat sobre els camps de geopotencial, humitat relativa i temperatura, a diversos nivells. Amb més èmfasi s'estudia el geopotencial a 1000 hPa, i per això s'ha repetit l'anàlisi EOF sobre les submostres concatenades a nivell estacional.

Es confeccionen un parell de metodologies per enllaçar les dues escales, és a dir, la selecció de mesos anòmals secs amb les EOFs estacionals de la fluctuació del geopotencial a 1000 hPa (gp'_{1000}). Els dos processos brinden resultats idèntics ja que les operacions implicades (canvi de base i càlcul de mitjana) són les mateixes aplicades en diferent ordre, i ambdues compleixen la propietat commutativa. Es conclou que és recomanable fer primer el canvi de base, ja que permet calcular la mitjana i l'error en poques dimensions.

Finalment es pot concloure que les EOFs estacionals es poden relacionar amb els mesos amb dèficit de pluja al Pirineu, i això permet descomposar en diferents patrons de temps, els camps gp'_{1000} responsables de les anomalies de precipitació. La major part d'EOFs estacionals vinculades amb les sequeres mensuals manifesten la presència d'anomalies positives que alteren el camp de geopotencial, variant la localització i intensitat de les altes pressions. Aquests camps de gp'_{1000} són combinació lineal amb diferents coeficients de EOF1+, EOF2-, EOF4- i EOF3+ estacionals. La detecció de fortes contribucions d'aquests tres patrons en el camp mensual gp_{1000} pot utilitzar-se en el reanàlisi mensual d'episodis secs i en la predicció mensual o estacional de la precipitació.



Abstract

The Pyrenees are a region with a particular pluviometric climatology. They are essential for the water resources in Catalonia, because the main Catalan rivers have their origin in such a mountainous region. Over the last century large drought periods have been registered in this territory. This study aims to a better understanding of this phenomenon by using meteorological synoptic patterns evolution.

The study uses the NCEP reanalysis fields of geopotential height, relative humidity and temperature at different levels (500, 850 and 1000 hPa) at 00 UTC, given in a 2.5° grid for Europe ($-30^\circ\text{W} < \text{lon} < 30^\circ\text{E}$ and $30^\circ\text{N} < \text{lat} < 60^\circ\text{N}$) over the period of 1958-2006. At the local scale it has been defined a domain covering the mountainous region of Catalan Pyrenees, which contains 431 rain gauges from three different networks (AEMET, SAIH and XEMA). With these stations it has been obtained a 0.05° gridded database of 1984 points over the period 1940-2008 by using the kriging method.

From this gridded rainfall database monthly and seasonal accumulated precipitation is calculated and principal annual rainfall variability has been identified. Moreover an EOF analysis is applied to the precipitation anomalies so as to identify local precipitation patterns. Anomalous months presenting maximum or minimum rainfall values have been detected by using two consecutives filters: point-value and spatial filter.

The aim is to find associations between the geopotential field at 1000 hPa and precipitation anomalies in the Catalan Pyrenees. To reduce the dimensionality of the geopotential field, an EOF analysis has been performed over monthly data. Such analysis have been applied to the entire database and for seasonal values.

The monthly values with negative anomalies (droughts), combined with the EOF and PC results of the geopotential at 1000 hPa allow to deduce a first description of the Catalan Pyrenees droughts from a synoptic point of view. To combine them there are two different ways which involve the same operations but in different order. These calculations are the change of basis and the average of the drought subsample values. Nevertheless the two ways are equivalent because the two calculations respect the commutative property. It is recommended using first the change of basis because it allows the average and error calculation in few dimensions.

Finally, four seasonal mean geopotential fields can be obtained by computing the average of all geopotential anomalies related to the detected seasonal droughts. However, it is difficult to link these seasonal geopotential means with anomalous atmospheric circulation. Thus, these seasonal fields can be decomposed into a few seasonal EOFs by projecting them into the seasonal retained EOFs. The most important seasonal EOFs in the Catalan Pyrenees drought events are EOF1+, EOF2-, EOF4- and EOF3+. The earlier detection of those circulation patterns in a monthly geopotential field can explain or advise on possible upcoming droughts in that mountainous region.

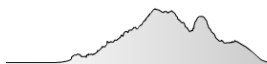
2 Introducció

No hi ha dubte que la meteorologia és un àrea del coneixement important pel desenvolupament de la societat. Actualment, tothom mira d'estar al cas de quin temps farà. Des del petit usuari que vol saber si ha d'agafar el paraigües fins al gran empresari que vol rendibilitzar al màxim els seus beneficis.

És el cas també dels practicants d'esports a l'aire lliure que volen saber si podran realitzar l'activitat sense problema. Sovint aquells que practiquen activitats enmig de la muntanya, com poden ser l'excursionisme, l'alpinisme, l'escalada... són molt conscients de tots els riscos a què s'exposen, i semblen tenir controlat fins a l'últim petit detall per tal que tot vagi com ha d'anar. I s'estableix una relació de seguretat i de confiança amb la muntanya. És aquell pacte de: "si tot ho fem bé i amb precaució no té perquè passar res". I tant és així, que quan un sent la notícia d'una desgràcia ocorreguda en muntanya sol pensar: "això és que es devia cometre alguna imprudència, o no anava ben equipat...". Però i si no fos així? I si hi hagués alguns paràmetres que no es poden controlar, i si tot pogués capgirar-se sense avisar. Sovint aquests canvis bruscos que poden posar en perill la vida de les persones tenen molt a veure amb la meteorologia. Un llamp, una tempesta d'estiu, una allau, una riuada, el despenjament d'unes roques... I malauradament cada any ens arriben notícies de morts a les muntanyes del nostre país.

L'autor d'aquest treball ha viscut en tres ocasions, situacions en què la meteorologia i la muntanya han posat a prova a les persones, i d'aquí la inquietud de conèixer millor la influència de la meteorologia en els accidents de muntanya. Es podria abordar des d'una vessant esportiva l'activitat física duta a terme, tot valorant la seguretat, la imprudència, la tècnica, la capacitat de resposta, el bagatge personal. També es podria fer una radiografia social entorn de la seguretat en muntanya, els equips de rescat, la capacitat de predicció i d'avís de riscos. També es podria analitzar en profunditat algun factor meteorològic desencadenant d'un episodi i mirar de modelitzar-lo per tal de millorar la predictibilitat per futures situacions. Però res d'això és objecte d'aquest treball. L'autor coneix alguns estudis d'accidents en concret, però en cap cas s'ha trobat un mínim estat de l'art que aplegui totes les publicacions referents a la meteorologia de muntanya des d'un punt de vista general. Així doncs, primerament s'ha realitzat un estat de l'art de la matèria. D'aquesta recopilació d'informació es dedueix que s'està davant d'una disciplina molt àmplia, que conté branques ben diverses de la meteorologia, i que òbviament no fa referència tan sols als riscos meteorològics d'alta muntanya.

Un dels temes d'actualitat que hi guarda una estreta relació és el de l'escassetat de l'aigua a Catalunya. Algunes zones han patit restriccions d'aigua en algun moment o altre dels últims anys, i l'impacte d'aquest fet sobre la població s'ha fet palès en algunes mesures de reducció de consum d'aigua. Així doncs s'ha pres consciència de la importància que tenen les pluges per tal d'abastir les reserves d'embassaments i pantans. Actualment la societat necessita unes quantitats d'aigua tant enormes que els reservoris de que disposa Catalunya comencen a quedar petits, i aquesta situació va en augment. Això té unes solucions molt costoses i crítiques, com per exemple la construcció de més embassaments, però per poder-los omplir fan falta les pluges, i això sí que no depèn directament de nosaltres. Així doncs és de vital importància ampliar el coneixement de la precipitació a les conques de Catalunya, i en concret al Pirineu, on la predicció és més incerta i hi neixen els principals rius de Catalunya: el Segre i els seus afluents, el Ter i el Llobregat. La meteorologia de muntanya té encara molts aspectes a desenvolupar, i en concret en l'àmbit dels Pirineus no hi ha tants treballs com en d'altres regions com els Alps o l'Himàlaia. També preocupa la



intuïció que les sequeres, cada cop més freqüents, puguin ser resultat del possible canvi climàtic. És tan sols una suposició i és per això que és d'interès estudiar detalladament quin pot ser l'origen de les sequeres al Pirineu o més ben dit, l'origen de les alteracions que pateix la pluviometria al Pirineu.

Una proposició inicial d'aquest treball és obtenir alguna explicació sobre l'existència de períodes en els que plou molt per sota de l'habitual a les capçaleres dels rius als Pirineus, provocant sequeres en el cas l'anomalia persisteixi en el temps. I amb aquest propòsit la pregunta concreta a la que es vol donar resposta és: es poden caracteritzar les anomalies negatives de precipitació al Pirineu català a partir d'alguna informació continguda en els camps sinòptics?

El treball es realitza a partir de dades de pluviòmetres del Pirineu compreses entre 1940 i 2008, i dades sinòptiques d'Europa d'entre el 1958 i el 2006. D'una banda amb les dades de precipitació de les estacions del Pirineu català, es calculen les diferents climatologies mensuals, estacionals i anual, per tal d'entendre millor el comportament d'aquest camp en la regió pirinenca. Amb el mateix objectiu s'aplica un anàlisi EOF sobre la desviació respecte la mitjana mensual, de manera que s'obté una primera idea dels patrons de distribució de precipitació més freqüents. S'ha realitzat també la detecció dels mesos amb dèficit pluviomètric considerable, per mitjà d'un doble filtrat. Primerament un filtrat de valor de punt de malla, on sobreviuen únicament els valors que es troben suficientment distanciats de la mitjana. I en un segon filtrat areal es detecten aquells mesos en els quals una majoria de punts de malla són anòmals.

Pel que fa als camps sinòptics s'apliquen diversos anàlisis EOF. Com que els registres de pluja són mensuals, abans que res tots els camps sinòptics diaris de les 00 UTC s'han convertit a valors mensuals mitjans. Posteriorment s'ha calculat l'anàlisi EOF per a tots els camps prenent com a dades d'entrada les desviacions respecte la mitjana de cada mes per tota la mostra disponible. Posteriorment s'ha realitzat un anàlisi EOF més minuciós del geopotencial de 1000 hPa, prenent les submostres estacionals que s'obtenen concatenant els registres mensuals de cada estació. Això permet observar a nivell qualitatiu algunes diferències dels patrons de temps a les diverses estacions.

En concret es pretén esbrinar si hi ha alguna EOF del geopotencial a 1000 hPa que estigui estretament relacionada amb la precipitació anòmala, i que per tant pugui ajudar tant a l'anàlisi com a la predicció de períodes amb anomalies pluviomètriques al Pirineu. Amb aquest objectiu es dissenyen dues metodologies alternatives per tal d'acoblar les EOFs estacionals i les anomalies seques de pluja. Finalment és possible obtenir la caracterització dels mesos secs segons unes poques EOFs, variant en funció de l'estació.

S'analitzen dos mesos corresponents al final de la darrera sequera, en el qual es pot veure si els corresponents camps mitjans de geopotencial a 1000 hPa es descomponen segons els patrons EOFs, i si la pluja associada hi té coherència.

3 Estat de l'art

No existeix una definició exacta de meteorologia de muntanya. Entenent que la meteorologia és la branca de la física que estudia l'atmosfera i els fenòmens que hi tenen lloc, es podria dir que la meteorologia de muntanya és l'estudi de l'atmosfera i dels fenòmens que ocorren en el sí de la muntanya. Ara bé la realitat no és tan senzilla. Les muntanyes poden afectar a escala molt gran, quasi planetària, i també poden produir turbulències a nivell de microescala generant ràfegues de vent molt intenses.

3.1 Classificació de les publicacions

Després d'haver observat part de la bibliografia referent a aquesta temàtica es pot deduir que la comunitat científica es refereix a aspectes ben diferents de la meteorologia sota el mateix paraigües de la meteorologia de muntanya. Fent una primera classificació de les publicacions es podria dividir l'estudi de la meteorologia de muntanya en:

- Climatologies de zones de muntanya.
- Estudis que tracten sobre la influència que les muntanyes, o la orografia, exerceixen sobre les variables meteorològiques a gran escala, i a mesoscala.
- Estudis que tracten fenòmens atmosfèrics propis de zones d'alta muntanya.
- Estudis que versen sobre els riscos associats a la muntanya.
- Canvi climàtic en zones de muntanya

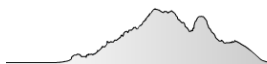
En referència a la metodologia de treball que s'utilitza en tots ells és ben diversa.

- Estudis estadístics a partir de col·leccions de dades observacionals (Frei i Schär, 1998; Frei i Häller, 2001).
- Modelització (Chiao, 2002; Corripio et al, 2003; Lehning et al, 2000a; Lehning et al, 2000b; Reiter i Teixeira, 1992; Reinecke i Durran, 2008).
- Campanyes experimentals per obtenir mesures molt precises (Mases et al, 1998; Lehning et al, 2002; Jaedicke, 2001; Michaux et al, 2001).
- Experiments de laboratori.
- Anàlisi meteorològic (sinòptic i mesoscalar) d'alguns episodis concrets (Martí et al, 2006; Pascual i Callado, 2007; Fazzini et al, 2005; Reiter, 1982).

Smith (2004) en el seu treball també realitza una certa classificació i comenta que sens dubte la vessant en la qual hi hagut més publicacions ha estat la dinàmica dels fluxos en la interacció amb el terreny, és a dir l'estudi sobre l'efecte de l'orografia a mesoscala. En aquest article és molt interessant el buidat que l'autor realitza dels temes emergents dels últims temps en l'àmbit de la meteorologia de muntanya i que encara no tenen resposta, entre els quals cal destacar:

- la predicció de riuades en les conques muntanyoses i el recurs hídric en general.
- l'efecte orogràfic disparador de tempestes baroclíniques i convectives.

És important l'ús de diversos mètodes a la vegada amb l'objectiu d'estudiar una mateixa temàtica ja que pot obrir horitzons més llunyans. Lilly, amb nombrosos treballs (Lilly, 1972; Lilly i Zipser, 1972; Lilly i Kennedy, 1973), fou el pioner d'una nova manera d'investigar la meteorologia de muntanya, quan a partir de la dècada dels 70 va incorporar els vols amb avioneta per observar i mesurar processos ben diferents com les tempestes, la turbulència, les ones de muntanya, i en tot moment aplicava models numèrics exprimint al màxim els ordinadors de l'època (Smith, 2004).



Veient doncs les diverses manifestacions de meteorologia que pot haver-hi, la forta relació que hi ha entre elles i la multitud de metodologies emprades, ja es pot veure que no es pot realitzar una classificació clara i contundent en tots els articles. Així doncs l'objectiu no és aquest, sinó esbossar un estat de l'art de les diferents temàtiques.

Entenent aquesta divisió existent en la multitud de publicacions, a continuació es desenvolupa una possible classificació de la meteorologia de muntanya.

3.2 Climatologies de zones de muntanya

Alguns estudis climatològics en muntanya són d'especial interès. Aquests treballs poden ser molt generals i parlar d'observacions climàtiques en general (Redmond, 2005), o bé poden basar-se en l'estudi detallat d'un sol indicador climàtic, com pot ser el gruix de neu present en una certa zona (Super, 1971).

S'han realitzat millores substancials respecte temps passats gràcies a les noves prestacions de les xarxes d'observacions. En concret es va confeccionar una climatologia de precipitació millorada pels Alps a partir d'una xarxa densa de pluviòmetres, i es va concloure que a nivell fi la climatologia depèn en bona mesura de la densitat d'observacions i de la tècnica utilitzada per analitzar-les (Frei i Schär, 1998). També van proposar retocs en la ubicació d'estacions, i van mirar també les diverses situacions més típiques per veure els processos sinòptics més importants als Alps. També són interessants les publicacions de divulgació, com és el cas de Suïssa, on va editar-se un prospecte sobre les situacions sinòptiques més típiques als Alps (MétéoSuisse, 2006).

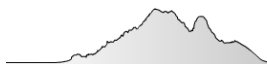
En el cas dels Pirineus s'ha realitzat alguna climatologia molt regional, com per exemple pel massís de les Maladetes (Lampre, 2001). Però a nivell general cal destacar la contribució de Martín-Vide i Olcina (2001) amb el seu llibre "Clima y tiempos de España", en el qual s'aborden algunes particularitats del clima en zones de muntanya com els Pirineus i la resta de sistemes muntanyosos d'Espanya. El mateix autor ja havia fet una contribució centrada a Catalunya que és d'especial interès (Martín-Vide, 1992). Sacasas també ha contribuït amb dues publicacions a descriure la climatologia pròpia del Pirineu català, comarca a comarca, explicant també algunes situacions meteorològiques típiques de la nostra terra (Sacasas, 1999; Sacasas, 2006).

3.3 Efectes a gran escala i mesoscala

Les muntanyes en la seva àmplia varietat afecten d'una manera o una altra a la meteorologia. Aquests efectes poden ser a escala global o a escales més petites i regionals (Pascual, 2002).

Hi ha dos temes privilegiats en aquest camp que han rebut molta dedicació. D'una banda els efectes de les grans serralades en la circulació general atmosfèrica (Reiter, 1982), i d'altra banda els efectes de l'orografia en el desenvolupament de tempestes i alteracions del flux general (Medina i Houze, 2002). Sovint es fa difícil discernir entre els efectes a gran escala i el comportament local.

Un article de referència tot i que molt antic que presenta alguns conceptes interessants pel que fa la



influència de les grans serralades de la Terra en la circulació general atmosfèrica és Reiter (1982). El treball ja apuntava com a conclusió la necessitat d'experimentar i teoritzar en estudis que involucrin les tres escales de la meteorologia (micro, meso i macro), tot i que encara ara, aquesta és una aposta atrevida.

Sovint molts estudis van dedicats a la millora de les prediccions de temps sever sota influència de l'orografia. I són els incidents en nombroses zones del planeta els que van propiciar la proliferació de l'ús de models mesoscalars, i la investigació a partir d'aquests ni que sigui per usos militars (Reiter i Teixeira, 1992).

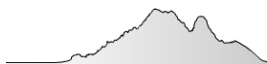
L'any 2002 va ser l'any Internacional de les muntanyes. Es va presentar la declaració, que ja s'havia iniciat el 1992 a Rio, que reconeixia el paper crucial de les muntanyes en molts àmbits de la ciència, com també s'esperonava als governs a motivar la investigació i el desenvolupament entorn de les muntanyes. En referència als efectes de la meteorologia de muntanya sobre la societat, es va realitzar un workshop sobre la modelització de mesoscala, en concret, a zones de muntanya, que quedà recollit en forma escrita (Das et al, 2002). Ho van organitzar el NCMRWF (National Centre For Medium Range Weather Forecasting) de l'Índia i el NCAR (National Center for Atmospheric Research). El congrés es dividia en 5 àmbits de treball, que es corresponen amb les branques actuals de la investigació en meteorologia de muntanya mesoscalar:

- (1) Mountain Weather Forecasting
- (2) Mesoscale Atmospheric Modeling
- (3) Mesoscale Observations and Data Assimilation
- (4) Radar and Satellite Applications
- (5) Severe Weather Phenomena

Després de totes les ponències es van confeccionar unes taules orientatives molt completes i que apunten vies de recerca cap al futur (key issues). Cal dir però que estan molt orientades cap a la regió monsonica, tot i així haurien de servir de pauta per tots aquells treballs que tinguin a veure amb la meteorologia mesoscalar de muntanya.

També van concloure que un dels inconvenients més importants en els estudis mesoscalars a les regions monsoniques és la manca de dades observacionals a una resolució espacial suficient per cobrir un anàlisi mesoscalar. Sobretot els complexos mesoscalars provinents de l'oceà no es poden modelitzar ja que no es tenen observacions. Aquesta problemàtica és també present en la resta de serralades del món, i òbviament als Pirineus. En el congrés es va suggerir que amb la millora de les imatges de satèl·lit i el radar meteorològic, es poden arribar a inferir els valors de les variables de l'atmosfera en una malla prou fina vàlida per estudis a escala local. Els resultats doncs, indiquen que és important l'assimilació de dades mesoscalars, la parametrització correcta dels usos i processos del sòl, i una correcta xarxa mesoscalar d'observacions (Das et al, 2002).

Les situacions sinòptiques en un cert entorn mesoscalar poden donar lloc a situacions de precipitacions abundants. Els articles que tracten aquests fenòmens entenent-los com a riscos potencials en muntanya s'han ubicat en l'apartat de riscos. És cert que bona part d'aquests estudis comparteixen la mateixa motivació de mitigar riscos, i de millorar la predictibilitat per disminuir la vulnerabilitat, de manera que la classificació en aquest tipus d'articles es fa difícil. Tot i que darrera hi hagi objectius comuns, els treballs poden ser ben diferents. Així hi ha treballs molt teòrics, per exemple, un estudi dels fonaments físics de la dinàmica d'ones gravitatòries en muntanya (Garvert et al, 2007), i que per tant es classificaria com un estudi de mesoscala. I es troben articles amb objectius semblants, basats per exemple en l'anàlisi de dades observacionals d'una inundació que ha



provocat danys, de manera que aquests articles es troben a la secció de riscos com és el cas de Rotunno i Ferretti (2001).

A partir de les millores en la xarxa de pluviòmetres dels Alps gràcies al projecte MAP (Mesoscale Alpine Programme) es van realitzar anàlisis dels camps de precipitació mesoscalars en tota la regió alpina, els quals s'apliquen en les verificacions numèriques de models meteorològics de pronòstic del temps (Frei i Häller, 2001). Últims estudis publicats enguany sobre la dinàmica del bloqueig topogràfic, analitzant l'ús del nombre Froude invers en models numèrics, han conclòs que les variacions en l'estabilitat de l'atmosfera sobre la cresta de la serralada tenen un impacte molt petit en el bloqueig orogràfic (Reinecke i Durran, 2008). Una altra àmbit en el qual s'apliquen les millores de l'anàlisi i predicció mesoscalar és en la precipitació.

3.4 Comportament local, en zona de muntanya

Hi ha una sèrie de fenòmens que es podrien catalogar de propis, si bé no pas exclusius, de la muntanya. Aquests fenòmens són tractats vagament en alguns llibres de divulgació (Thillet, 1997) però no s'ha realitzat cap article o estudi més rigorós sobre quins són aquests fenòmens. Alguns d'ells sí que representen per sí sols un risc, mentre que d'altres no tenen perquè ser així.

Alguns d'aquests fenòmens són singulars i d'altres poden agrupar-se en funció de quines variables atmosfèriques afecten. Thillet (1997) realitza la següent classificació:

- De vent
 - Brises de vall i de muntanya
 - Vent de glacera
 - Alteracions del vent pel relleu (acceleració, turbulència)
 - Ones de relleu
 - Efecte dinàmic de les valls
 - Wind chill factor, sensació tèrmica o índex de fredor.
- Efecte föhn
 - Efecte föhn
 - Fals efecte föhn
- Temperatura
- Pressió
 - Dipol orogràfic
- Núvols
 - Núvols de plomall o bandera
 - Núvols en còfia
 - D'origen turbulent
 - Lenticulars
 - Mars de núvols
- Les pertorbacions en muntanya

- Front càlid
- Front fred
- “neige de redoux”
- “neige de traîne active”

Molts d'aquests fenòmens han estat estudiats en el sí d'articles i estudis que versen sobre altres temes. El cas de l'efecte föhn és un dels més singulars (efecte fogony a Catalunya). Ja els primers estudis sobre la dinàmica del föhn es remunten a inicis del segle passat (Gold, 1913). Hi ha un estudi que mira d'esbrinar quins efectes pot tenir l'efecte föhn sobre la salut humana estudiant alguns casos de malalties freqüents en presència de Chinook (nom que rep l'efecte föhn a EUA) al Canadà (Fletcher, 1987). També es va realitzar un estudi sobre els canvis en el comportament del moviment de l'aigua sota efecte föhn (Bornman et al, 1973). Últimament aquest fenomen també ha estat objecte d'estudi, com és el cas d'Itàlia, on s'ha estudiat el föhn provinent dels Alps (Musso i Cassardo, 2004; Ambrosetti et al, 2005). Sovint alguns d'aquests estudis formen part del projecte MAP (Zängl et al, 2002) que serà explicat més endavant.

Un altre fenomen bastant estudiat que és propi de la muntanya són els rotors que generen els pics. Aquest és un tema que és de vital importància en aviació ja que els vents que es generen són de naturalesa turbulent i compliquen la tasca dels pilots (Darby i Poulos, 2006). També en escalada i alpinisme, pot desencadenar un episodi de temps violent.

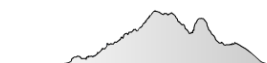
En els recursos del MetEd (Meteorological Education and Training) hi ha dos mòduls que tracten fenomenologia pròpia de la muntanya, en ambdós casos la interacció de fluxos amb la topografia. En un cas es descriu amb detall la dinàmica i termodinàmica de les ones de muntanya (“mountain waves”) i dels vents catabàtics (MetEd, 2004). En l'altre cas s'explica de manera més genèrica la interacció del flux amb la topografia (MetEd, 2001b).

Al Pirineu s'han realitzat pocs estudis (Gómez, 2001). Tot i així va publicar-se un article referent a l'efecte föhn pel cas concret del Pirineu català (Pascual, 2005), i també hi ha un estudi sobre entrades sobtades de vents intensos al Pirineu oriental presentat a la VII Jornades de Meteorologia Eduard Fontserè (Pascual, 2001). També en les jornades tècniques de neu i allaus es va impartir una conferència sobre dos fenòmens freqüents als Pirineus que donen vents característics i intensos (Pascual, 2006a).

3.5 Riscos en muntanya

A priori, un podria pensar que amb les migracions de les zones rurals a les grans ciutats, cada cop l'interès per a conèixer els riscos associats a la muntanya va disminuint. Però en realitat és tot el contrari. Cada cop més, es realitzen activitats a cotes més elevades i s'hi construeixen infraestructures, com poden ser les pistes d'esquí. Tot plegat ha fet augmentar la vulnerabilitat davant dels fenòmens naturals severos en muntanya (Pascual, 2006b). Davant d'aquest fet, en aquest mateix article, es proposen diferents mesures per tal de disminuir l'impacte d'aquests perills naturals, i tant concerneixen als meteoròlegs, com els equips de rescat, com els mateixos practicants de les activitats a l'aire lliure, i tots els estaments públics i privats que tenen a veure amb l'oci i la seguretat a la muntanya.

Així doncs es té un interès cada cop més creixent pels riscos que afecten a les activitats dutes a



terme a la muntanya. Un exemple pot ser el workshop del 2002 que ja s'ha comentat abans que intenta donar resposta als riscos presents en les zones muntanyoses de l'Himàlaia (Das et al, 2002).

3.5.1 Riscos no meteorològics

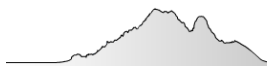
Els accidents més freqüents en muntanya són deguts a riscos biològics, geomorfològics, fluvials, nivològics/glacials, meteorològics (Pascual i Callado, 2007). És per això que els accidents s'estudien des de moltes branques de la ciència, i tot i ser difícil s'ha de potenciar la relació entre els professionals de diverses àrees per tal d'avançar en les investigacions. Un accident en muntanya es pot estudiar des de la meteorologia, des de la geologia, la biologia, l'enginyeria depenent de quin sigui el seu origen, i fins i tot hi ha estudis dedicats a la psicologia de les persones davant de situacions d'alt risc o d'accidents. És el cas de l'estudi que es va fer analitzant els resultats d'un qüestionari dirigit a accidentats a la muntanya, del qual es va concloure entre d'altres aspectes que “les causes de l'accidentalitat en muntanya són múltiples i els subjectes poden tenir causes diferents” (Chamarro, 2006). Un altre estudi de la branca de la psicologia és el publicat darrerament que estudia els conceptes de les teories de lideratge de grup, a partir d'una situació d'escalada fallida com és el cas de l'accident de l'Everest del 1996 en el qual van morir nou alpinistes (Keller, 2007). Així doncs, hi ha riscos de naturalesa no meteorològica, però que depenen fortament de les condicions meteorològiques adverses.

3.5.2 Riscos mixtos vinculats amb la meteorologia

Hi ha un seguit de riscos que tenen el seu origen normalment en un fenomen meteorològic i per tant es pot dir que la dependència amb la meteorologia és molt major que en el cas anterior. És el cas de les inundacions, les esllavissades, les sequeres i les allaus. Durant els anys 90 es van produir diversos accidents com l'esllavissada de $30 \cdot 10^6 m^3$ de roca a Randa (Alps suïssos, 1991), l'accident del barranc d'Aràs que va arrasar el càmping situat a Biescas (Aragó, 1996), diverses allaus al Pirineu (gener - febrer 1996) o als Alps (hivern 1999) (Vilaplana, 2004). Donada la magnitud de la tragèdia de Biescas, aquesta va tenir una gran repercussió mediàtica, i va posar de manifest l'elevada vulnerabilitat que actualment es pot arribar a tenir en emplaçaments de muntanya. Alcoverro (1999) va fer un estudi rigorós d'aquest incident i va arribar a concloure que la magnitud de la riuada va ser molt més elevada que les que s'haguessin pogut tenir en temps passats.

En el cas de les esllavissades, aquestes també són objecte d'estudi en l'àmbit de la muntanya ja que són freqüents en aquest entorn. Algun estudi interessant d'esllavissades en entorn de muntanya és el cas de la de Vallcebre (Corominas et al, 1999). I a l'alta muntanya els esfondraments tenen molt a veure amb l'augment de la temperatura ja que la solidesa de la roca sovint depèn de l'existència del gel, tal com s'explica a continuació.

L'absència de pluja pot provocar danys notables en zones de muntanya, tant a la flora i fauna, com a la població. La sequera meteorològica, és a dir, escassetat de pluges i forta evapotranspiració, és l'inici de la consecució de la sequera edafològica, la sequera hídrica i la sequera socioeconòmica que poden perdurar llargs períodes de temps (Álvarez et al, 2008). A Espanya hi ha regions que han patit llargues sequeres per la qual cosa és una àrea d'interès, tot i que la diversitat de climes que es presenten a l'estat espanyol dona lloc també a una àmplia tipologia de sequeres (Olcina, 2001). Per



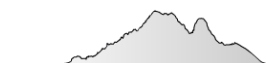
a les activitats a l'alta muntanya també l'absència de pluja i sobretot l'absència de fred esdevenen un perill, ja que es poden obrir noves esquerdes a les glaceres, poden donar-se trencaments de seracs, o la fosa del permafrost pot provocar despreniments de roca, tal com va succeir al Cervino el 2003, al Dru el 2005 i a l'Eiger el 2006 (Deline et al, 2006). Així doncs la manca de precipitació junt amb l'augment de temperatura han esdevingut un risc natural de muntanya molt important que pot arribar a posar moltes vides en joc, tal com ja ha passat als Alps (ONERC, 2008).

Pel que fa a les inundacions, darrerament s'estan estudiant amb deteniment les implicacions que pot tenir la proximitat d'una zona muntanyosa. És el cas de la inundació del Piemont del 1994, on es va concloure l'especial importància de la modificació orogràfica del flux sobre la precipitació associada, i que encara s'estudia amb l'objectiu d'entendre més acuradament quins són aquests efectes (Rotunno i Ferretti, 2001).

Tot i que la dinàmica de les allaus respon a la dinàmica de fluids i per tant són més propis estudis des de la vessant de la física o la geologia, la meteorologia també hi té alguna cosa a dir. És d'especial importància el transport de neu per part del vent. Una campanya experimental realitzada al Pirineu oriental, en concret a la Molina, va concloure que el mòdul del vent estava fortament relacionat amb l'acumulació de neu registrada als col·lectors instal·lats (Mases et al, 1998), i principalment la intensitat del vent afectava a la localització del màxim de neu dipositada. D'aquí que s'hagin realitzat projectes per tal d'incorporar els efectes del vent en la predicció d'allaus a nivell operatiu (Corripio et al, 2003). És en aquest tipus d'estudis en els quals es realitzen la major quantitat de campanyes experimentals tal com es pot veure en la bibliografia.

Aquestes campanyes en molts casos utilitzen sensors acústics d'acumulació de neu, explicats en detall per Lehning et al (2002). Hi ha d'altres articles que també empren aquests tipus de sensors (Michaux et al, 2001; Jaedicke, 2001). També hi ha estudis que utilitzen altres tècniques de captació de dades observacionals, ja sigui mesurant acumulacions en valles de neu instal·lades en pendents (Naaïm-Bouvet et al, 2002), ja sigui realitzant experiments en laboratoris de túnels de vent com el del CSTB (Centre Scientifique et Technique des Bâtiments) de Nantes (Naaïm-Bouvet et al, 2002; Michaux et al, 2001; Michaux et al, 2002). D'altres estudis sobre el transport de la neu pel vent es realitzen en base a modelitzacions i estadístiques a partir de dades disponibles d'altres estudis o projectes (Lehning et al, 2000a; Lehning et al, 2000b; Corripio et al, 2003). De fet en el darrer d'aquests articles (Corripio et al, 2003) fins i tot s'ha recorregut a emprar fotografies fetes des de punts elevats per tal d'identificar les zones amb cobertura de neu. D'altra banda també hi ha alguns articles que combinen la modelització a partir de campanyes experimentals (Durand et al, 2001; Doorschot et al, 2001).

En el tema d'allaus hi ha una gran quantitat d'organismes i grups dedicats a la millora de les prediccions, com és el cas de MétéoSuisse i MétéoFrance. A Catalunya sempre ha estat d'especial interès ja que als Pirineus són freqüents els accidents d'aquest tipus, donada l'elevada aflluència de gent a les muntanyes, ja sigui per qüestions lúdiques i esportives, o bé per raons professionals. Així doncs, darrerament s'han realitzat diversos articles al respecte, i aquest és el camp relacionat amb la meteorologia de muntanya que rep més dedicació. S'ha realitzat algun estudi d'anàlisi exhaustiu d'alguns episodis d'allaus des de l'òptica de la meteorologia com en el cas de les temporades 2004-05 i 2005-06 (Martí et al, 2006). També en aquest àmbit sovint es troben publicacions i conferències que posen èmfasi en la prevenció i educació dels practicants d'activitats en regions amb perill d'allaus, en la majoria de casos, excursionistes i esquiadors (Oller, 2003; Martínez i Oller, 2004). A la Vall d'Aran el Consell General d'Aran disposa d'una predicció pròpia d'allaus, que especifica informació fixa de les zones potencialment perilloses i informació actualitzada del risc d'allaus en les zones dels voltants dels refugis i dels itineraris més habituals (Gavalda i Moner,



. A Catalunya la responsabilitat de la predicció d'allaus recau en l'IGC (Institut Geològic de Catalunya), i és manifest l'interès actual de millorar les prediccions meteorològiques al Pirineu per tal de millorar la predicció d'allaus.

3.5.3 Riscos meteorològics

D'altra banda hi ha riscos en muntanya que són directament meteorològics (Pascual i Callado, 2007):

- les tempestes (llamps, vents forts)
- nevades fortes i/o abundants
- vents forts d'origen no convectiu (neu en suspensió)
- temperatures extremes
- boira
- torb

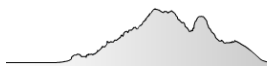
Normalment aquests diversos meteors que s'estudien es presenten en un mateix episodi (neu, vent, fred...), i aquest esdevé un dels fenòmens que genera més accidents. Totes aquestes condicions meteorològiques al Pirineu sempre es donen sota un mateix patró: adveccions de component nord (Pascual i Callado, 2007). Aquesta conclusió s'extreu després d'haver fet una selecció de nombrosos episodis d'accidents al Pirineu. Un pas més enllà és realitzar una descripció de l'entorn sinòptic, mesoscalar i climatològic que afavoreixen aquests successos. El més rellevant d'aquest estudi és l'anàlisi climatològic de tipus dinàmic, localitzant les depressions i els centres d'alta pressió, i estudiant les anomalies tèrmiques a diverses alçades. És sabuda la situació de perill que generen els fluxos del nord als Pirineus, i d'aquí l'estudi detallat a rel de la campanya PYREX en el qual es tracta la dinàmica dels fluxos del nord i del sud sobre els Pirineus (Koffi et al, 1998).

Durant l'hivern hi ha una altra situació que genera fort perill als Pirineus i que ha estat motiu de notícia tràgica en diverses ocasions. A més resulta difícil de predir i sol donar-se en dies nets i clars per la qual cosa la vulnerabilitat és més elevada donada l'elevada afluència d'excursionistes i esquiadors a la muntanya. Les entrades de fluxos de component nord sobre els Pirineus generen una retenció d'aire fred a sobrevent dels Pirineus (vessant nord), i a posteriori quan es trenca el bloqueig es produeix una entrada violenta de vents forts en alçada. La combinació d'aquest fort vent amb la presència de neu recent, caiguda amb el pas del front fred antecedent, provoca el transport turbulent de grans quantitats de neu a velocitats molt elevades i aleshores es parla del torb (Pascual, 2001; Pascual 2006a).

Normalment els estudis sobre els riscos meteorològics es centren en els episodis de precipitació (neu i pluja), ja sigui pel propi risc que poden comportar en la pròpia muntanya, com per les inundacions que poden provocar, com també per a la millora del control dels recursos hídrics. L'estat actual dels treballs sobre la precipitació en muntanya es desenvoluparà en l'apartat 3.6.

3.5.4 Impacte, prevenció i sensibilització

En molts articles que tracten sobre riscos de muntanya, la manera de procedir és la mateixa: s'estudien amb detall alguns episodis concrets per millorar el coneixement d'aquestes situacions de



risc, de manera que aquesta és una línia que s'utilitza freqüentment. Així ho apuntava en Vilaplana en la seva xerrada: “Cal conèixer la història dels accidents i esdeveniments catastròfics per extreure'n la lliçó corresponent” (Vilaplana, 2004).

Un altre línia de publicació important és en l'àmbit de la prevenció i la sensibilització de la població. Cada cop és dona més importància a la formació i a la informació del practicant de les activitats com a eina de mitigació de la vulnerabilitat en muntanya. Amb aquest objectiu, el CMT (Centre Territorial de Catalunya de l'AEMET) amb el suport de la FEDME (Federación Española de Deportes de Montaña y Escalada) van editar una guia de muntanya de divulgació gratuïta per tal de conscienciar els practicants d'esports a la natura sobre la perillositat associada a la meteorologia (CMT, 2004). Descriu amb cert detall els diversos elements que poden comportar un risc meteorològic a la muntanya, i també concreta els riscos específics de cada esport en muntanya tot recomanant-ne alguns consells. Aquest material ha tingut bona difusió a la fira del llibre de muntanya que es celebra cada any, i també en tot el teixit associatiu excursionista, com ara associacions i grups excursionistes. Una publicació semblant tot i que no tant específica a les activitats en muntanya es troba als Alps, a càrrec de l'estat suís (MétéoSuisse, 2006). Tot i que la intenció sigui la mateixa, en aquest pamflet no es fa tant d'èmfasi en els riscos sinó en els fonaments meteorològics que provoquen el temps als Alps, i també es descriuen aquelles situacions sinòptiques més típiques.

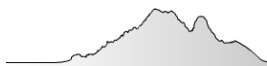
Un anàlisi més exhaustiu sobre la capacitat de resposta davant d'un risc meteorològic es troba al web de MetEd, on apareix una guia sobre aquesta temàtica (MetEd, 2001a). Tot i no estar enfocada directament al risc en muntanya presenta idees a tenir presents. Posa especial èmfasi en el procés de predicció dels fenòmens severos als EUA, i en les incerteses del funcionament actual.

Una mostra més del creixent interès en aquesta temàtica és l'article, publicat darrerament al NHESS (Natural Hazards and Earth System Sciences) (Holub i Hübl, 2008), que descriu l'estat de l'art i les necessitats futures sobre la protecció i mitigació dels riscos naturals en muntanya, tot i que es centra en la vulnerabilitat dels assentaments humans en zones de muntanya degut al creixement immobiliari i d'activitats a l'aire lliure. Tenint en compte quins són els riscos naturals més freqüents i la realitat estructural de les construccions es presenten un seguit de mesures per tal de reduir la vulnerabilitat i millorar la protecció. Així doncs les mesures que es proposen s'han de tenir en compte per a futures edificacions com també per millorar les ja existents.

3.6 Precipitació en muntanya

El coneixement sobre la precipitació en muntanya és molt important en múltiples aplicacions. Com ja s'ha comentat en l'apartat 2.5.3, els riscos meteorològics més importants en muntanya estan íntimament relacionats amb la precipitació, ja sigui pluja o neu.

Sovint s'estudien els episodis amb l'objectiu únic de millorar la predictibilitat, tot analitzant processos més fins d'escala local. És el cas de l'estudi de tres situacions de nevada al Pirineu durant la temporada 2005-06, del qual es conclou la dificultat de la previsió de meteors en muntanya i la importància d'incloure nous fenòmens, com ara les inversions de subsidència (Esteban, 2006). Estudis semblants també es realitzen a altres zones de muntanya, com és el cas d'Itàlia, quan el 2005 es va establir una primera relació entre les nevades i els diversos tipus de circulacions sinòptiques (Fazzini et al, 2005). Esteban et al (2005) realitza també en el mateix any un estudi on estableix els



patrons de circulacions atmosfèriques, altrament dits tipus de temps, que estan associats a episodis de nevades abundants a Andorra. L'extracció dels tipus de temps es realitza per mitjà de l'anàlisi en components principals (PCA) i l'anàlisi de clústers.

També s'estudien les tempestes en muntanya, sobretot l'efecte amplificador i intensificador que exerceix el relleu topogràfic. I aquests estudis solen tractar-se a àmbit de tota la serralada (mesoscala- α), o quan es tracta d'accidents és un àmbit més local. Les grans pluges malauradament són un risc freqüent en molts països asiàtics, d'aquí l'estudi de Lin sobre episodis de grans pluges orogràfiques (Lin et al, 2001). En aquest treball es detallen algunes situacions sinòptiques i mesoscalars que poden evocar a un episodi d'aquestes característiques que porti grans inundacions associades. També proposen un índex que pot ser usat per predir l'ocurrència de pluja orogràfica extrema, i que és útil no només en la zona d'estudi sinó que podria ser emprat en d'altres regions asiàtiques.

També s'han realitzat tesis sobre la precipitació orogràfica. Actualment la majoria d'estudis que es realitzen, es troben en el sí de la mesoscala, ja que és on es poden obtenir les millores més substancials. El cas de Chiao (2002), per exemple, és un treball sobre la dinàmica d'aquests processos i consisteix en la proposta de millores i futures línies de treball entorn la modelització mesoscalar per tal d'entendre i predir millor la precipitació orogràfica extrema. Aquell mateix any també es va dur a terme un anàlisi exhaustiu de dues tempestes alpines en el sí del projecte MAP (Medina, 2002).

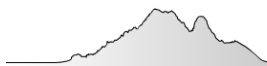
Als Alps s'han realitzat diversos estudis sobre tempestes i episodis de precipitacions abundants. S'han estudiat amb detall algunes tempestes concretes per tal de poder extreure conclusions que facilitin les previsions futures (Medina i Houze, 2002).

Un tema molt important és el dèficit de precipitació durant llargs períodes que acaben provocant sequeres. La relació entre les sequeres i la precipitació en muntanya és estreta, ja que les reserves d'aigua de la xarxa hidràulica tenen a veure amb l'emmagatzematge dels embassaments, gran part d'ells en comarques pirinenques. Durant els darrers anys al territori català, la relació s'ha fet més evident al produir-se algunes situacions de sequera, en les quals el pensament generalitzat era: "si us plau, que plougui al Pirineu que si no, no tindrem aigua".

3.7 Canvi climàtic en zones de muntanya

L'escalfament global és un esdeveniment demostrat i que es fa palès en diversos canvis que tenen lloc en la naturalesa i que la població pot percebre fàcilment. Les zones de muntanya no en són l'excepció, i per això és un tema d'interès de la comunitat científica.

Hi ha alguns fets que evidencien que l'escalfament també té llocs en zones de muntanya, com poden ser el retrocés de les glaceres del Pirineu o dels Alps, o el canvi en la vegetació a diferents alçades. Però d'aquí a deduir que la causa és el canvi climàtic d'origen antropogènic hi ha un salt molt gran i delicat, que no sempre es pren amb prou rigor. Per aquest motiu és molt important el coneixement del clima en temps passats, que és accessible per mitjà d'indicadors climàtics, com els anells dels troncs dels arbres o les glaceres alpines (Beniston et al, 1997). En aquest mateix article també s'analitzen amb més detall els canvis observats durant el darrer segle, a partir de mesures d'estacions meteorològiques ubicades en zones alpines d'alta muntanya.



Tractant exclusivament les glaceres modernes presents en zones de muntanya, es poden trobar evidències de canvis climàtics passats que són de vital importància per la previsió del clima futur en aquestes regions (Dyurgerov i Meier, 2000). I les previsions que es dedueixen no són gaire esperançadores, ja que tot indica que l'escalfament va en augment i a més les prediccions a partir de les tècniques del gel són més extremes que no pas les que es dedueixen de les mesures de les estacions meteorològiques, la majoria d'elles a cotes baixes.

El juny de 2001, a Davos (Suïssa) va tenir lloc un workshop sobre el canvi climàtic en zones de muntanya, i d'aquí es va publicar un article en el qual s'evidencia la importància dels estudis en zones de muntanya.

“Mountains cover 25% of the global land surface, providing home and living space for 26% of the world's population. In arid and semi-arid areas, where water is critical, mountains provide as much as 90–100% of the freshwater resources for drinking, irrigation, and industrial supply in the surrounding lowlands (Meybeck et al, 2001).” (Diaz et al, 2003)

D'aquest comentari es dedueix també la forta relació existent entre els recursos hídrics i la muntanya, que posa de manifest la importància de la precipitació en muntanya.

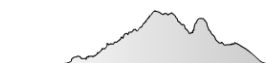
I tal com s'ha comentat en l'apartat 3.5.2, durant la darrera dècada al massís dels Alps hi hagut nombrosos esfondraments de grans dimensions en muntanyes molt conegudes com el Cervino, l'Eiger i el Dru, de resultes de la fosa del permafrost. El retrocés de les glaceres ha provocat alteracions en els emplaçaments dels refugis, els quals antigament es trobaven a peu de glacera amb un fàcil accés, i en l'actualitat es troben isolats sobre penyes de grans dimensions. També les rutes d'ascensió als cims dels Alps estan augmentant la dificultat degut al deteriorament dels seracs, de les esquerdes, dels corredors... De manera que l'escalfament global està afectant fortament a la seguretat i el desenvolupament de les activitats alpines.

3.8 Grups i projectes

Són diversos els grups i projectes que tenen relació amb la meteorologia de muntanya. Es podria distingir entre grups i projectes d'investigació que donen resposta a diferents motivacions, i els grups i projectes que depenen d'organismes oficials i que normalment donen resposta a la necessitat de millorar la seguretat i prevenció dels ciutadans. Aquests últims són els casos de les seccions de meteorologia de muntanya de MétéoSuisse, MétéoFrance i ANENA pels Alps, i l'AEMET, el SMC (Servei Meteorològic de Catalunya), l'IGC i el CENMA pels Pirineus.

Sens dubte el projecte de referència és el MAP (Mesoscale Alpine Programme) que és una iniciativa de recerca a nivell internacional per tal d'estudiar els processos atmosfèrics i hidrològics en terrenys complexos. Es divideix en diferents fases, que comprenen des de la campanya de mesures fins als diversos passos de tractament de les dades observacionals. Nombrosos articles han estat confeccionats a partir de dades del MAP (Frei i Häller, 2001; Medina, 2002).

El Pyrex (Pyrénées experiment) és una campanya experimental que es va dur a terme el 1990, durant els mesos d'octubre i novembre. A banda de les observacions típiques que es tenen de les estacions meteorològiques franceses i espanyoles, i dels globus de radiosondatge, es van utilitzar altres aparells i instruments com globus de nivell constant, un avió meteorològic i una línia d'estacions automàtiques ubicades perpendicularment al centre dels Pirineus (Campins, 1998). Amb



totes les mesures que es van obtenir s'han realitzat nombrosos estudis (Koffi et al, 1998).

L'ASP (Équipe Atmosphère et Systèmes Précipitants) pertany al LTHE de Grenoble (Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement), i com que es dediquen a l'estudi dels sistemes precipitants i la formació de convecció, entre d'altres, aquests tenen repercussió en la meteorologia de muntanya. Alguns articles han estat confeccionats a partir d'estudis realitzats en aquest laboratori i en d'altres, normalment tots ells són túnels de vent (Naaim-Bouvet et al, 2002).

El CEN (Centre d'études de la neige) és una unitat del CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) que es dedica exclusivament a estudiar la neu i les allaus, i que es troba ubicat a Grenoble (França). Un dels articles que s'han comentat anteriorment pertany a una contribució d'aquest grup (Corripio et al, 2003).

3.9 Motivació personal

Després d'haver realitzat aquesta ullada a l'estat actual de la meteorologia de muntanya, una primera conclusió és la constatació de les mancances que hi ha al nostre país respecte a d'altres zones de muntanya. La regió de referència, tant pel que fa a cobertura d'estacions de muntanya com pel que fa a grups dedicats a l'estudi de la meteorologia de muntanya, és sens dubte, els Alps amb les contribucions franceses, suïsses i italianes. També a Estats Units s'han realitzat campanyes molt completes en serralades concretes.

Un dels temes més estudiats en aquestes zones és la precipitació en muntanya, donada la importància que aquesta té en l'estudi del recurs hídric i la seguretat en zones de muntanya. Si bé als Alps les inundacions i els accidents de muntanya han estat notables i freqüents, també a Catalunya s'han viscut episodis catastròfics. A més darrerament al nostre territori s'han viscut èpoques de sequera en gran part motivades pel dèficit pluviomètric en zones del Pirineu. També és de vital importància per la pràctica d'activitats enmig de la muntanya, com poden ser l'excursionisme, l'alpinisme, l'escalada, BTT, esquí. Així doncs, s'ha cregut important realitzar un petit estudi sobre la pluja al Pirineu català per tal d'identificar les situacions meteorològiques associades a extrems pluviomètrics als Pirineus, i mirar d'establir un criteri de detecció de les anomalies pluviomètriques a nivell mensual.

4 Dades

4.1 Pluviometria

Per tal de dur a terme l'estudi de la precipitació al Pirineu català és necessari disposar de les sèries històriques dels pluviòmetres que es troben dins la regió. En una tasca de recopilació d'informació realitzada en el sí del projecte CENIT - Sostaqua s'han aconseguit les dades de tres xarxes diferents (AEMET, SAIH i XEMA) que seran detallades en els següents subapartats. D'aquestes cobertures d'estacions, la xarxa AEMET és la més llarga en el temps i les altres dues (SAIH i XEMA) pertanyen a instal·lacions més recents (fig. 4.1). Tot i que en global la base de dades de pluja es té pel període 1940-2008, tan sols s'utilitzaran els valors compresos en el període 1958-2006, coincidint amb el de les dades sinòptiques que s'utilitzen. Així doncs, bona part del treball ha consistit en la recopilació i depuració de dades provinents d'estacions meteorològiques.

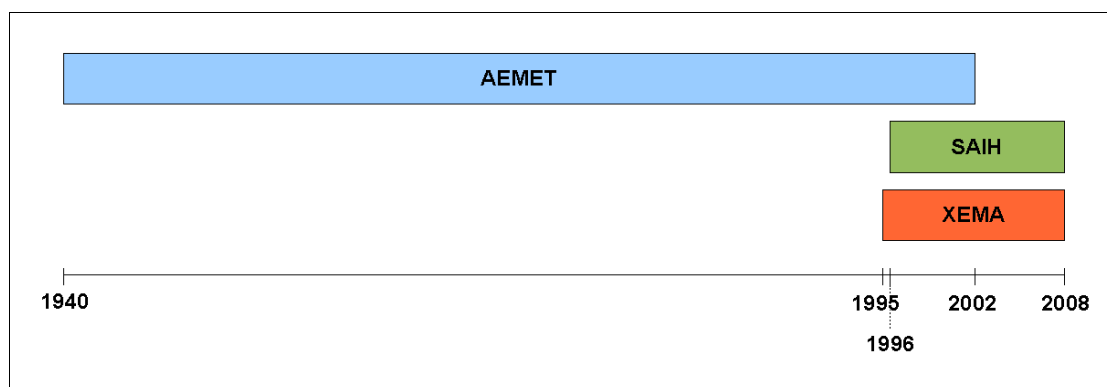


Figura 4.1: Períodes temporals de les tres xarxes de pluviòmetres emprats en l'estudi

4.1.1 Estacions AEMET

A nivell històric s'ha utilitzat una base de dades d'AEMET de 1153 estacions que inclou valors mensuals de pluja des de l'any 1940 fins al 2002 per a tot Catalunya (fig. 4.2a). 344 d'aquestes estacions sobreviuen al filtrat espacial per al domini que s'escollirà (apartat 4.2), i seran utilitzades en els càlculs posteriors.

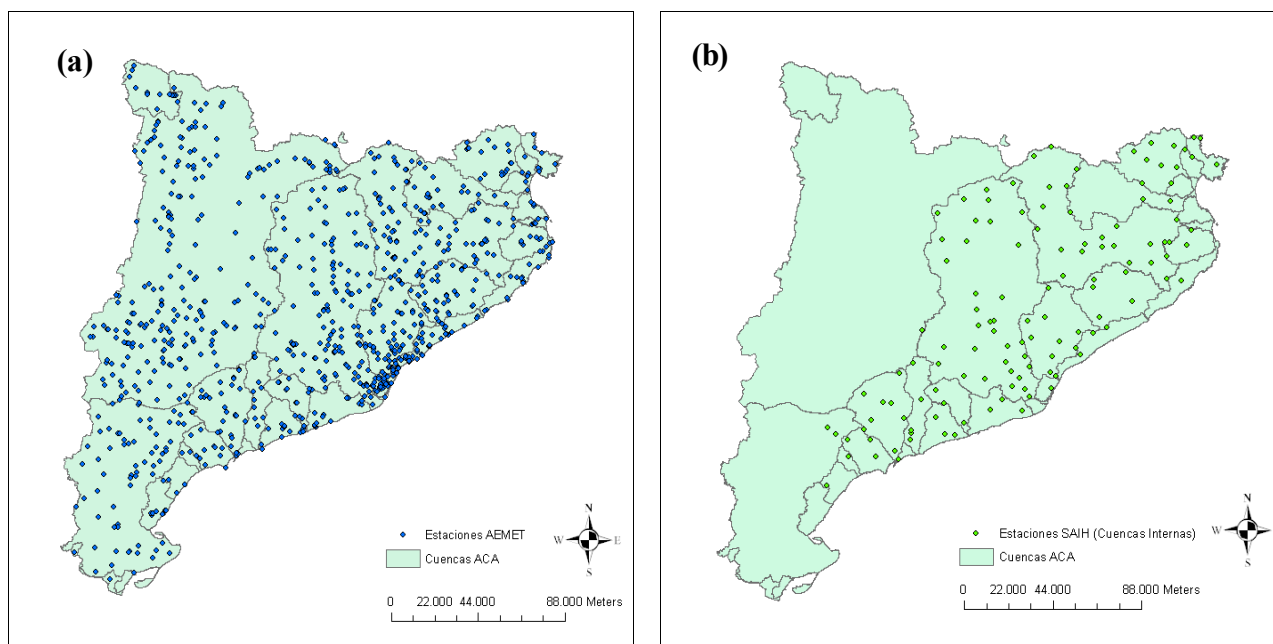


Figura 4.2: Cobertura de la xarxa d'estacions AEMET (a) i SAIH (b)

4.1.2 Estacions SAIH

D'altra banda s'han processat les dades 5-minutals de les estacions SAIH (Sistema Automàtic d'Informació Hidrològica) de les CIC (Conques Internes de Catalunya), des de l'any 1996 fins a l'actualitat (fig. 4.2b). Així doncs s'han obtingut els valors de pluja acumulada mensual pel període gener 1996 – desembre 2008, en un total de 126 estacions, de les quals només 44 es troben dins la regió d'estudi.

Les dades SAIH cinc minutals que es reben en temps real han passat un primer control de qualitat realitzat per l'ACA (Agència Catalana de l'Aigua), i al processar aquestes dades s'ha respectat aquest control eliminant els valors erronis. S'ha considerat vàlid qualsevol registre de precipitació superior a 0.1 mm, llindar de detecció dels pluviòmetres d'aquesta xarxa. En algunes estacions existeixen registres de neu que també s'han integrat en el càlcul d'obtenció de la pluja mensual.

4.1.3 Estacions XEMA

En darrer lloc s'han utilitzat les dades de la xarxa XEMA que és una Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques que gestiona el SMC i que conté registres des de mitjans de 1995 fins a l'actualitat. Aquesta informació es pot descarregar de la web de la xarxa agrometeorològica de Catalunya (www.xarxes.meteocat.cat), i en aquest cas només s'han baixat les dades de pluja mensual de 43 estacions pertanyents a la regió que és objecte d'estudi (fig. 4.3).

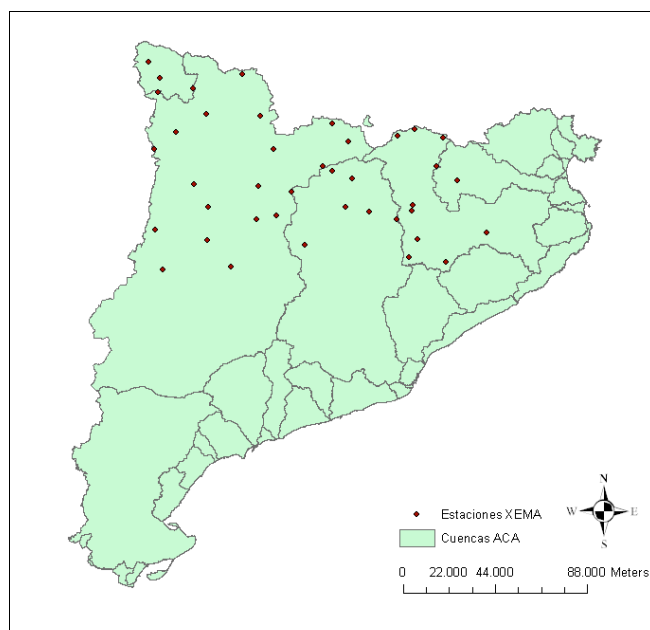


Figura 4.3: Cobertura de les estacions XEMA de que es disposa

4.2 Definició del domini d'estudi

El treball pretén estudiar la precipitació en una zona de muntanya com és el Pirineu. Ara bé alhora de definir la regió d'estudi s'han tingut en compte diversos aspectes. En primer terme hi ha una restricció espacial donada per les estacions de les quals es disposa, de manera que es tractarà únicament el territori català, amb l'excepció d'una petita part del Pirineu aragonès de la qual es tenen dades. D'altra banda com que es vol mirar d'explicar la pluviometria en zones de muntanya, el domini ha de pertànyer a zones muntanyoses, o que es vegin afectades en bona mesura per la meteorologia pròpia del Pirineu, de manera que el domini es correspondrà a zones del Pirineu i Prepirineu.

En la definició del domini s'han utilitzat també les ubicacions dels embassaments per tal de tenir informació addicional útil de la xarxa hidrogràfica catalana, com també de les conques hidrogràfiques dels principals rius. Observant la figura 4.4 es veu que el domini definit inclou les capçaleres de les principals conques catalanes (Noguera Ribagorçana, Noguera Pallaresa, Segre, Llobregat i Ter), de manera que la pluja caiguda dins del domini tindrà una estreta relació amb les captacions dels embassaments representats que abasteixen la major part del territori català.

Així doncs finalment el domini s'estén des del Pirineu aragonès més oriental fins a la comarca de l'Alt Empordà, de manera que abasta tota la serralada pirinenca i el prepirineu. En concret cobreix la zona de longitud $\in [0.51, 2.89]$ i latitud $\in [41.74, 42.88]$ (fig. 4.4). Aquest domini únicament s'utilitza per filtrar les cobertures de les tres xarxes d'estacions presentades en els apartats anteriors, de manera que defineix la regió a la qual pertanyen els valors de precipitació que s'utilitzaran.

Per tal de fusionar les tres xarxes d'estacions meteorològiques en una única sèrie de pluja, es realitza una interpolació tal com s'explica a la secció 5.3 obtenint una malla regular que inclou el domini

escollit i els seus contorns amb una resolució de 0.05° horitzontal i vertical. La interpolació kriging dóna com a resultat una malla regular, que és emprada en els càlculs posteriors, però cal tenir present que la base de dades original està formada per registres puntuals que no es troben homogèniament repartits pel territori, de manera que hi ha regions on la pluja presentada sempre serà fruit d'interpolacions entre les estacions més properes. Observant la figura 4.4 es poden veure algunes deficiències en la cobertura d'estacions, com és el cas de la vall del riu Segre en comparació amb d'altres valls del domini, i l'absència d'estacions al principat d'Andorra i a la vessant francesa del Pirineu, que brindaria una millora en l'exactitud del camp de pluja pel període estudiat.

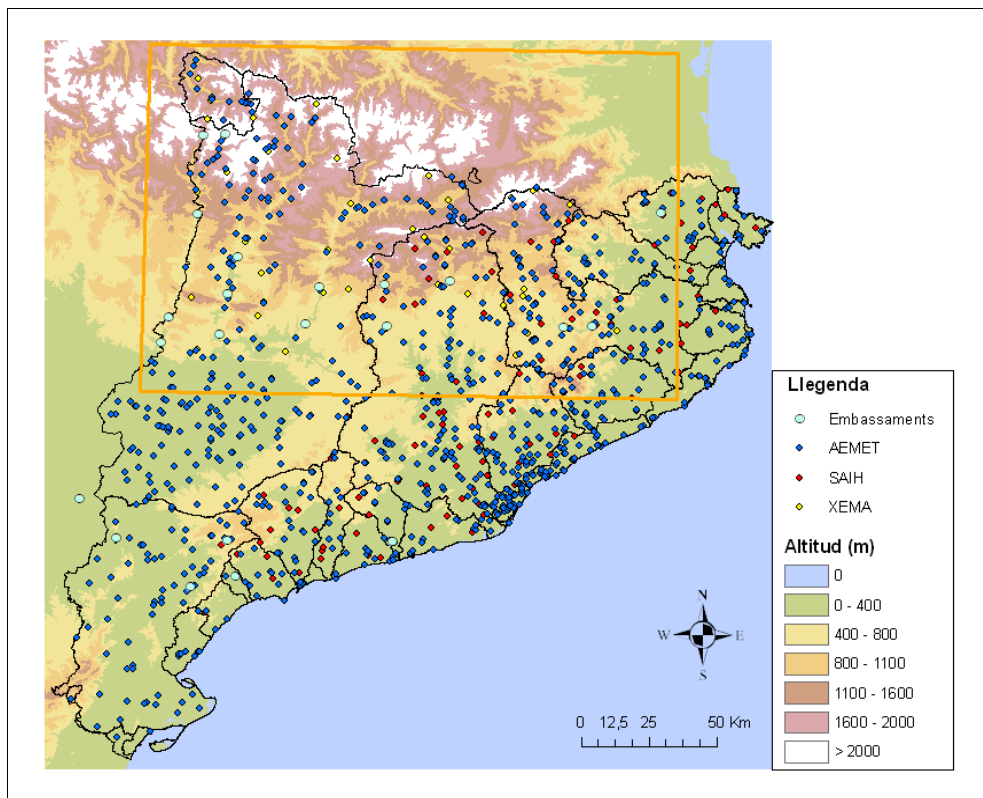


Figura 4.4: Definició del domini d'estudi pel Pirineu català (requadre taronja)

En resum es tenen 431 estacions dins del domini, que cobreixen el període 1940-2008, i amb la interpolació kriging s'obté una malla de 1984 punts (64 columnes i 31 files a una resolució de 0.05°) per aquest mateix període de 828 mesos.

4.3 Dades sinòptiques

S'han utilitzat els reanàlisis sinòptics diaris de les 00 UTC del NCEP / NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research), que es poden descarregar de la corresponent plana web gratuïtament (www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep/index.htm). En concret s'han descarregat les dades corresponents a geopotencial, humitat relativa, i temperatura a diversos nivells isobàrics. Els camps de geopotencial i humitat relativa es tenen als nivells de 500, 850 i 1000 hPa, i en el cas de la temperatura només es té a 850 i 1000 hPa.

En tots els casos la finestra escollida és la mateixa, de -30°W a 30°E per la longitud, i de 30°N a

60°N per la latitud. La resolució dels punts de malla és de 2.5° tant per la longitud com per la latitud de manera que es disposa d'una malla de 13 files per 25 columnes ($M=325$). Les dades són diàries des de l'1 de gener de 1958 fins al 31 de desembre de 2006, tenint un total 17897 dies. Per tal de treballar amb registres mensuals s'ha calculat la mitjana aritmètica de tots els valors d'un mateix mes, per a cada punt, obtenint els camps sinòptics mensuals mitjans de les 00 UTC per a tot el període, essent un total de 588 mesos (49 anys).

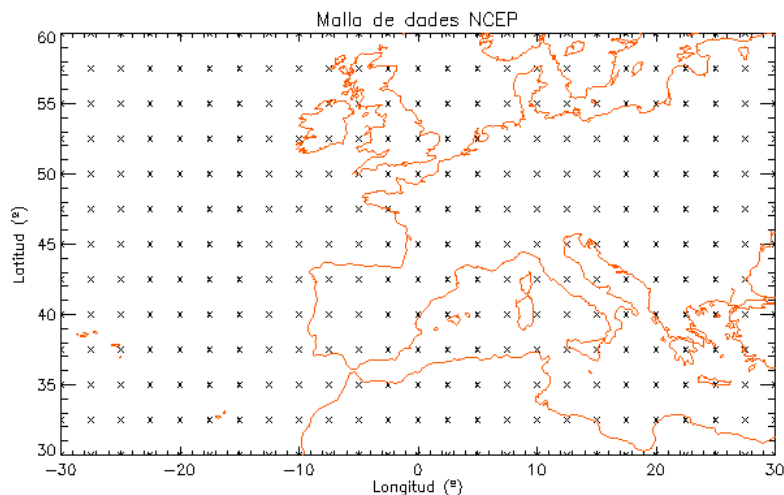


Figura 4.5: Xarxa de punts de la base de dades del NCEP

El perfil del continent europeu utilitzat en les representacions gràfiques de les dades sinòptiques s'ha extret del servei gratuït d'Internet “coastline extractor” que ofereix el NGDC (National Geophysical Data Center) del departament de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) a la seva web :<http://rimmer.ngdc.noaa.gov/mgg/coast/getcoast.html>.

4.4 Presentació del lloc

La delimitació del domini s'ha realitzat per tal d'estudiar el comportament de la precipitació en una extensa zona muntanyosa com és el Pirineu català.

	Nom del parc	Ubicació
Parcs nacionals	Parc nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici	al Pirineu de Catalunya, a cavall entre la Vall d'Aran, la Ribagorça i el Pallars
	Parc Natural de Sorteny	Andorra
	La Vall del Madriu - Perafita - Claror	Andorra
Parcs regionals	El Parc Natural dels Pirineus Catalans	al Pirineu de la Catalunya Nord (Capcir, Alta Cerdanya, Conflent, Vallespir)
	El Parc Natural dels Pirineus de l'Arieja	a l'Arieja, França
	El Parc Natural de Posets - Maladeta	a la vall de Benasc (Aragó)
	El Parc Natural de l'Alt Pirineu	al Pallars Sobirà
	El Parc Natural del Cadí - Moixeró	entre la Cerdanya i el Berguedà

Taula 1: Parcs nacionals i regionals que es troben dins el domini d'estudi

El domini que s'ha definit és d'una enorme importància a nivell natural i prova d'això és l'abundant presència de zones protegides. S'hi troben 3 parcs nacionals, dos dels quals pertanyen a Andorra, i 5 parcs regionals (taula 1).

De l'ampli ventall de tipus de climes i subtipus que corresponen a la Península Ibèrica, el domini només en conté dos. A tot el domini li correspon el clima mediterrani de muntanya, a excepció de la Vall d'Aran que pel fet de trobar-se a la vessant nord li correspon el clima oceànic de muntanya. Martín-Vide i Olcina (2001) descriuen aquests dos climes amb la següent taula:

Tipus	Subtipus	pp (mm)	T (°C)	Altres característiques
Oceànic	De muntanya	1000 - 2500	< 12	Nuvolositat abundant i elevada humitat ambiental
Mediterrani	De muntanya	600 - 2000	< 14	-

Taula 2: Tipus de climes presents en el domini. pp: precipitació anual en mm. T: temperatura mitjana anual en °C. FONT: Martín-Vide i Olcina (2001), pàg. 106

En ambdós casos la presència del subtipus climàtic de muntanya ve determinat pel factor altitud, que condiciona enormement les característiques climàtiques. Normalment, la temperatura en superfície és molt més baixa que la de les regions adjacents pertanyents a un altre subtipus climàtic, ja que la temperatura, com la majoria de variables atmosfèriques, varia amb l'altitud. L'altitud també provoca un augment de la nuvolositat i de les tempestes, de manera que en les zones de muntanya el clima, tant l'oceànic com el mediterrani, a grans trets és més humit i fresc (Martín-Vide i Olcina, 2001).

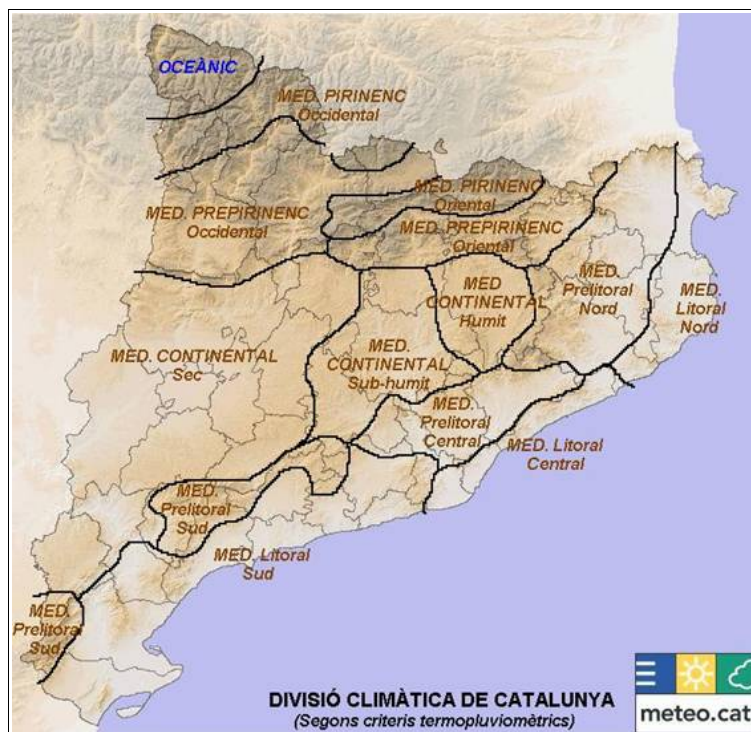
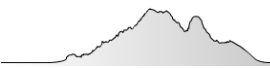


Figura 4.6: Divisió climàtica. FONT: web del SMC



A la web del SMC es pot trobar la divisió climàtica de Catalunya (fig. 4.6) realitzada pel propi Servei Meteorològic a partir de Martín-Vide (1992). Es pot constatar com el domini d'estudi que s'ha definit pertany tot ell a climes de muntanya, bé sigui oceànic o mediterrani. A la web del SMC també apareix una taula dels tipus i subtipus de clima de Catalunya extreta de Martín-Vide (1992) que és molt més detallada que la publicada a Martín-Vide i Olcina (2001). D'altra banda es pot corroborar que l'altitud juga un paper important en la climatologia de la regió d'estudi observant la figura 4.4 on s'ha representat també un model d'elevació del terreny per fer notar la complexa orografia del Pirineu.

Per tal de conèixer amb més detall la climatologia de cada comarca del Pirineu i Andorra es recomana consultar l'obra de Sacasas (1999).

5 Metodologia

5.1 Anàlisi EOF

L'anàlisi EOF, també anomenat Anàlisi en Components Principals (PCA), és un mètode estadístic segons el qual s'arriba a expressar una certa mostra de dades amb una dimensionalitat inferior que la inicial. A grans trets l'anàlisi EOF es basa en el fet que en una mostra amb moltes variables és probable que bona part de la informació recollida en les variables sigui redundant ja que les variables poden estar correlacionades. Dit d'una altra manera si es disposa la mostra de dades en forma vectorial, on cada vector correspon a un instant de temps, es tenen N vectors per tota la mostra (on N són el nombre de mesos de que es disposa). Cada vector té M components, ja que la base vectorial està formada per M vectors unitaris essent aquesta la base trivial de tots els punts de malla. Segons aquesta configuració cada coeficient que acompanya a un vector de la base correspon al valor de la variable en aquell punt de malla. Una nova base de l'espai seria aquella en la qual cada vector de la base correspongui no només a un punt de malla sinó a una cert patró de temps, de manera que cada instant de la mostra podria expressar-se com a combinació lineal de patrons de temps, enlloc d'una combinació lineal de punts de malla com es té inicialment.

A més el PCA permet trobar aquesta nova base de patrons de temps ordenats de manera que el primer vector de la base sigui aquell que explica més variabilitat de la mostra, i així successivament, i que a més tots ells siguin ortogonals. D'aquí que els vectors d'aquesta nova base vectorial s'anomenin "*Empirical Orthogonal Functions*" (EOFs). Els vectors que compleixen aquests requisits es demostra que es corresponen amb els vectors propis que s'obtenen de diagonalitzar la matriu de covariàncies de les components dels vectors de la mostra inicial (Von Storch i Zwiers, 1999). Els valors propis que s'obtenen de la diagonalització matricial si es normalitzen corresponen a les variàncies explicades per cada vector propi, és a dir, per cada EOF. Per poder expressar la mostra vectorial inicial en la nova base vectorial de patrons de temps (EOFs) cal aplicar un canvi de base, i s'obtenen els coeficients que acompanyen a cada EOF, que reben el nom de PCs ("*Principal Components*").

En el present treball s'ha aplicat l'anàlisi EOF en dos casos diferents. D'una banda sobre el camp de precipitació (*pp*) al domini del Pirineu presentat a l'apartat 4.2. I d'altra banda s'ha aplicat l'anàlisi EOF sobre els diversos camps sinòptics que s'han presentat: geopotencial a tres nivells (*gp*), humitat relativa a tres nivells (*hr*) i temperatura a dos nivells (*T*). Pel cas concret del geopotencial a 1000 hPa, també s'ha calculat l'anàlisi EOF per les quatre submostres estacionals, de manera que en total s'han calculat el PCA en 13 camps diferents.

Abans de realitzar l'*EOF Analysis* és necessari preparar les dades d'entrada per millorar els resultats. Primerament s'ha extret la mitjana mensual de cada punt (índex *i*) per tota la mostra per tal d'eliminar l'estacionalitat de les mesures obtenint la fluctuació, pertorbació o anomalia segons:

$$x'_{ijk} = x_{ijk} - \bar{x}_{ij} \quad \text{on } i=1, \dots, M, \quad j=1, \dots, 12 \text{ i } k=1, \dots, 49$$

L'índex *i* representa el punt de malla, i els índexs *j* i *k* representen el temps, essent *j* el número de mes i *k* el número d'any. D'ara en endavant, en molts casos no s'especifiquen els subíndexs (x') però es farà referència a les fluctuacions de geopotencial per a cada punt i cada mes (x'_{ijk}).

En segon lloc donat que es treballa amb una malla cartesiana de punts s'ha de tenir present l'aberració que incorporen les dades amb l'augment de la latitud. Els meridians convergeixen els pols però en la malla cartesiana són tinguts com a paral·lels. Aquest fet provoca que cada unitat d'àrea de la malla contingui un nombre major de punts de geopotencial com més elevada sigui la latitud (Wilks, 2006). Per tal de corregir l'aberració que conté la matriu de covariàncies degut a aquesta diferència d'àrees a diferents latituds, s'ha introduït un pes ω_ϕ de manera que la matriu final tingui la correcció latitudinal correcta:

$$\omega_\phi = \sqrt{\cos(\phi)}$$

Al finalitzar la preparació de les dades, s'aplica l'anàlisi EOF pròpiament dit, en el mode espacial i utilitzant la matriu de covariància, seguint la recomanació de Borgognone et al (2001). Com que les EOFs apareixen ordenades segons la variància que expliquen, es pot reduir la dimensionalitat de la base vectorial a costa de perdre l'exactitud final de la mostra. Òbviament per explicar tota la variància de la mostra inicial es necessita una nova base vectorial que contingui tantes EOFs com vectors tenia la base inicial, és a dir només es podrà mantenir tota l'exactitud utilitzant tantes EOFs com punts de malla es tinguin. Però precisament l'objectiu d'aquest tipus d'estudi es poder caracteritzar cada mes de la mostra amb uns pocs patrons de temps, de manera que després de fer l'*EOF Analysis* s'utilitzaran només les 7 primeres EOFs, ja que en tots els casos expliquen entorn del 95% de la variabilitat de la mostra.

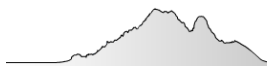
Cada una d'aquestes EOFs pot tenir una fase positiva o negativa i segueix sent de la mateixa família vectorial, ja que la EOF no és més que un autovector de la matriu de correlació. La fase positiva s'obté quan la EOF presenta una PC positiva per un mes en concret, i la fase negativa s'obté amb valors negatius de la PC. Per tal de corroborar que els resultats són correctes es pot observar el patró $\bar{x}'_{ijk}$ que presenten en valor mitjà els mesos jk que tenen valors de PC màxims. Si un mes presenta un valor de PC extrem això implica que es descomposa com a combinació lineal de totes les EOFs, però amb una forta dependència amb la EOF que té la PC màxima, de manera que x' tindrà una gran semblança espacial amb la corresponent EOF. És per això que per a cada EOF se seleccionen els mesos amb PCs superiors a un cert llindar, i es calcula la mitjana de x' de tots aquests mesos. El camp resultant $\bar{x}'$ dóna informació sobre el camp real de geopotencial que correspon a la fase positiva d'aquella EOF.

Donada la semblança entre els gràfics de les EOFs i els dels camps sinòptics hom pot associar erròniament els elements sinòptics als camps EOFs. És el cas de parlar d'anticiclons i depressions en veure valors alts i baixos valors en el gràfic d'una EOF de gp' . Ha de quedar clar que una EOF és tan sols un autovector expressat en la base vectorial antiga (M punts de malla), i per tant no correspon a cap observació real del temps. Per esdevenir un camp x'_{jk} és necessari multiplicar el valor de la PC_{jk} a la EOF corresponent i sumar les contribucions de la resta d'EOFs.

$$x'_{jk} = PC1_{jk} \cdot EOF1 + PC2_{jk} \cdot EOF2 + PC3_{jk} \cdot EOF3 + \dots$$

Així doncs per evitar les possibles confusions, les EOFs s'explicaran per mitjà de pols positius o negatius. Aquests pols correspondran a anomalies reals amb el mateix signe quan $PC_{jk} > 0$ o amb el signe invers quan $PC_{jk} < 0$. Finalment és possible "recuperar" el camp original, sumant la mitjana mensual a cada punt, i desfent el càlcul del pes de la latitud.

Per tal de descobrir les causes que poden donar lloc a mesos anòmals amb dèficit pluviomètric, s'ha



realitzat l'anàlisi EOF per tota la mostra que es té de gp'_{1000} , i també s'ha realitzat per les submostres estacionals, agregant els mesos segons les estacions meteorològiques (hivern = DGF, primavera = MAM, estiu = JJA, tardor = SON).

5.2 Llenguatge de programació IDL

L'altra eina bàsica pel desenvolupament d'aquest treball ha estat el llenguatge de programació IDL (Interactive Data Language). S'ha escollit aquest llenguatge per a realitzar els càlculs per la seva potencialitat alhora de confeccionar les representacions gràfiques i per la seva eficiència en el càlcul vectorial i matricial.

Per a confeccionar els gràfics de geopotencial s'ha utilitzat la resolució de punts pròpia de les dades del NCEP. Pel que fa a la precipitació la resolució espacial és molt més fina ja que s'ha realitzat una interpolació kriging a voluntat. Es treballa amb dues regions diferents. En els dos casos s'han representat les dades segons uns eixos cartesianes de longitud i latitud, és a dir, sense tenir en compte la projecció corresponent de les dades ja que l'error comès és molt petit. Alhora d'observar els gràfics cal tenir present que el rang de colors és diferent en cada cas ja que s'ha ajustat al recorregut de la variable per a cada gràfic, és per això que també s'han decidit representar algunes isolínies amb les etiquetes corresponents.

D'una banda els camps que pertanyen al domini del Pirineu es representen dins la finestra $\text{longitud} \in [0.3, 3.4]$ i $\text{latitud} \in [41.5, 43.0]$ amb una resolució espacial de 0.05° . D'altra banda, els camps sinòptics s'han representat dins la finestra $\text{longitud} \in [-30, 30]$ i $\text{latitud} \in [30, 60]$ a una resolució de 2.5° .

5.3 Esquema del treball

En primer terme és necessari calcular una malla regular de precipitació per la regió d'estudi, a partir de les dades de pluviometria que es tenen, presentades en la secció 4.1.3. S'ha aplicat el mètode d'interpolació kriging exponencial amb les sèries que es tenen per totes les estacions d'AEMET, SAIH i XEMA després de ser filtrades pel domini d'estudi: $\text{longitud} \in [0.51, 2.89]$ i $\text{latitud} \in [41.74, 42.88]$. D'aquesta manera s'obté una malla de 0.05° de pas de malla horitzontal i vertical. Anteriorment s'ha computat la mitjana entre estacions properes, aquelles que es troben a una distància inferior a la diagonal entre punts de malla, per tal que el kriging s'executi satisfactòriament. D'aquesta manera s'obté una malla de 1984 punts (64 columnes i 31 files) per als 828 mesos. Tots els gràfics de camps de pluja es representen dins la mateixa finestra: $\text{longitud} \in [0.3, 3.4]$ i $\text{latitud} \in [41.5, 43.0]$ per la qual s'ha calculat el kriging i que inclou els contorns del domini d'estudi.

Es calculen els camps mitjans anuals, estacionals i mensuals de precipitació en el domini pel període 1940-2008. També es calcula el coeficient de variació de la precipitació, definit a cada punt de malla com la desviació estàndard dividida per la mitjana, en forma de percentatge (Rodriguez-Puebla et al, 1998). Aquest coeficient, juntament amb les mitjanes anuals i estacionals es representen gràficament per tal de descriure breument la climatologia de la zona. Amb el mateix objectiu s'ha calculat també l'anàlisi EOF de les anomalies mensuals de precipitació.

A partir dels camps mitjans mensuals es poden localitzar els mesos anòmals en els que hi ha un clar dèficit de pluja o un clar excés realitzant un doble filtratge. Es consideraran com a anòmals aquells en què hi hagi un predomini espacial de punts (filtre areal), els quals hauran d'estar suficientment allunyats de la seva mitjana mensual (filtre puntual). Per dur a terme aquest filtratge en primer terme es tipifica cada punt i de la mostra (x_{ijk}) amb la seva mitjana mensual $(\bar{x}_{ij})$ i desviació estàndard mensual (S_{ij}) obtenint els nous valors z_{ijk} , pel mes j i l'any k .

$$z_{ijk} = \frac{x_{ijk} - \bar{x}_{ij}}{S_{ij}}$$

Tot seguit s'estableix el primer filtrat de manera que només sobreviuen els valors que superen el llindar L en valor absolut, i en conseqüència aquests podran ser considerats punts anòmals.

$$llindar = L \rightarrow \begin{cases} \text{si } z_{ijk} > +L & \rightarrow z_{ijk} \text{ és anòmal pel mes } j \text{ de l'any } k \\ \text{si } z_{ijk} < -L & \rightarrow z_{ijk} \text{ és anòmal pel mes } j \text{ de l'any } k \end{cases}$$

El punt de malla podrà ser positiu o negatiu diferenciant aleshores entre un excés de pluja i un dèficit hídric, respectivament. I a continuació s'estableix un segon filtre, corresponent al percentatge de punts anòmals en un mateix instant per tal que el mes sigui considerat com a anòmal. Es realitzen representacions gràfiques per a diversos llindars areals (filtre areal) i de valor tipificat (filtre puntual) per tal de trobar el filtratge més òptim. Els mesos anòmals s'anomenaran mesos plujosos i secs, on l'atribut de sequera s'utilitza en el sentit més col·loquial de la paraula d'absència de precipitació tot i que a nivell rigorós hi ha múltiples definicions de sequera (Álvarez et al, 2008). Aquesta selecció de mesos anòmals s'ha realitzat tan sols pel període 1958-2006, ja que és necessària la coincidència amb el període disponible dels camps sinòptics per als passos següents, i únicament emprant els punts de malla interiors al domini per evitar la propagació de les incerteses del kriging dels punts exteriors.

S'ha realitzat l'anàlisi EOF dels diversos camps sinòptics que es tenen a diferents nivells: geopotencial, humitat relativa i temperatura. Pel cas particular del geopotencial a 1000 hPa es realitza un EOF anàlisi a nivell estacional a partir de quatre mostres concatenades amb els mesos pertanyents a les diferents estacions. És amb els resultats d'aquests anàlisis EOF que es realitza el posterior estudi de relació amb les sequeres.

Per entendre el significat de cada EOF pot interpretar-se la disposició dels diversos pols, ara bé per obtenir informació sobre la dependència de cada EOF amb la precipitació al domini pirinenc és necessari un altre pas per acoblar les dues escales: la sinòptica de les EOFs amb la mesoscala del domini pirinenc. És per això que s'han definit dues estratègies alternatives, explicades en l'apartat següent (5.4).

En la figura 5.1 apareix el diagrama de flux que relaciona els programes elementals confeccionats per dur a terme l'estudi. Els únics valors d'entrada que es tenen són els registres mensuals dels pluviòmetres de tres xarxes diferents, i els registres mensuals de geopotencial a 1000 hPa del NCEP, ja que la resta de camps sinòptics tan sols s'han utilitzat per calcular-ne les EOFs. La programació es divideix en cinc passos successius. Primerament es realitza la preparació de les dades de precipitació i de geopotencial a 1000 hPa (gp_{1000}). Igualment s'ha realitzat la preparació de la resta de camps sinòptics però el diagrama (fig. 5.1) tan sols fa referència al treball aplicat sobre el geopotencial a 1000 hPa. Tot seguit es realitzen els anàlisis preliminars de la precipitació i del gp_{1000} . En aquest bloc també hi pertoca l'anàlisi EOF total i estacional d'aquest camp, però

aquestes aplicacions han estat incloses dins el programari del bloc següent. En darrer terme es realitzen les estratègies 1 i 2, basades en dues metodologies presentades a continuació que relacionen l'anàlisi EOF del gp_{1000} amb les anomalies detectades en el camp de precipitació, i s'obtenen els gràfics finals que permeten la discussió i conclusions finals.

Per corroborar que les deduccions que s'hagin fet sobre la caracterització de les sequeres es realitza un breu anàlisi de dos mesos, que es troben fora del període emprat en l'estudi. Es tracta dels mesos de març i abril de 2008, que corresponen a les acaballes de la darrera sequera de Catalunya.

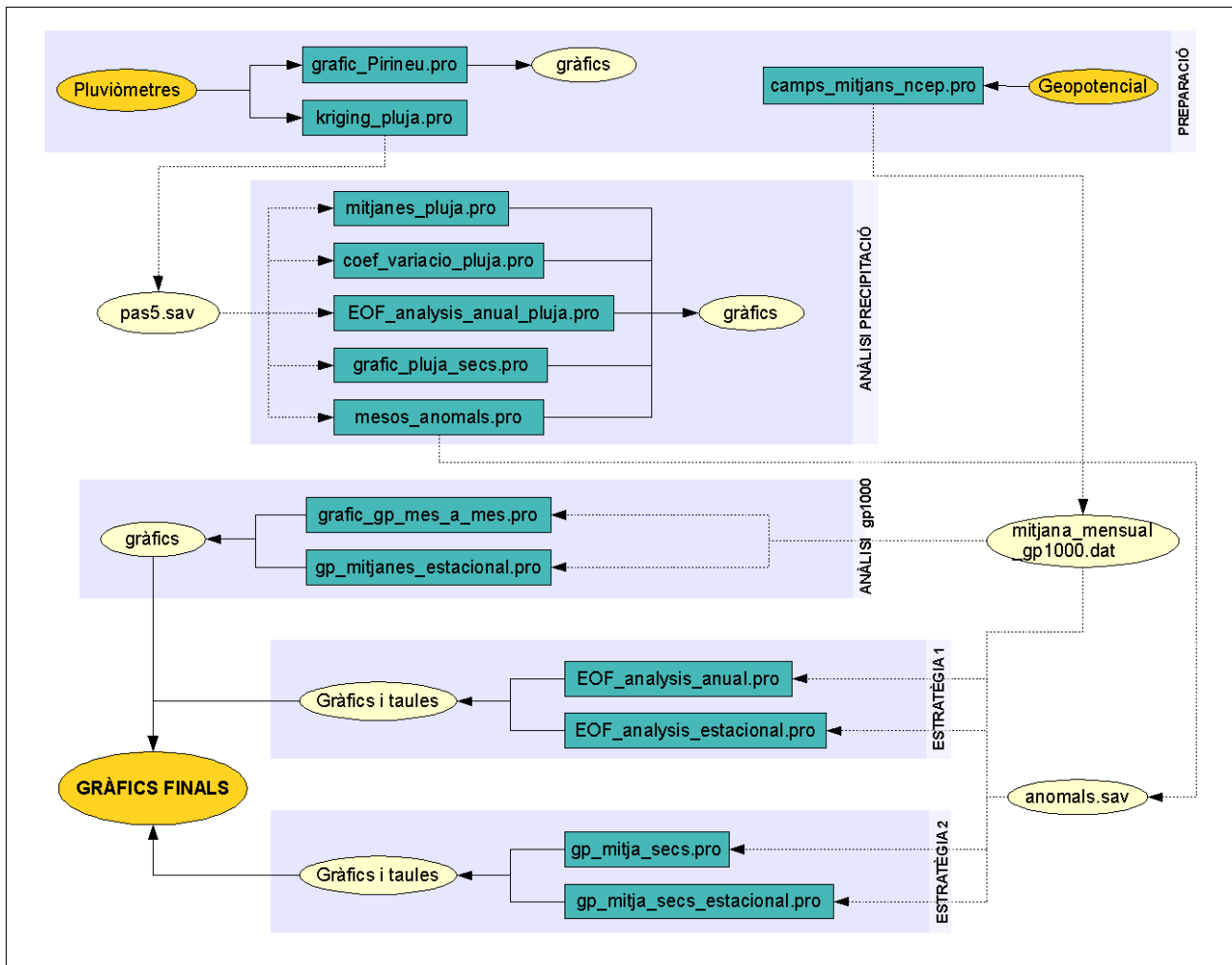


Figura 5.1: Diagrama de flux dels programes que s'han dissenyat en l'estudi del geopotencial a 1000 hPa.

No es tenen en compte els programes utilitzats en la resta de camps sinòptics.

5.4 Enllaç entre escales

L'objectiu del treball, com ja s'ha comentat, és aplicar la descomposició dels mesos en patrons de temps (EOFs), per tal d'establir relacions entre anomalies de precipitació al Pirineu i aquests patrons de circulació atmosfèrica. Així doncs és necessari definir una metodologia que permeti acostar aquestes dues escales ben diferenciades, l'escala sinòptica del geopotencial a 1000 hPa amb la mesoscala de la precipitació al Pirineu. Per tal de donar més versemblança als resultats obtinguts es

segueixen dues estratègies diferents que s'expliquen a continuació. Ambdues estratègies parteixen dels dos resultats elementals de cada una de les escales. Per part de l'escala sinòptica es tenen les EOFs i PCs resultants de l'anàlisi EOF del camp gp'_{1000} agregat a nivell estacional. I per part de la mesoscala es té la detecció de mesos anòmals amb dèficit pluviomètric que es realitza a la regió d'estudi del Pirineu.

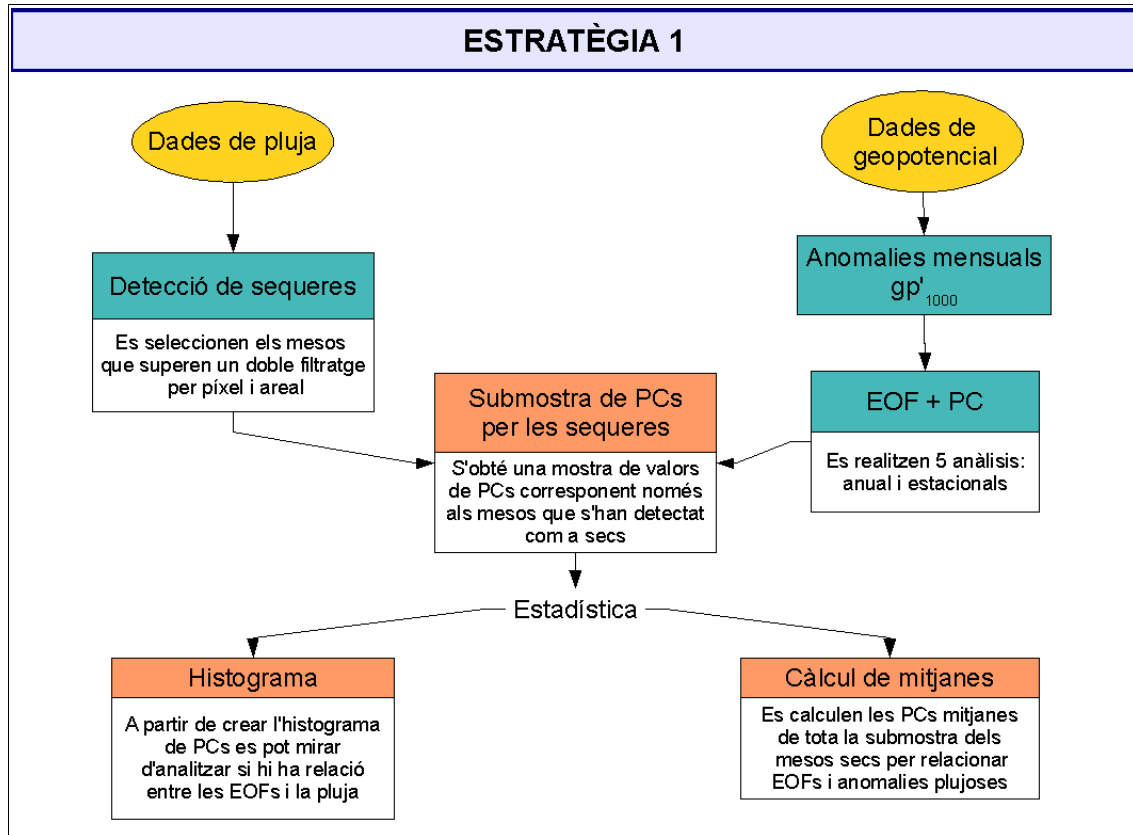


Figura 5.2: Primera estratègia proposada

La primera estratègia (figura 5.2) proposa extreure els mesos secs de la sèrie de PCs, per tal d'obtenir una submostra amb la qual seria possible veure la caracterització d'anomalies de pluja per mitjà d'EOFs. Per analitzar aquesta submostra, una opció pot ser estudiar-ne els histogrames, i una més eficient i menys costosa, seria calcular les mitjanes de cada cas (fins a 7 PCs per als casos estacionals i anual) i representar aquestes mitjanes amb els seus errors associats en un únic gràfic que permeti comparar els diversos casos.

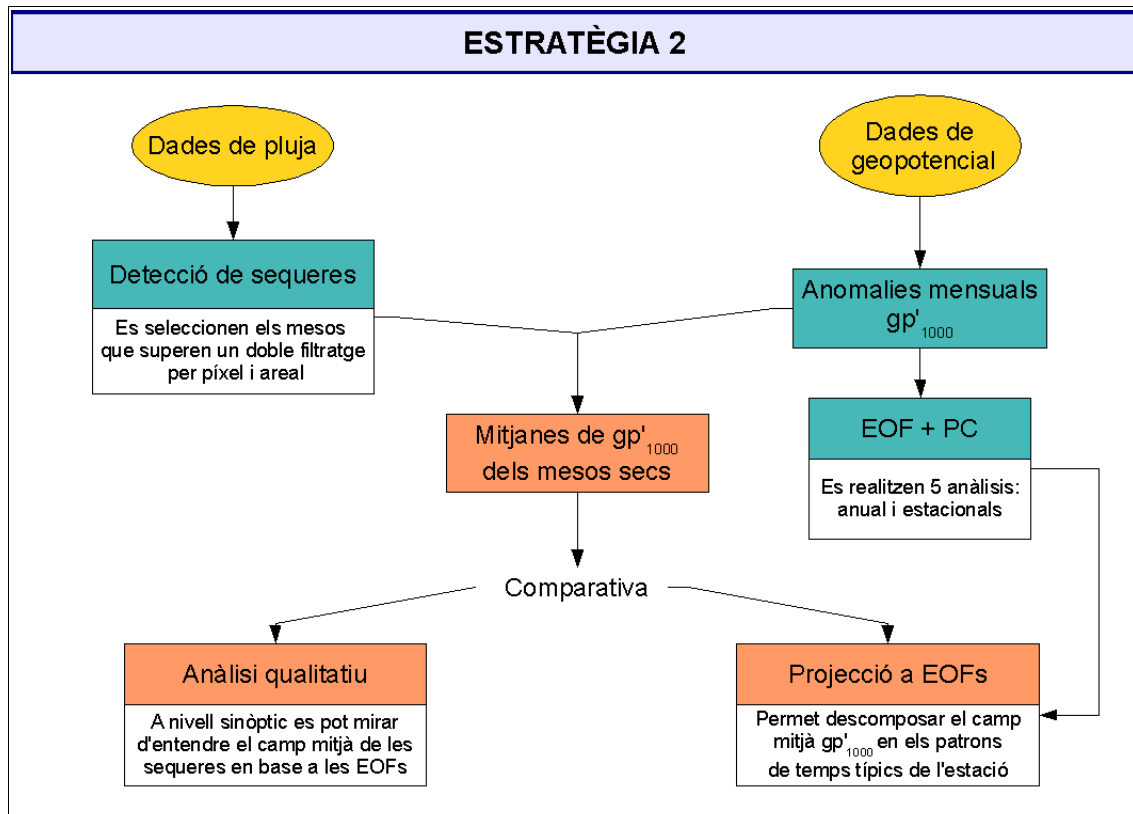


Figura 5.3: Segona estratègia proposada

La segona estratègia proposada (figura 5.3) requereix calcular en primer terme el camp mitjà d'anomalia de geopotencial a 1000 hPa ($\overline{gp}'_{1000}$) de tots els mesos secs. Aquest camp sinòptic mitjà dels mesos secs es calcula per a la mostra anual i per a les mostres estacionals. A simple vista, ja es podria realitzar un anàlisi qualitatiu per veure quin patró sinòptic és el causant majoritari, per cada època de l'any, del dèficit pluviomètric. Per vincular-ho amb les EOFs una possible forma d'analitzar aquests camps mitjans, consisteix en realitzar un canvi de base passant a la base vectorial de les EOFs. Així s'obtenen els valors de PC que descriuen els camps mitjans segons les EOFs, i es podrà descobrir quines són les EOFs més importants per a les sequeres i el comportament segons l'època de l'any.

Finalment a partir dels valors obtinguts de les components que tenen les EOFs pels mesos secs, es confeccionen dues taules a partir dels resultats de les dues estratègies, on tan sols hi consten les tres EOFs que tenen més pes en la combinació vectorial.

6 Resultats

6.1 Camps de pluja acumulada mitjana

Amb les dades de pluviometria de la malla que es disposa pel domini del Pirineu s'han realitzat les diverses acumulacions mitjanes mensuals, estacionals i anual, pel període complet 1940-2008. D'aquesta manera es coneix la distribució de la pluja i les quantitats precipitades al llarg de l'any pel període d'estudi. Tot seguit es presenta la pluja anual mitjana (fig. 6.1) per tal d'entendre a grans trets el comportament de la precipitació al domini estudiat. Es poden observar dues regions amb més precipitació corresponents al Pirineu central, incloent la zona muntanyosa del Parc Nacional d'Aigüestortes i l'Estany de Sant Maurici i el Parc de la Maladeta i Posets, i una altra zona ubicada al Ripollès. Aquests dos pics de pluja són fins a 200 mm superiors a la pluja acumulada als voltants. Les precipitacions més baixes es troben ubicades en bona mesura a la vall del riu Segre i la Noguera Pallaresa.

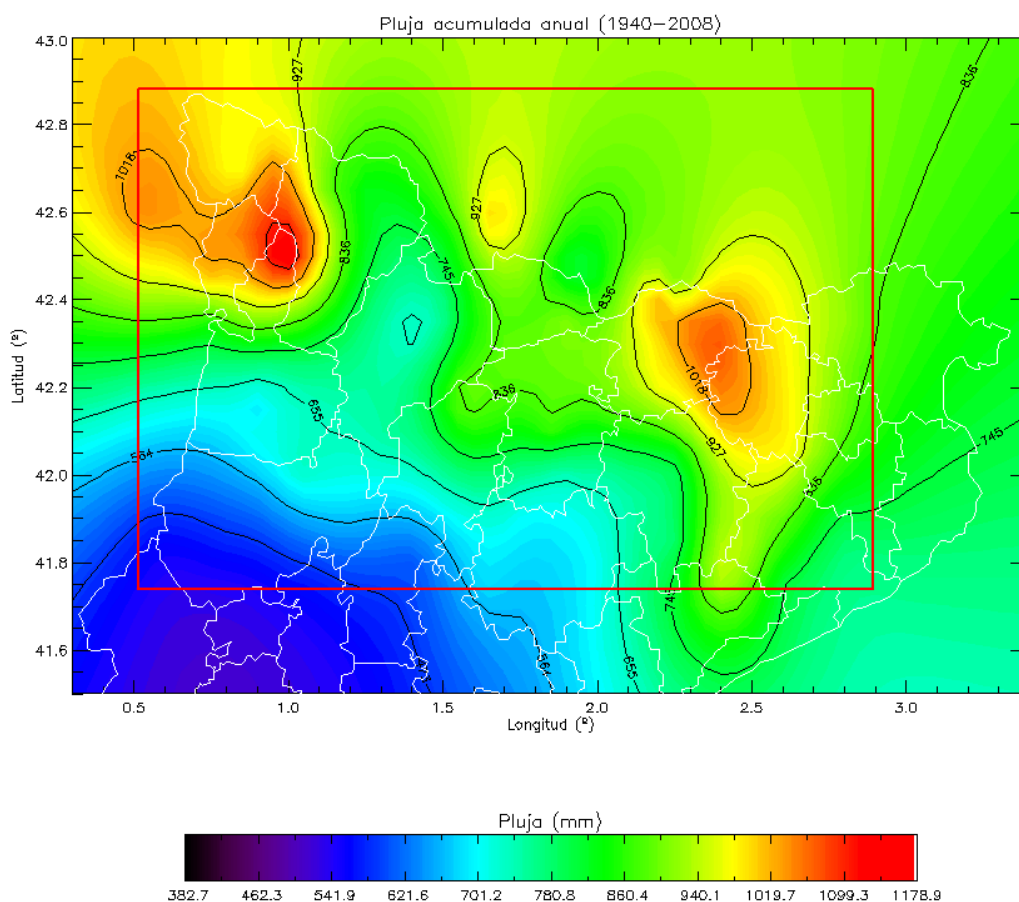


Figura 6.1: Pluja acumulada anual mitjana de tots els registres mensuals de pluja pel període 1940-2008

Es pot comparar aquest resultat amb el mapa de precipitació mitjana anual de l'atles climàtic de Catalunya publicat pel SMC, tenint en compte que el període emprat a l'Atles Climàtic és el 1961-1990 (fig. 11.1). Els resultats obtinguts són bastants bons ja que s'ha obtingut una distribució molt semblant, i amb uns valors mitjans anuals molt propers. Destaquen les correctes localitzacions

dels màxims del parc nacional d'Aigüestortes i del Ripollès, i dels mínims associats a les valls del Segre i del Noguera Pallaresa.

Les mitjanes estacionals s'han realitzat segons els trimestres següents: hivern (DJF), primavera (MAM), estiu (JJA) i tardor (SON). Observant les quatre mitjanes estacionals es poden observar les diferències associades amb l'època de l'any (fig. 6.2). Es pot veure que l'estació menys plujosa és l'hivern amb diferència.

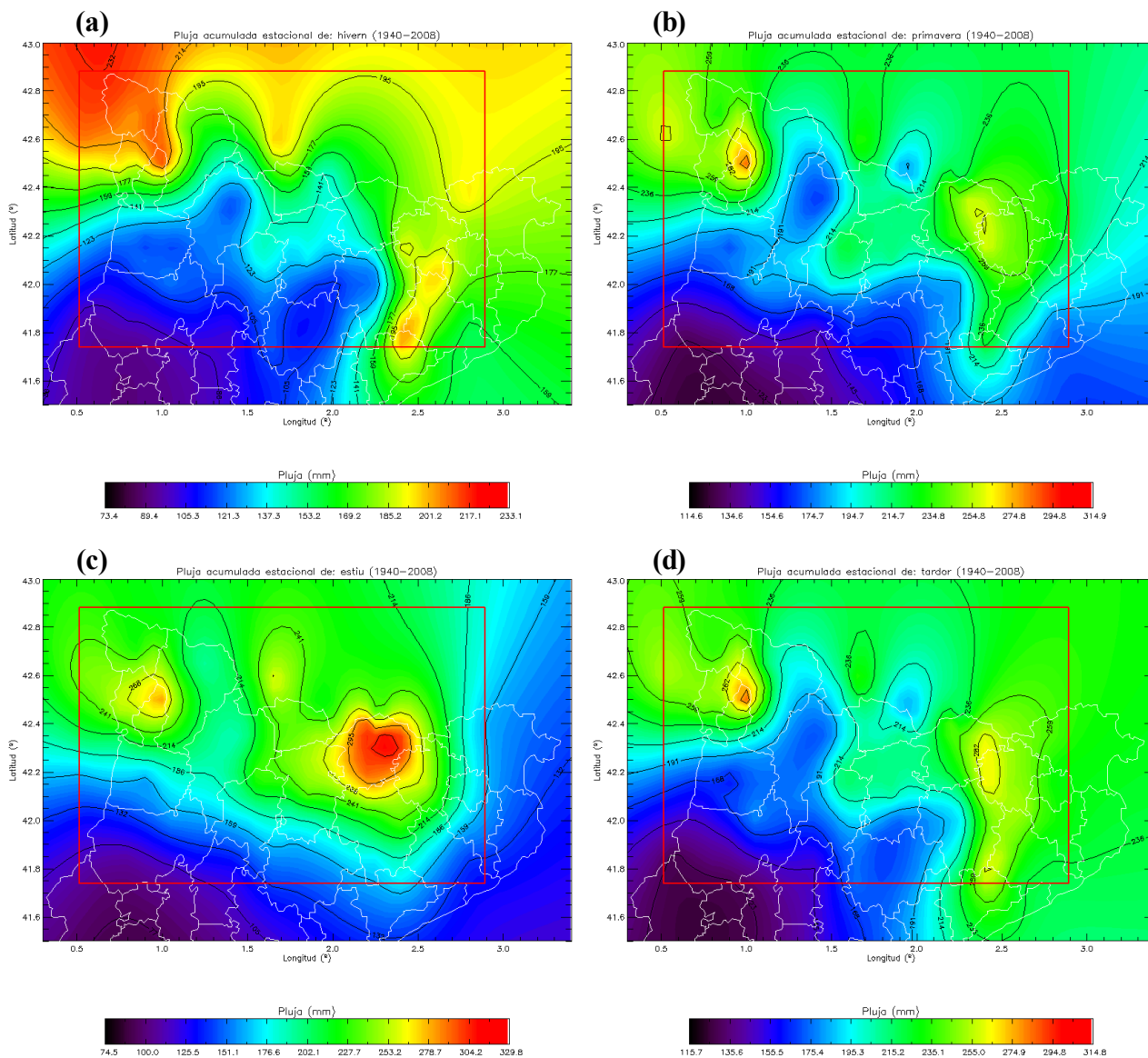


Figura 6.2: Acumulacions mitjanes estacionals de pluja pel període 1940-2008.

Hivern (a), primavera (b), estiu (c) i tardor (d)

El màxim valor registrat de pluja es troba a l'estiu al Ripollès, associat a la forta convecció provocada pel fort escalfament radiatiu del sol, típic de l'estiu. En el mapa de precipitació mitjana d'estiu de l'Atlas climàtic de Catalunya (fig. 11.2c) també s'observa el màxim del Ripollès, i també en la literatura es cita que als naixements dels rius Ter i Freser es troben les zones amb la major precipitació estival (Sacasas, 2006).

Un altre aspecte a destacar és que en totes les estacions s'observen també les ombres pluviomètriques, és a dir, aquelles regions on la precipitació és molt inferior a les zones del voltant.

Al Pirineu català hi ha dues ombres pluviomètriques corresponents a la vall baixa de la Cerdanya i l'Urgellet, i una zona del Pallars compresa entre Tavascan i Lladorre (Sacasas, 2006). En general però en els mapes pluviomètrics que s'han obtingut s'observen dèficits pluviomètrics estesos al llarg de les valls dels rius Segre i Noguera Pallaresa, si bé apareixen reforçats en les regions d'ombra pluviomètrica. Aquestes zones tenen un règim especial pluviomètric degut al fet que la configuració de l'orografia dificulta enormement les adveccions humides (Sacasas, 2006). Cal fer notar també la gran semblança entre els camps pluviomètrics de la primavera i la tardor coincidint perfectament en valor i en ubicació els màxims i els mínims pluviomètrics. Aquestes dues estacions són molt plujoses al Pirineu, ja que es registra, a banda del màxim del Ripollès, un altre màxim molt marcat al Parc Nacional d'Aigüestortes. Tot i així el màxim del Ripollès de l'estiu és superior al de la resta d'estacions, essent doncs l'estació més plujosa la de l'estiu i la més seca la d'hivern, tal com corrobora la “Divisió climàtica de Catalunya segons el règim termopluviomètric” del SMC.

Un altre magnitud que és d'interès per tal d'entendre millor el comportament de la precipitació al Pirineu és el coeficient de variació presentat a la secció 5.3. S'ha calculat aquest coeficient amb totes la sèrie sencera pluviomètrica obtenint un cert patró de variació (fig. 6.3).

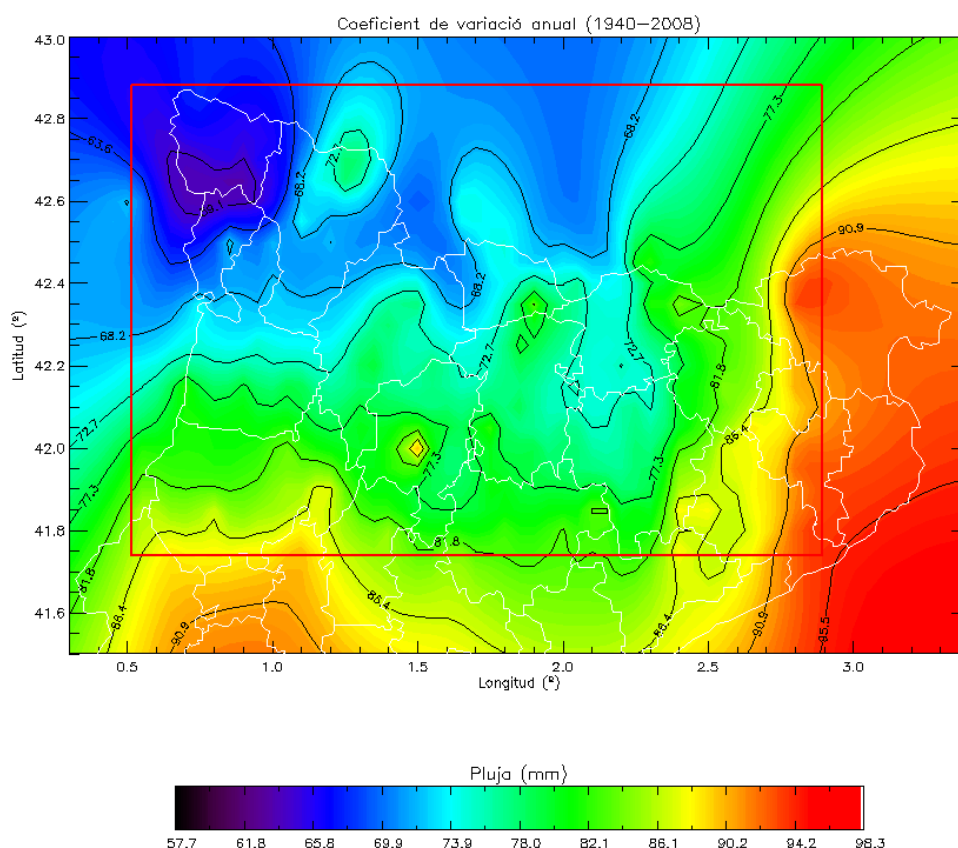


Figura 6.3: Coeficient de variació de la precipitació (1940-2008)

A grans trets es pot observar com la variabilitat és major a la regió oriental dels Pirineus catalans i és més petita a la regió occidental, que correspon a la Vall d'Aran. Pel que fa a la regió dels Prepirineus la variabilitat oscil·la molt menys. Aquests resultats concorden amb els publicats per Rodriguez-Puebla et al (1998) en l'estudi de la precipitació a tota la Península Ibèrica.

6.2 Detecció de mesos amb precipitació anòmla

En aquest apartat es pretenen detectar els mesos amb anomalies de precipitació dins del període 1958-2006 i prenent tan sols els punts de malla interiors al domini. És a dir es localitzaran els mesos on la precipitació ha estat molt superior a la mitjana i els mesos associats a dèficit pluviomètric. Simplificant la nomenclatura es parlarà d'anomalia plujosa o mesos plujosos, i d'anomalia seca o mesos secs. Cal remarcar que un mes sec no ha de confondre's amb sequera ja que aquesta ha de perdurar en el temps i una anomalia seca només es referirà a un mes.

Gràficament es poden comparar els diversos llandars per tal d'escollir els més adients per a l'estudi que es pretén dur a terme (fig. 11.10). D'una banda si s'estableix un llinar areal molt elevat, s'està imposant la necessitat que l'anomalia de precipitació sigui generalitzada a gran part de la superfície del domini. I quan es fixa un llinar alt pel valor tipificat, s'imposa el fet que l'anomalia de cada punt sigui prou accentuada. Depenent de com s'estableixen aquests valors la sèrie de mesos anòmals varia considerablement, tal com es pot veure en els gràfics que s'han inclòs als annexos. S'ha comprovat la localització de mesos anòmals amb els mesos secs que obté el CEDEX (Álvarez et al, 2008), per tal de determinar quina selecció és la més òptima.

Finalment s'ha considerat que no es poden utilitzar llandars molt restrictius per sí sols, sinó que s'ha d'utilitzar una bona combinació dels dos criteris per tal d'obtenir resultats satisfactoris. Així doncs s'han pres com a punts anòmals aquells que excedeixen el valor tipificat (z_i) de 0.7 (anomalia plujosa) i -0.7 (anomalia seca), i com a mesos anòmals s'han pres aquells en els quals més del 70% dels punts siguin anòmals (fig. 6.4). Tot plegat ha permès detectar el nombre d'anomalies citades a la taula 3. L'estiu és l'estació que presenta menys seques mentre que l'hivern és la que en presenta més, però tot i així són més importants les de l'estiu ja que és l'estació més plujosa mentre que l'hivern és l'època menys plujosa segons la climatologia (fig. 6.2).

	SECS	PLUJOSOS	TOTAL
Hivern	22	9	31
Primavera	19	11	30
Estiu	17	9	26
Tardor	20	14	34

Taula 3: Resum de la detecció d'anomalies

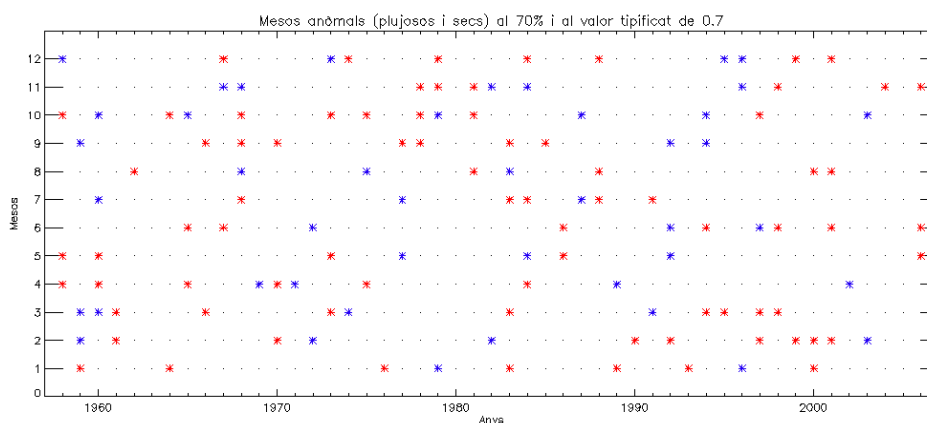


Figura 6.4: Detecció dels mesos anòmals amb llandars del 70% i del 0.7. Mesos plujosos (blau) i secs (vermell).

Un mètode alternatiu es podria basar en la sèrie de mitjanes areals de tota la mostra. A partir de l'histograma d'aquesta sèrie es podrien prendre com a mesos anòmals aquells que corresponguessin a les cues de la funció de distribució. Tot i així aquest mètode s'ha descartat perquè al calcular les mitjanes espacials es podrien produir compensacions, entre diferents regions del domini, tot i que aquest sigui petit, de manera que es perdria la capacitat de detectar alguns mesos anòmals en els

quals l'anomalia no hagi estat del tot generalitzada. Sabent que el domini emprat conté principalment la vessant sud del Pirineu però també conté estacions de vessant nord, és probable que es donin situacions de compensació, ja que algunes configuracions sinòptiques són molt favorables per a la precipitació a una vessant i a l'altra no, tal com es veurà en l'anàlisi EOF de la pluja (apartat 6.3).

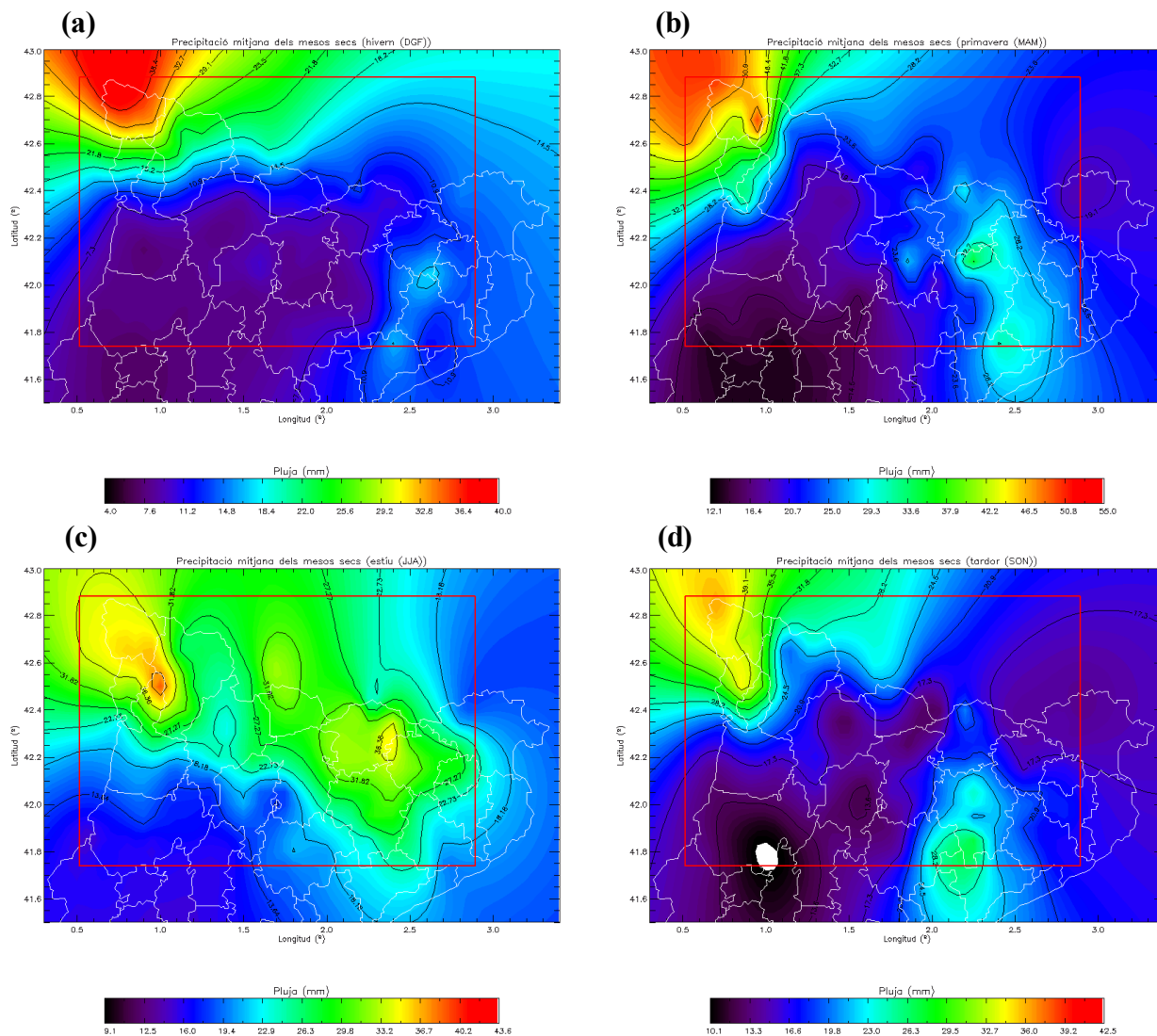


Figura 6.5: Camps de $\overline{pp}$ dels mesos secs. Hivern (a), primavera (b), estiu (c) i tardor (d)

Observant els camps mitjans de precipitació dels mesos secs per a cada estació es pot corroborar que s'han detectat correctament els episodis mensuals de dèficit pluviomètric (fig. 6.5), ja que en valor mitjà es tenen precipitacions molt febles de forma generalitzada. Únicament apareix la regió de la Vall d'Aran amb uns registres marcadament diferents, sense estar sota l'efecte del dèficit pluviomètric. La Vall d'Aran es caracteritza per tenir una climatologia pròpia diferent de la resta de Pirineu català, ja que es troba a la vessant nord i per tant es pot catalogar de clima oceànic 4.6. Donat que aquesta comarca representa un percentatge petit de punts en el còmput global del domini, i el criteri de selecció filtra els casos a partir d'un 70%, no és necessària la presència de l'anomalia a aquesta regió. Si en l'estudi s'hi haguessin inclòs més estacions de la vessant nord del Pirineu (estacions franceses), el camp de pluja podria veure's alterat i de la mateixa manera la detecció d'anomalies també seria diferent.

En totes les estacions es tenen valors petits de pluja, essent l'hivern el cas més flagrant. En totes les estacions s'observa un pic de precipitació a l'Alta Ribagorça i en alguns casos també al sud del Ripollès, d'acord amb els camps mitjans de la mostra sencera (apartat 6.1). S'observa també que d'entre els mesos secs a l'hivern apareix el pic de precipitació més important, situat sobre la Vall d'Aran. A la primavera i tardor existeixen dos centres amb certa activitat plujosa, dintre de la situació d'escassetat que s'estudia, mentre que a l'estiu els centres amb registres màxims presenten valors inferiors. En general hom podria dir que en els mesos secs la poca precipitació que es registra es concentra a les zones muntanyoses fet que denota la facilitat d'algunes regions del Pirineu per donar a lloc a processos convectius suficients com per generar precipitació tot i que les condicions sinòptiques no siguin del tot favorables. I també es pot dir que els dèficits pluviomètrics més severes es donen clarament durant els mesos d'hivern, si bé aquesta estació climatològicament ja és la menys plujosa.

6.3 Anàlisi EOF de l'anomalia mensual de precipitació (pp')

S'ha realitzat l'anàlisi EOF de l'anomalia mensual de pluja al Pirineu (pp') per tot el període complet 1940-2008, i s'han obtingut unes EOFs que corresponen als patrons de distribució de pluja més freqüents per al domini pirinenc escollit. Els patrons que s'observen en les EOFs no poden assimilar-se directament a regions plujoses o seques, ja que el camp de pluja s'obté com a combinació lineal de les diverses EOFs i les respectives PCs. Així doncs el signe de la PC, canvia també el signe del patró EOFs.

EOF	variància explicada (%)	% acumulat
1	63	63
2	13	76
3	7	83
4	3	86
5	3	89

Taula 4: Variàncies explicades en l'anàlisi EOF del camp de pluja

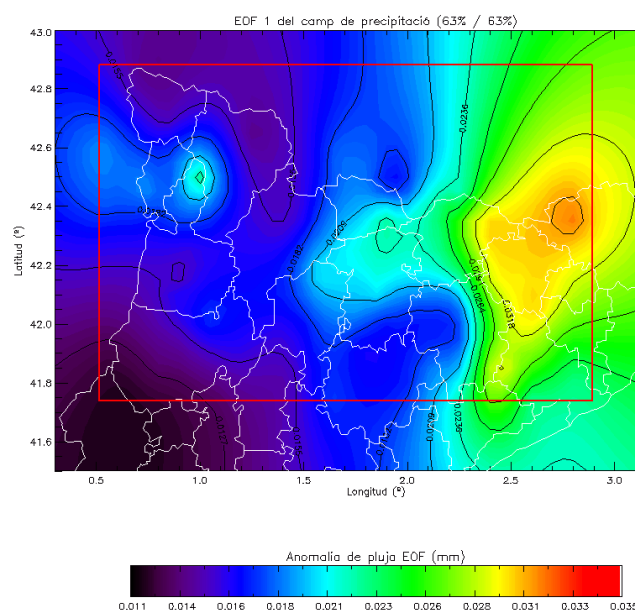


Figura 6.6: EOF 1 del camp pp'

La primera EOF explica una gran variància tal com es pot veure en la taula 4. Correspon a un camp de pluja amb un fort pol positiu ubicat a l'Alt Empordà, juntament amb dos més no tant marcats ubicats al nord del Berguedà i al nord del Pallars Jussà (fig. 6.6).

La EOF 2 correspon a un gradient de precipitació al llarg del Pirineu amb un pol positiu a la vessant nord i occidental del domini, i l'altre pol de signe contrari a la regió més oriental (fig. 6.7a).

La EOF 3 tan sols explica un 7% de la variància. També es tracta d'una situació amb un gradient, si bé en aquest cas és molt marcat sobre la serralada pirinenca degut a la presència d'un fort dipol de pluja entre les dues vessants del Pirineu (fig. 6.7b). A la vessant sud l'anomalia és negativa i s'extén des del Berguedà fins al Pallars Jussà.

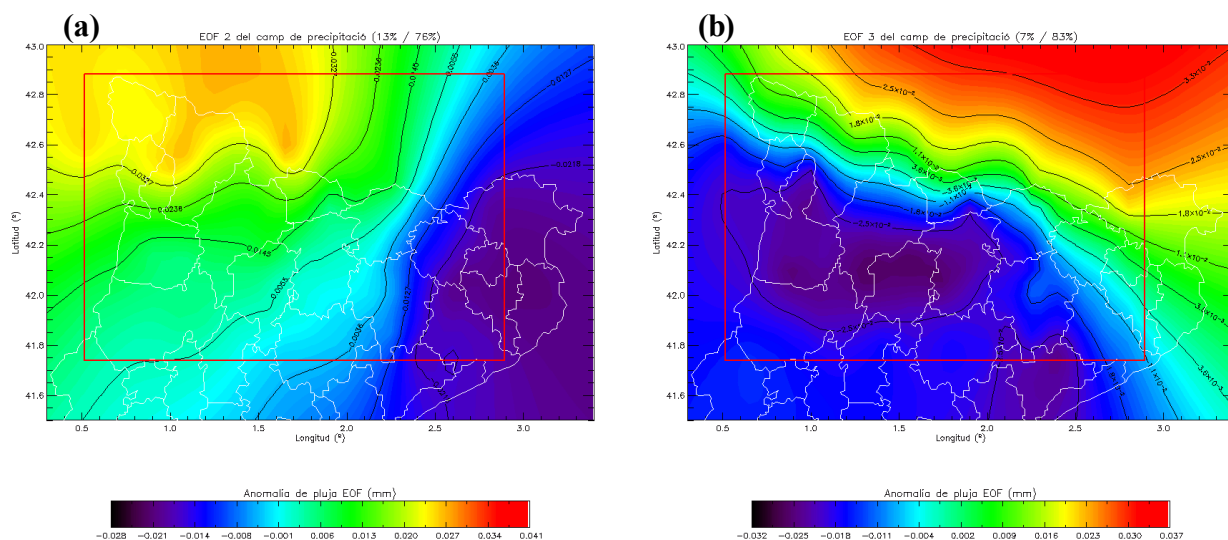


Figura 6.7: EOF 2 (a) i EOF 3 (b) del camp pp'

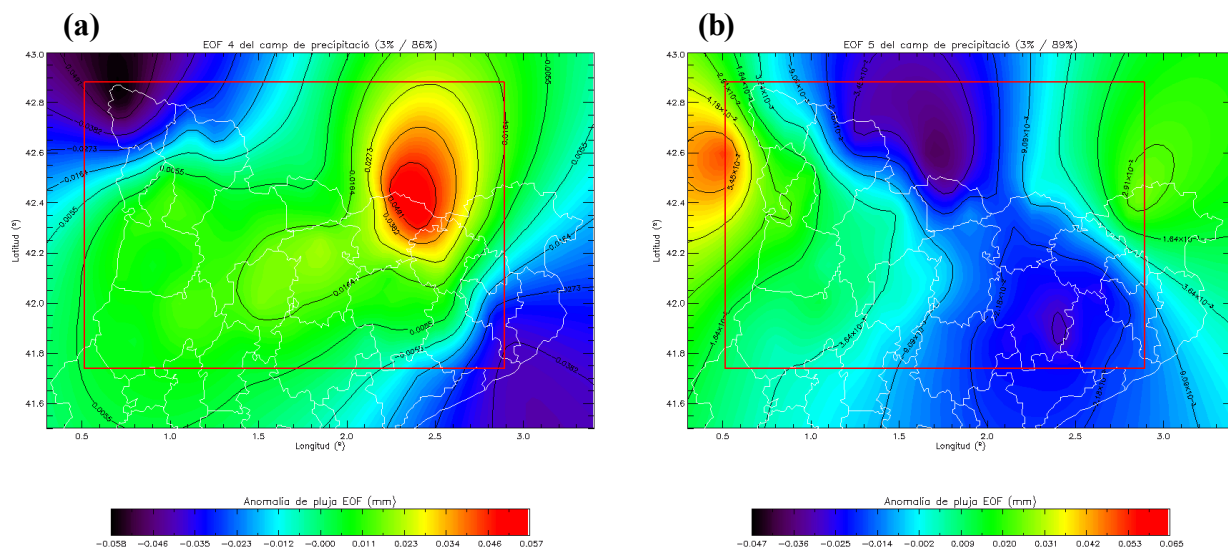


Figura 6.8: EOF 4 (a) i EOF 5 (b) del camp pp'

La EOF 4 es caracteritza per disposar d'una gran extensió de precipitació homogènia tan sols amb dos pols de signe diferent centrats al nord del Ripollès i a la Vall d'Aran (fig. 6.8a). El darrer patró que es presenta correspon a la EOF 5, que resulta ser força inhomogènia i amb la qual s'aconsegueix explicar el 89% de la variància acumulada (fig. 6.8b). En aquest cas cal destacar que la xarxa inicial d'estacions a partir de la qual s'ha confeccionat la malla regular de punts, només conté estacions

dins el territori català i dins el domini de manera que el patró que apareix en territori francès és resultat de la interpolació realitzada, per tant quan un element important de la EOF apareix en territori francès aquest careix d'importància, com és aquest cas.

Observant quina és la PC més elevada en valor absolut per a cada mes es pot tenir una idea de la importància de cada EOF, o veure si alguna EOF en concret té preferència per alguna estació de l'any. Amb anterioritat és previsible que la EOF 1 sigui la més freqüent ja que és la que explica la major part de variabilitat. En la figura 6.9 s'ha representat el recompte de casos en què es tenen les diverses PCs màximes per a cada mes de l'any. No s'observa una periodicitat clara en cap EOF, si bé el valor mínim per les dues primeres EOFs s'obté al mes de juny, mentre que la EOF 3 presenta el màxim nombre d'ocurrències per aquest mateix mes.

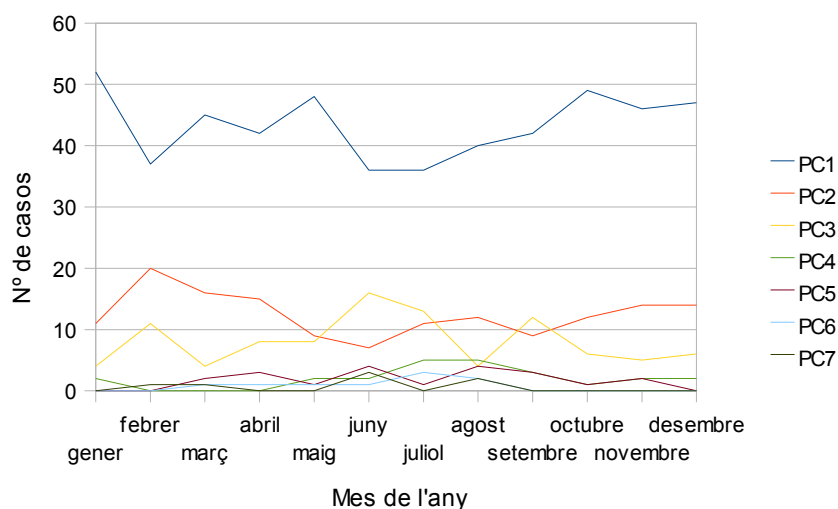


Figura 6.9: Recompte de mesos pels quals una certa PC és la més elevada

6.4 Anàlisi EOF de les anomalies mensuals totals sinòptiques

La base de dades sinòptiques del NCEP que s'ha utilitzat conté les dades diàries per a cada punt de malla a les 00 UTC. Ja que un dels propòsits del treball és relacionar l'estudi estadístic d'aquesta informació amb les dades de pluja al domini pirinenc, s'han calculat les mitjanes mensuals per tot el període d'estudi de la sèrie de dades sinòptiques. Així doncs, s'han reduït les dimensions del sistema dels 17897 dies de la sèrie inicial, als 588 mesos mitjans pel període de 49 anys estudiat (1958-2006).

Amb aquestes sèries mensuals s'aplica l'anàlisi EOF sobre els camps sinòptics x' a diferents nivells. A continuació es presenten els gràfics de les EOFs respecte la base vectorial original (punts de malla), juntament amb les taules de variància explicada, per a cada camp analitzat. Cal remarcar, com s'ha comentat anteriorment, que si el signe d'una PC és negatiu, l'estructura espacial d'aquella EOF s'inverteix, mentre que si és positiu queda inalterat.

6.4.1 Geopotencial

Pel nivell de 500 hPa s'ha analitzat la desviació de geopotencial respecte la mitjana (gp'_{500}) i

s'han obtingut les següents EOFs amb les variàncies explicades que apareixen a la taula 5:

EOF	variància explicada (%)	% acumulat
1	30	30
2	23	53
3	19	72
4	10	82
5	6	88

Taula 5: Variàncies explicades en el PCA de l'anomalia de geopotencial a 500 hPa

Es pot observar que la primera EOF no explica un valor molt elevat de la variància. S'ha obtingut un autovector que correspon a un fort pol positiu a l'Atlàntic nord, a l'oest d'Irlanda (fig. 6.10). En la fase negativa de la EOF1 ($PC1 < 0$) es tindrien baixes pressions a l'Atlàntic nord a latituds elevades, situació climàticament freqüent.

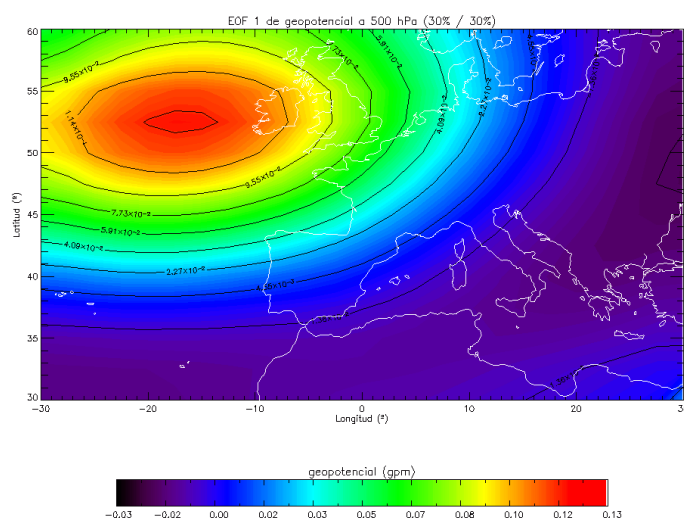


Figura 6.10: EOF1 del camp gp'_{500}

La EOF2 correspon a un pol positiu mensual sobre centre Europa (fig. 6.11a), i la EOF 3 correspon a un pol positiu centrat a les Açores i una zona amb signe invers a la península escandinava (fig. 6.11b).

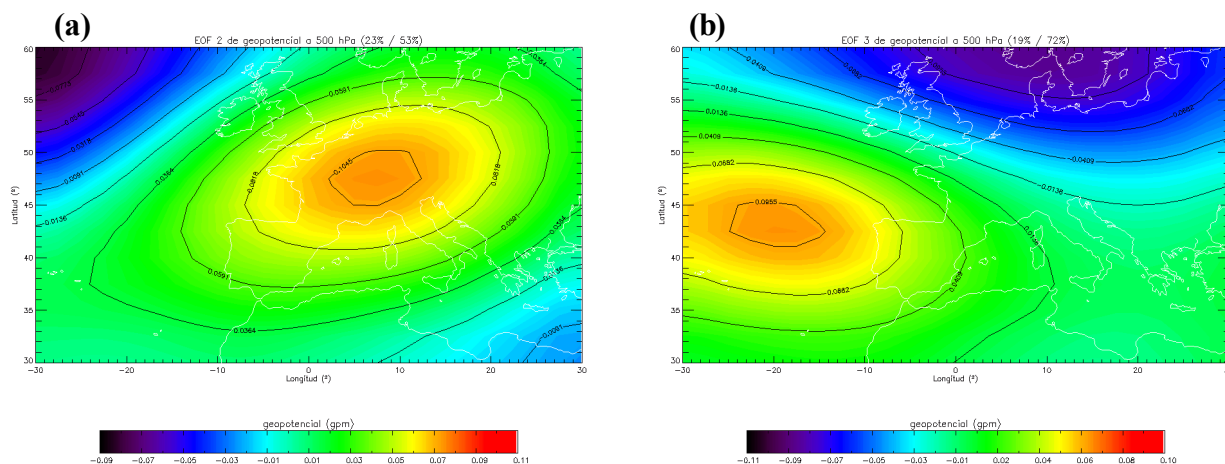


Figura 6.11: EOF2 (a) i EOF3 (b) del camp gp'_{500}

Les següents dues EOFs, la quarta i la cinquena, corresponen a diferents ubicacions dels pols. La EOF4 situa un pol positiu centrat al Mar Mediterrani occidental sobre les illes Balears (fig. 6.12a). La EOF 5 presenta una disposició de pols semblant als bloquejos en omega (fig. 6.12b). En la fase positiva aquesta EOF5 presentaria anomalies segons aquest patró, i en cas que aquestes fossin prou elevades, es podria arribar a tenir el bloqueig en omega pel geopotencial a 500 hPa.

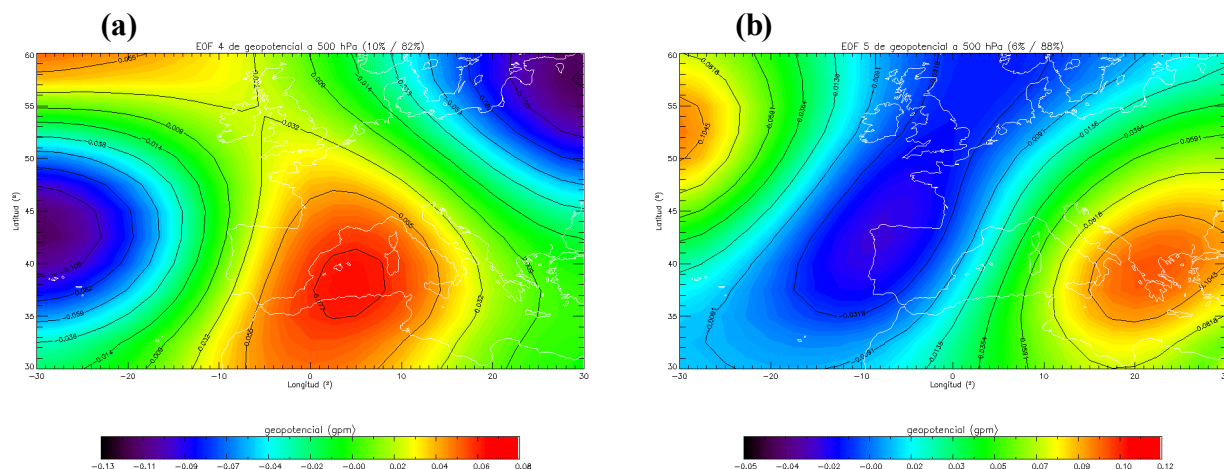


Figura 6.12: EOF4 (a) i EOF5 (b) del camp gp'_{500}

Pel geopotencial del nivell de 850 hPa s'han obtingut les EOFs amb les variàncies explicades de la taula 6. La EOF 1 presenta el mateix patró de pols que mostrava la primera EOF a 500 hPa, fet que no és d'estranyar ja que la circulació atmosfèrica és tridimensional i per tant els diferents nivells estan íntimament relacionats (fig. 6.13a). S'observa com les isolínies que descriuen aquest patró presenten algunes poques irregularitats fet que es veu augmentat en capes inferiors, segurament degut a la fricció amb la superfície.

La segona EOF presenta un pol negatiu ubicat a l'oceà atlàntic entre les Açores i la costa de Portugal (fig. 6.13b).

EOF	variància explicada (%)	% acumulat
1	36	36
2	25	61
3	20	81
4	8	89
5	4	93
6	2	95

Taula 6: Variàncies explicades en el PCA del camp gp'_{850}

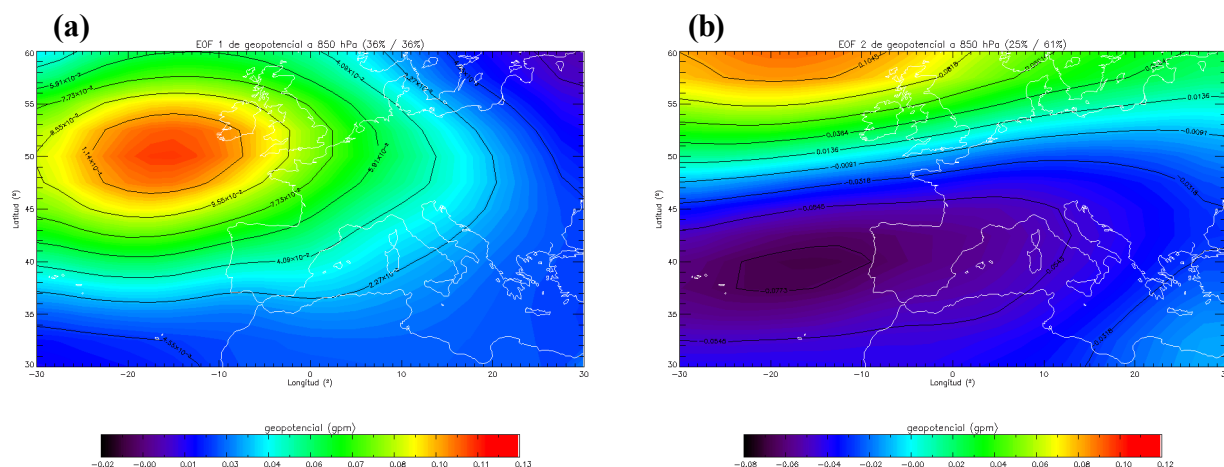


Figura 6.13: EOF1 (a) i EOF2 (b) del camp gp'_{850}

La EOF 3 a 850 hPa presenta un pol negatiu sobre el canal de la Manxa (fig. 6.14a). La fase positiva ($PC3 > 0$) també és la climàticament més freqüent, ja que situa les baixes pressions a latituds elevades. Explicant ja menys variància, tot i que encara expliquen més del 2% es troben les EOFs quarta i cinquena. La EOF 4 correspon a una basta extensió de poca variació que abarca bona part d'Europa, des del nord d'Àfrica fins a les illes britàniques, essent els valors lleugerament positius (fig. 6.14b). En la fase positiva ($PC4 > 0$) correspon a una extensió de la influència de l'anticicló de les Açores.

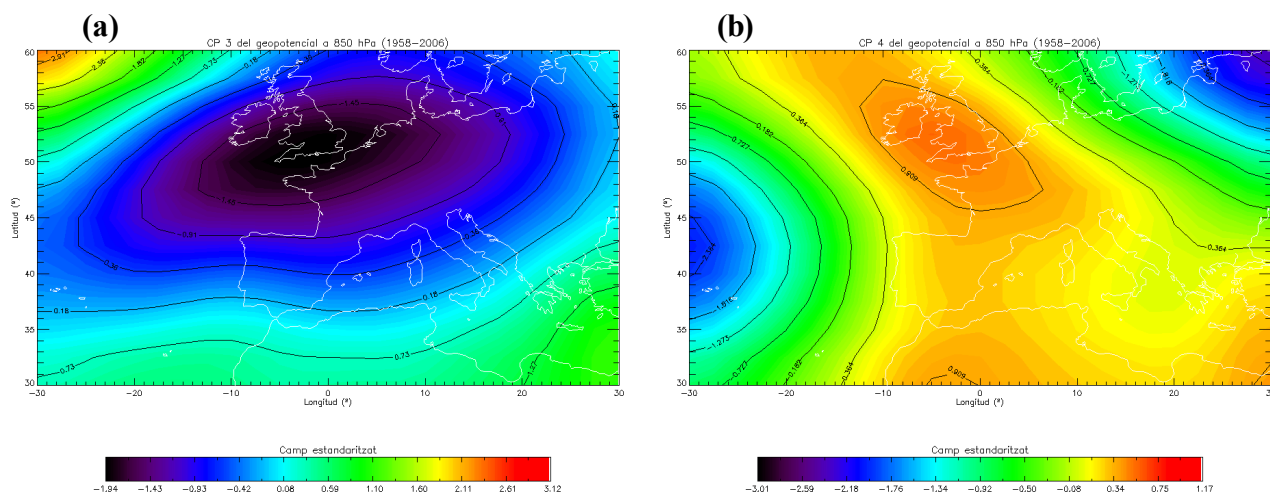


Figura 6.14: EOF3 (a) i EOF4 (b) del camp gp'_{850}

La EOF 5 presenta la disposició típica dels pols corresponents a un bloqueig. Si $PC5 > 0$ aleshores hi hauria un bloqueig provocat per les elevades pressions del nord de les illes britàniques que forçaria el pas de les depressions pel centre d'Europa (fig. 6.15a). Explicant només entorn d'un 2% hi ha la EOF 6 que situa un pol negatiu centrat a les illes Balears (fig. 6.15b).

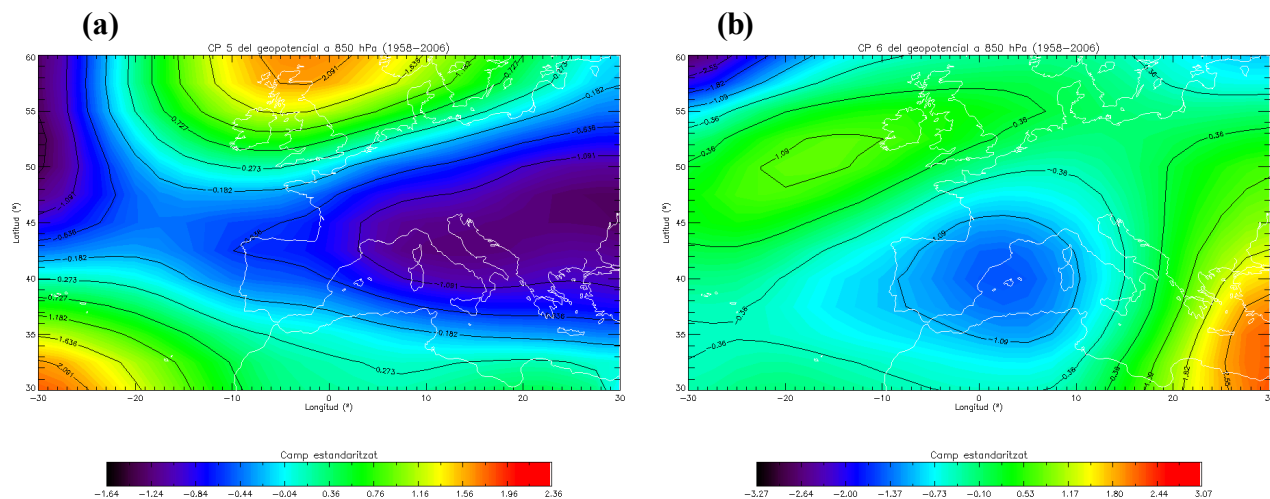


Figura 6.15: EOF5 (a) i EOF6 (b) del camp gp'_{850}

Per l'estudi de la mostra completa al nivell de 1000 hPa cal adreçar-se a l'apartat 6.5.1.

6.4.2 Humitat relativa

El camp d'humitat relativa es té per als tres nivells anteriors, i s'han aconseguit explicar les variàncies de la taula 7, de manera que al ser molt petites es pot deduir que aquest camp és inhomogeni tot i tractar-lo mensualment. L'estudi als nivells baixos és important ja que permet predir la nuvolositat, i per això es presenten els resultats de 850 hPa.

EOF	Humitat relativa a 500 hPa		Humitat relativa a 850 hPa		Humitat relativa a 1000 hPa	
	variància explicada (%)	% acumulat	variància explicada (%)	% acumulat	variància explicada (%)	% acumulat
1	18	18	22	22	21	21
2	10	28	13	35	15	36
3	10	38	10	45	10	46
4	6	44	7	51	6	52
5	5	49	6	57	4	57
6	4	56	1,6	62	4	61
7	3	56	4	66	3	64

Taula 7: Variàncies explicades en el PCA del camp d'anomalies d'humitat a diversos nivells

El PCA de hr' dona informació de les distribucions d'humitat més típiques en el marc sinòptic. En la EOF1 s'observa una zona extensa caracteritzada per una disminució d'humitat, que s'estén per la Península Ibèrica i el golf de Cadis, i una ramificació més feble que penetra fins la Península Itàlica (fig. 6.16a). Depenent del signe de la PC aquesta distribució correspon a una regió molt humida o molt seca. En tot cas cal fer notar que la variabilitat explicada és molt baixa, del 22%. La EOF2 explica tan sols el 13% de la variabilitat, i situa un dipol de valors d'humitat segons la figura 6.16b.

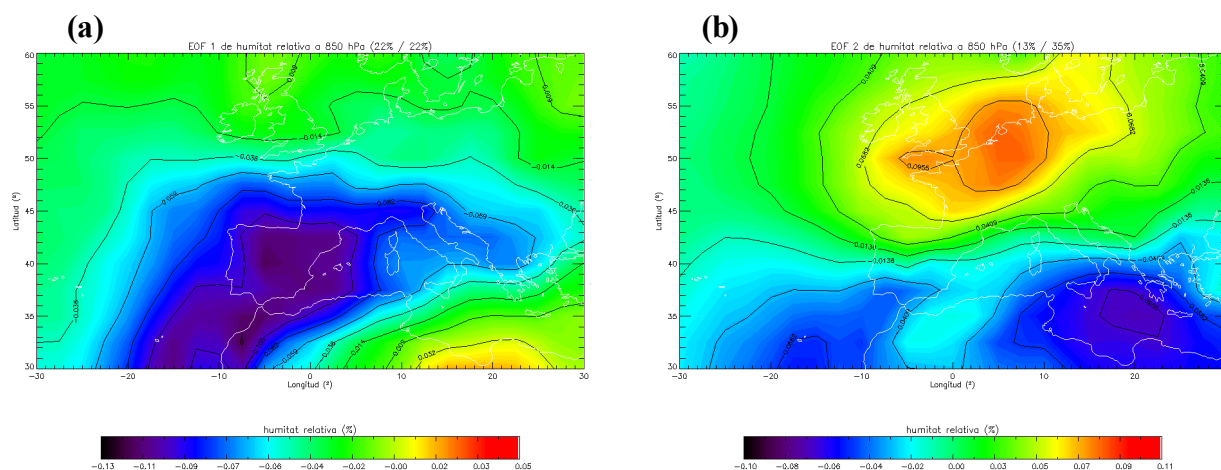


Figura 6.16: EOF1 (a) i EOF2 (b) del camp hr'_{850}

S'adjunten també les EOFs 3 i 4, on cal destacar únicament la presència de dos pols de signe canviat en la EOF3, el positiu sobre el nord d'Àfrica i el negatiu sobre la costa de Portugal (fig. 6.17a).

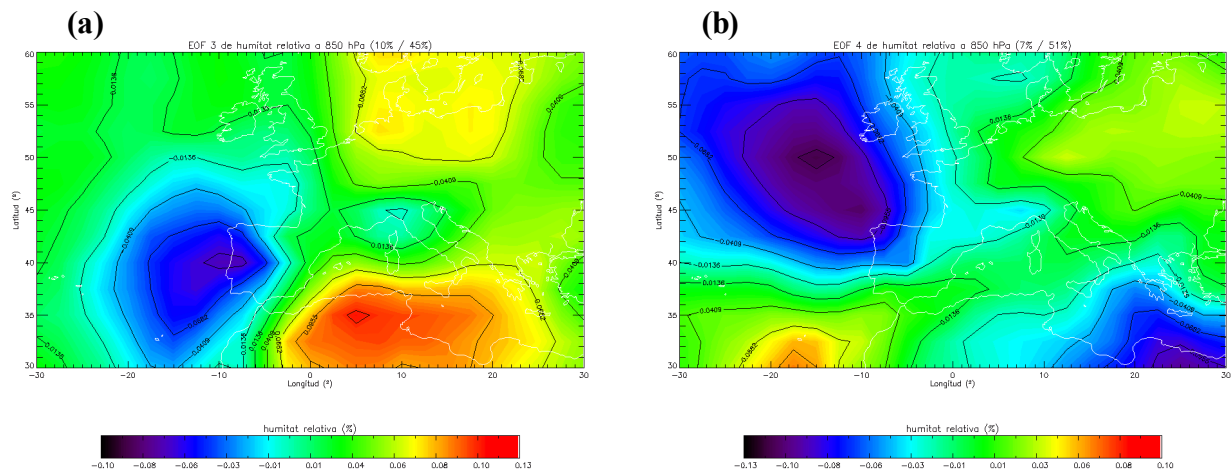


Figura 6.17: EOF3 (a) i EOF4 (b) del camp hr'_{850}

6.4.3 Temperatura

Pels camps de temperatura s'ha realitzat l'anàlisi EOF i s'han explicat les següents variàncies:

EOF	Temperatura a 850 hPa		Temperatura a 1000 hPa	
	variància explicada (%)	% acumulat	variància explicada (%)	% acumulat
1	25	25	36	36
2	21	46	18	54
3	16	63	14	67
4	9	72	6	73
5	8	80	5	78
6	4	84	5	82
7	3	87	2	85

Taula 8: Variàncies explicades en l'anàlisi EOF del camp T' a diversos nivells

Observant l'anàlisi EOF dels dos nivells es constata que la variabilitat de la temperatura als dos nivells és lleugerament diferent, fet indicatiu que no en tots els casos es pot identificar la EOF d'un nivell amb la de l'altre. La EOF1 a 850 hPa presenta un pol negatiu de temperatura abarçant gran part d'Europa, pràcticament la totalitat de França i Alemanya (fig. 6.18a). En canvi al nivell de 1000 hPa, aquest pol presenta el signe contrari i apareix desplaçat cap a regions més orientals (fig. 6.18b). De manera que per a ser coherents entre elles aquestes dues EOFs han de trobar-se en oposició de fase, és a dir que tinguin signes de PC diferents respectivament.

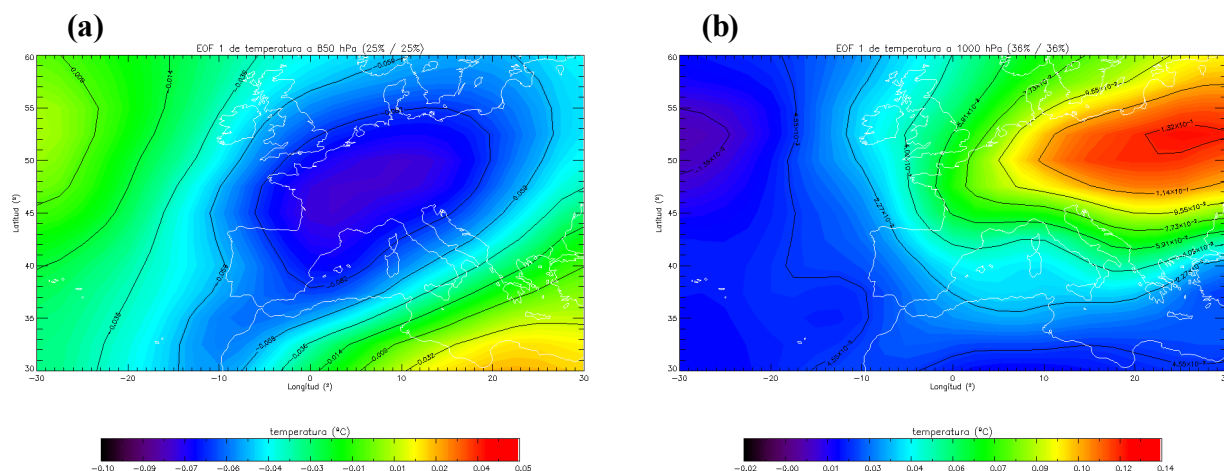


Figura 6.18: EOF1 dels camps T'_{850} (a) i T'_{1000} (b)

En la segona EOF s'observa la no correlació entre els dos nivells que s'analitzen. D'una banda a 850 hPa es té un dipol amb el signe positiu centrat sobre la costa de Galícia i abarçant bona part de l'Atlàntic nord, i el negatiu a cavall entre la Península Balcànica i el Mar Jònic (fig. 6.19a). Així doncs aquesta diferència entre dos nuclis de temperatura, un de fred i l'altre de calent, explica el 21% de la variabilitat a 850 hPa. A 1000 hPa en canvi la EOF2, explica un 18% de la variabilitat, i respon a la situació en què es tenen els valors negatius al nord d'Àfrica, i els positius apareixen centrats a l'extrem nord-est d'Europa (fig. 6.19b). De nou si les dues EOFs es troben en oposició de fase és possible que existeixi una certa coherència. Sobretot quan la $PC < 0$ a 850 hPa, es tindria una zona de temperatures baixes a nivell climàtic, i a 1000 hPa aquestes baixes temperatures es troben avançades cap a l'est, tal com succeeix en la circulació general.

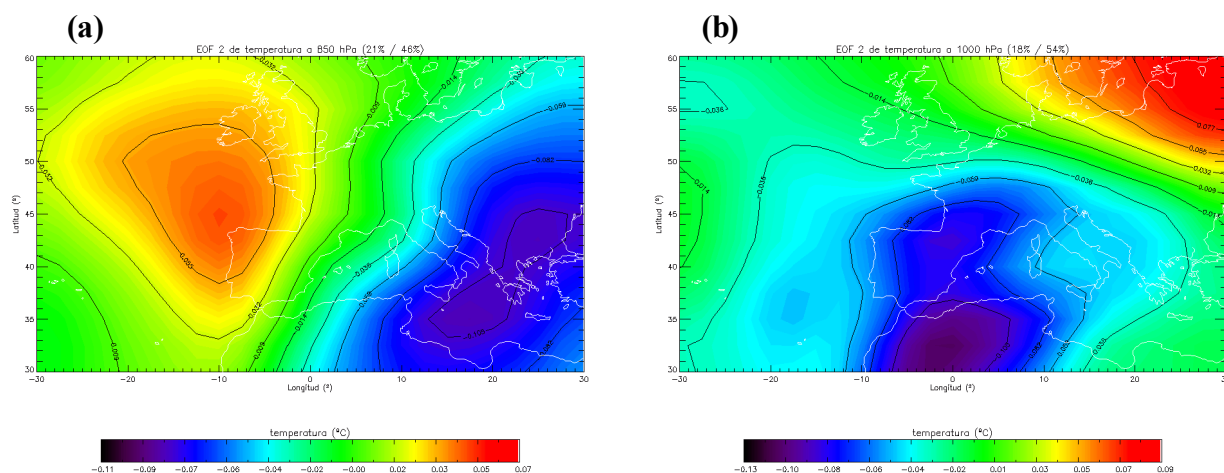


Figura 6.19: EOF2 dels camps T'_{850} (a) i T'_{1000} (b)

Observant la EOF3 a 850 hPa, que explica un 16% de la variància, es pot veure com sembla tractar-se de l'autovector anàleg a la EOF2 de 1000 hPa però amb el signe contrari, ja que es té el pol positiu sobre la costa occidental del nord d'Àfrica, i el negatiu sobre Rússia (fig. 6.20a). Igualment passa amb la EOF3 a 1000 hPa, explicant un 14% de la variabilitat, en la qual apareix un pol positiu sobre la Península Balcànica, mentre que a la regió més oriental d'Europa hi ha un clar predomini de l'altre signe (fig. 6.20b).

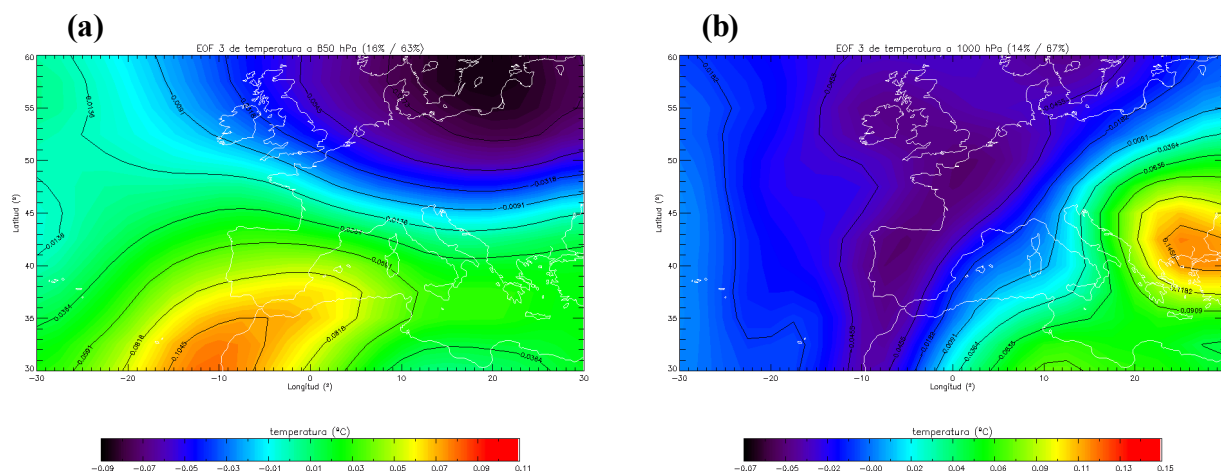


Figura 6.20: EOF3 dels camps T'_{850} (a) i T'_{1000} (b)

La EOF4 es pot trobar als annexos (fig. 11.5).

6.5 Anàlisi EOF de l'anomalia de geopotencial a 1000 hPa (gp'_{1000})

6.5.1 Mostra mensual total

Donat que posteriorment s'utilitza el geopotencial a 1000 hPa aquest nivell s'analitza amb més detall. En primer lloc s'utilitza la sèrie completa d'anomalia de geopotencial a 1000 hPa (d'ara en endavant gp'_{1000}), i s'obté que és possible explicar el 90% de la variància tan sols amb les quatre primeres EOFs (taula 9). Les dues primeres corresponen a variacions del camp mitjà que faciliten la circulació zonal, i les dues següents donen lloc a circulacions meridionals, de manera que en un 90% la variabilitat d'aquest camp respon a situacions sinòptiques que provoquen fluxos zonals en primer terme, i meridionals en segon lloc.

EOF	variància explicada (%)	% acumulat
1	38	38
2	26	64
3	19	83
4	8	90
5	3	93
6	2	95
7	1	96

Taula 9: Variàncies explicades en el PCA del camp gp'_{1000}

El 38% de la variància ve explicada per la EOF 1 (fig. 6.21) que és pràcticament igual a la primera EOF pels nivells de 500 hPa i 850 hPa amb l'apreciació de la deformitat de les isolínies que s'ha comentat abans. Si es compara la variància que explica aquesta EOF1 en els tres nivells es veu que els 1000 hPa és on s'explica més variabilitat, és a dir es tracta del nivell en el qual més freqüentment

apareix una variació del geopotencial d'aquest estil.

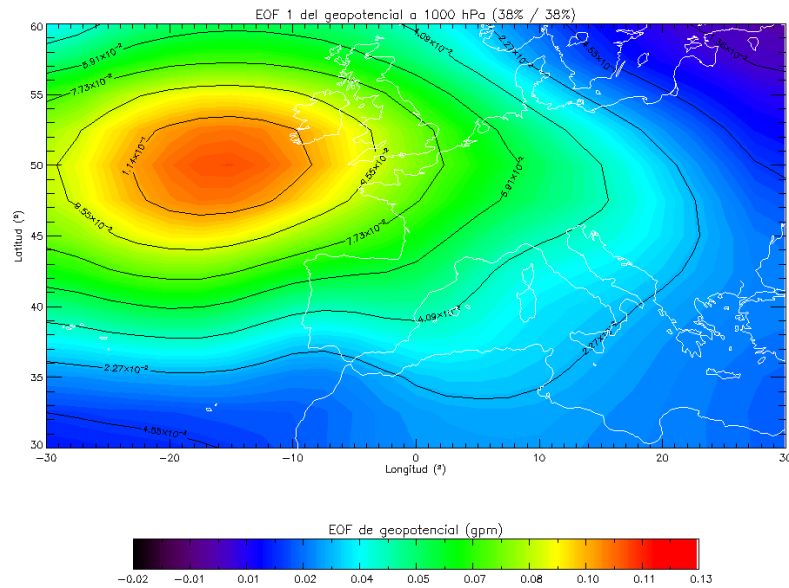


Figura 6.21: EOF1 del camp gp'_{1000}

La EOF1 correspon a un pol positiu situat a l'Atlàntic nord que influeix en la circulació de bona part d'Europa (fig 6.21). Per a corroborar la correspondència de fase amb el geopotencial real es calcula la mitjana d'anomalia de geopotencial dels mesos que presenten una PC 1 positiva més elevada (fig. 11.7a). Per aquests casos s'obté una anomalia positiva ubicada a l'Atlàntic nord, de manera que efectivament la fase positiva ($PCI > 0$) de l'autovector que s'ha obtingut correspon directament a les anomalies del mateix signe de geopotencial. Això corrobora l'aportació de Kostopoulou i Jones (2007) que afirma que cada element de la sèrie original pot assignar-se a una única EOF sempre que aquesta contingui una PC prou elevada. Igualment s'ha realitzat el càlcul del $\overline{gp'}$ dels mesos amb PC elevada per a les següents EOFs i es presenten també en l'annex 11.4.

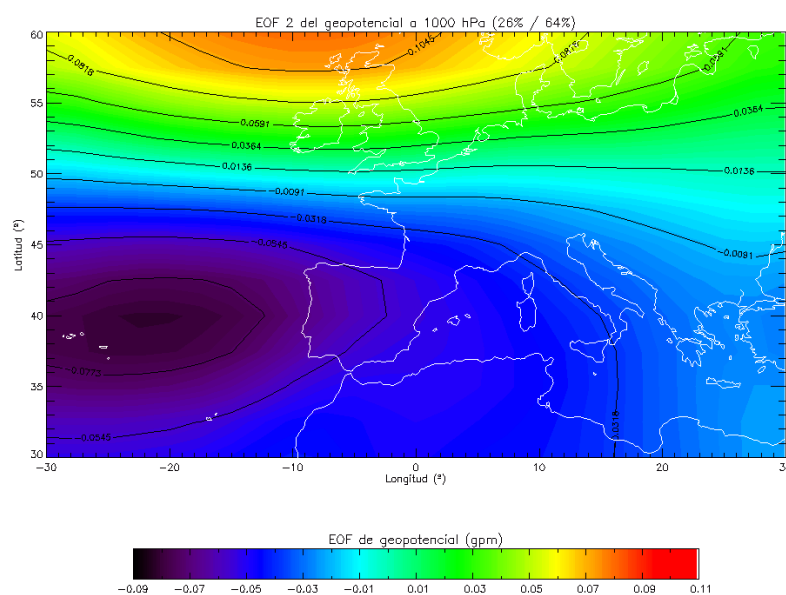


Figura 6.22: EOF2 del camp gp'_{1000}

La EOF2 que explica un percentatge important de la variabilitat (26%) correspon a un dipol entre les Açores i l'oceà Atlàntic, al nord de les illes britàniques (fig. 6.22). Aquest dipol provocaria un reforçament o afebliment de l'anticicló de les Açores depenent de la fase de la EOF, fet que a la vegada provocaria canvis en la circulació zonal. La fase negativa ($PC2 < 0$) porta associada una gran estabilitat i absència de precipitació, ja que l'anticicló de les Açores es veu reforçat i obligaria a les pertorbacions a circular per regions més septentrionals als Pirineus. La fase positiva ($PC2 > 0$) representa un anticicló de les Açores afeblit pel pol negatiu però en cap cas representa una depressió a les Açores.

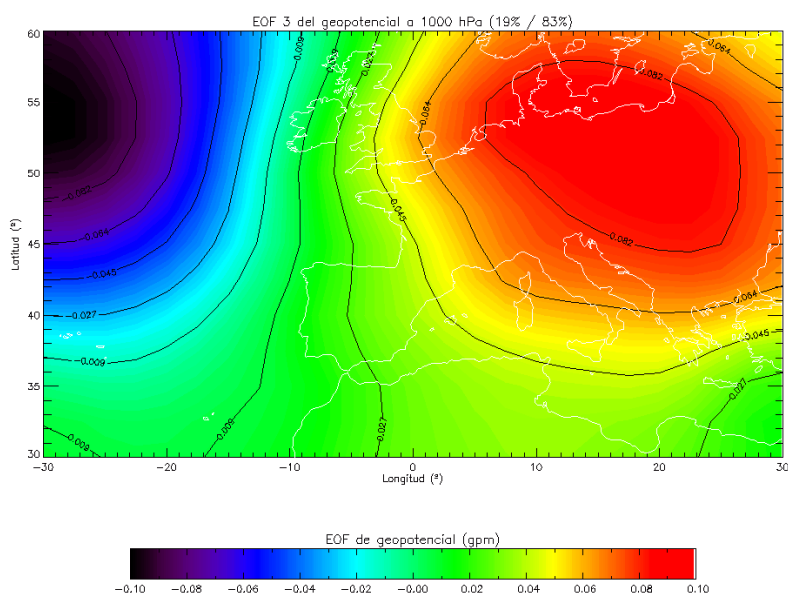
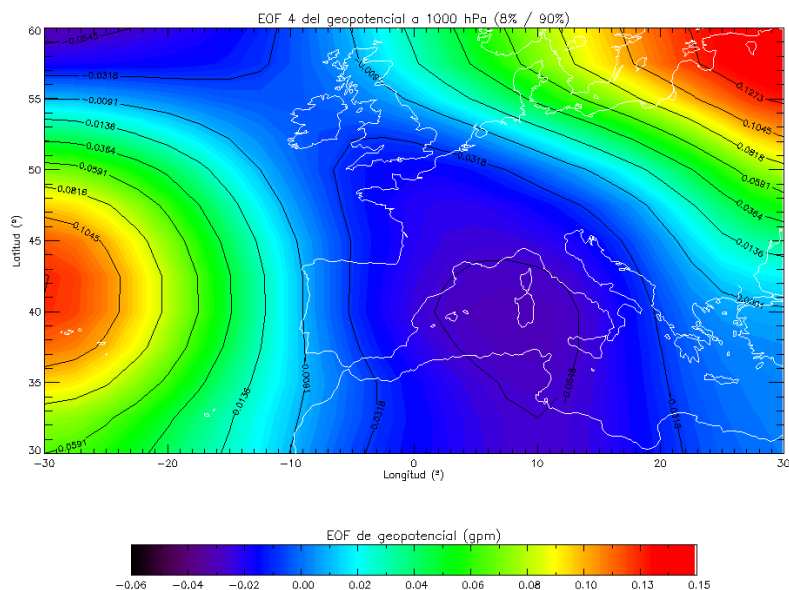


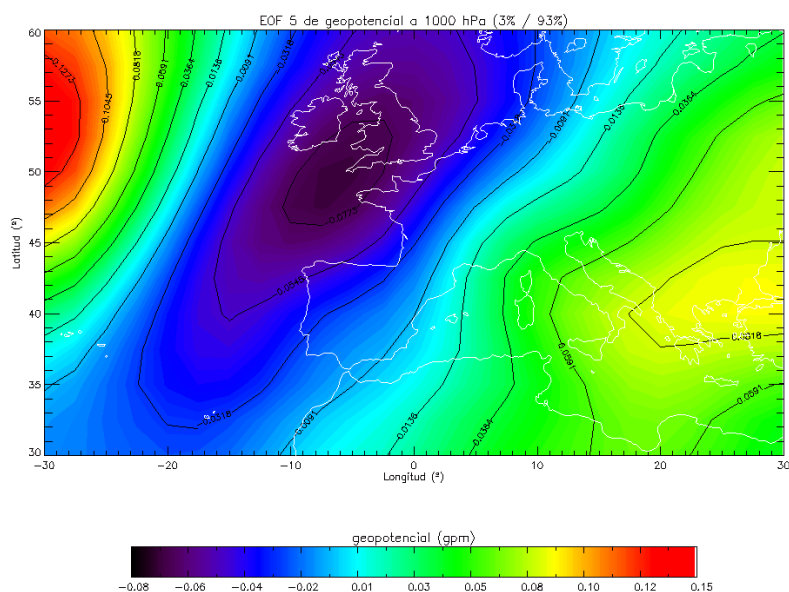
Figura 6.23: EOF3 del camp gp'_{1000}

La EOF3 presenta dos pols ben diferenciats, el positiu ubicat sobre centre Europa, i el negatiu ubicat a l'Atlàntic nord, explicant una variància del 19% (fig. 6.23). Aquesta disposició del dipol que alterna entre l'oceà i el continent fa pensar en un possible efecte associat als processos radiatius de la superfície. La fase positiva ($PC3 > 0$) correspon a un augment del geopotencial al continent europeu tal com queda corroborat en l'annex (fig. 11.8a), que podria ser degut al refredament radiatiu excessiu. Contràriament, la fase negativa ($PC3 < 0$) correspon a un decrement del geopotencial mitjà al continent que podria ser degut a un escalfament excessiu del sol. De cara al Pirineu el que és important és el fet que quan es tenen valors elevats de $PC3$ es pot generar una circulació meridional mensual sobre els Pirineus ja sigui de component nord o sud, segons la fase de la EOF3.

La EOF4 explica tan sols un 8% de la variància, i correspon a un pol negatiu centrat al Mediterrani Occidental, amb dos pols positius que reforcen la situació, situats a les Açores i al nord-est d'Europa (fig. 6.24). La fase positiva d'aquesta EOF ($PC4 > 0$) correspon a una disminució del geopotencial del Mediterrani Occidental tal com es corrobora en l'annex (fig. 11.8b). En canvi la fase negativa de la EOF4 ($PC4 < 0$) donaria lloc a una situació gens favorable a la precipitació sinó a l'estabilitat ja que l'augment de pressions en aquesta regió tindria una clara influència sobre la meteorologia del Pirineu. A més en aquesta fase negativa l'augment de geopotencial estén una dorsal amb el centre anticiclònic al mediterrani occidental, fet que impediria la circulació de les depressions sobre el Pirineu.

Figura 6.24: EOF4 del camp gp'_{1000}

La EOF5 explica tan sols un 3% de la variància i disposa d'un pol negatiu sobre la costa sud-occidental de les illes britàniques (fig. 6.25). Apareixen dos altres pols, aquests positius, un sobre la península balcànica i l'altre sobre l'Atlàntic nord. Una fase positiva intensa ($PC5 \gg 0$) donaria lloc a un augment de geopotencial i podria provocar una advecció mensual de component sud sobre els Pirineus amb certa inestabilitat essent probable la precipitació al Pirineu. En canvi la fase negativa, si fos prou intensa, donaria una advecció de component nord que només deixaria precipitacions a la vessant nord del Pirineu.

Figura 6.25: EOF5 del camp gp'_{1000}

La EOF6 (fig 6.26a) i la EOF7 (fig 6.26b) expliquen ja molt poca variabilitat de la mostra, un 2% i un 1% respectivament, de manera que són poc importants. En la discussió que es realitza més endavant es pot veure com aquestes dues EOFs tenen poca repercussió en el camp de geopotencial

dels mesos detectats com a anòmals secs.

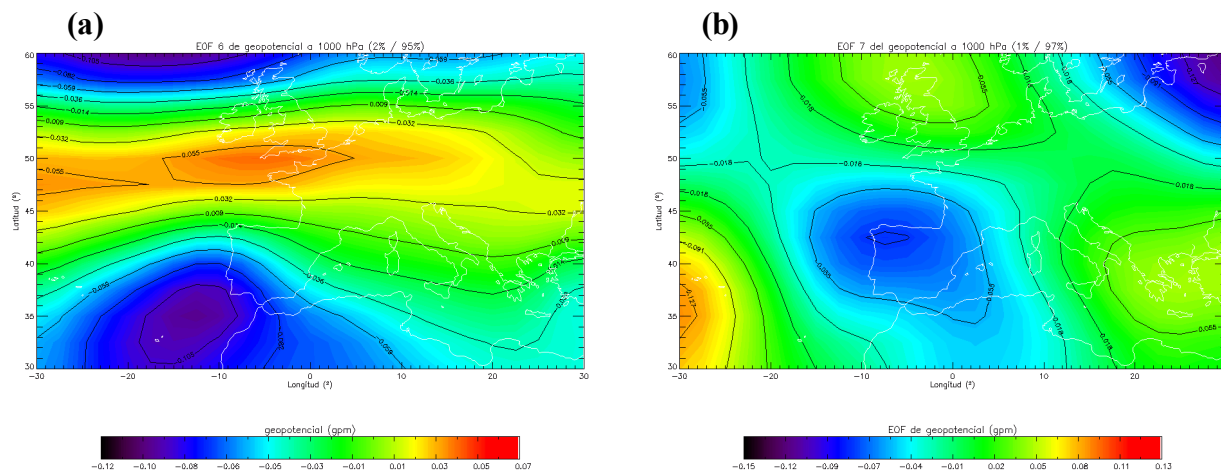


Figura 6.26: EOF6 (a) i EOF7 (b) del camp gp'_{1000}

Donada la naturalesa de l'anàlisi EOF, les PCs es generen de manera que la seva mitjana val 0. Això implica que cada autovector té la mateixa repercussió per mitjà d'una fase o l'altra, sobre la mostra total gp'_{1000} . Com que per a cada EOF es té una PC, que és el coeficient amb el qual aquella EOF intervé en el camp de geopotencial d'un mes en concret, es pot representar gràficament l'evolució de les PCs (fig. 6.27). D'aquesta manera es podrien detectar períodes amb un clar predomini d'alguna fase en concret. Tot i així com s'ha discutit en la secció 5.3 s'analitzaran les PCs partint d'una selecció prèvia de mesos anormalment secs o plujosos, feta a partir dels registres de precipitació de les estacions del Pirineu.

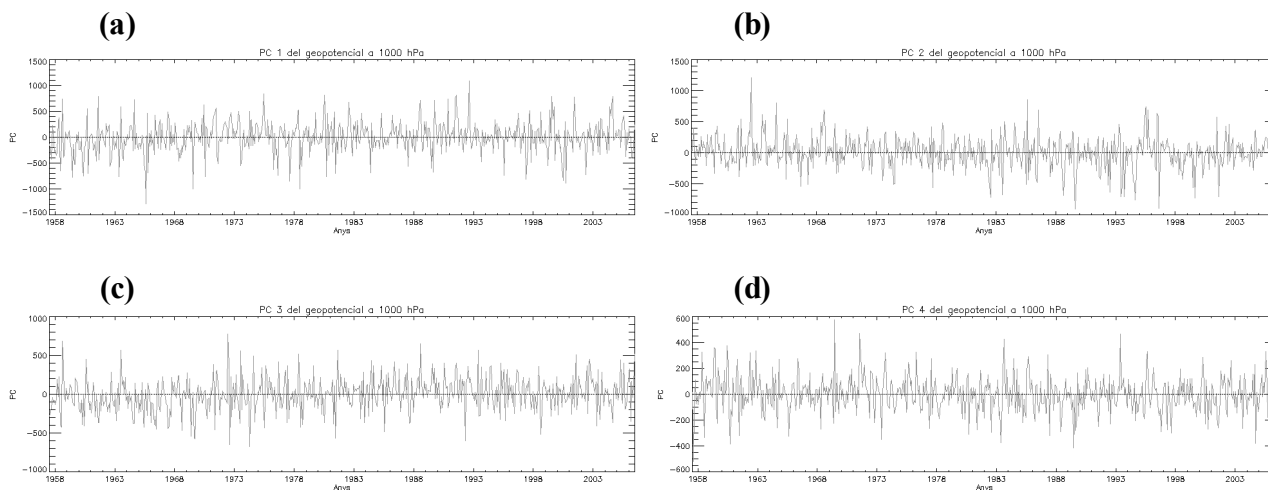


Figura 6.27: PC1 (a) PC2 (b), PC3 (c) i PC4 (d) del camp gp'_{1000}

6.5.2 Mostra mensual agregada estacionalment

L'EOF Analysis estacional dóna quatre bases vectorials diferents per les estacions de l'any.

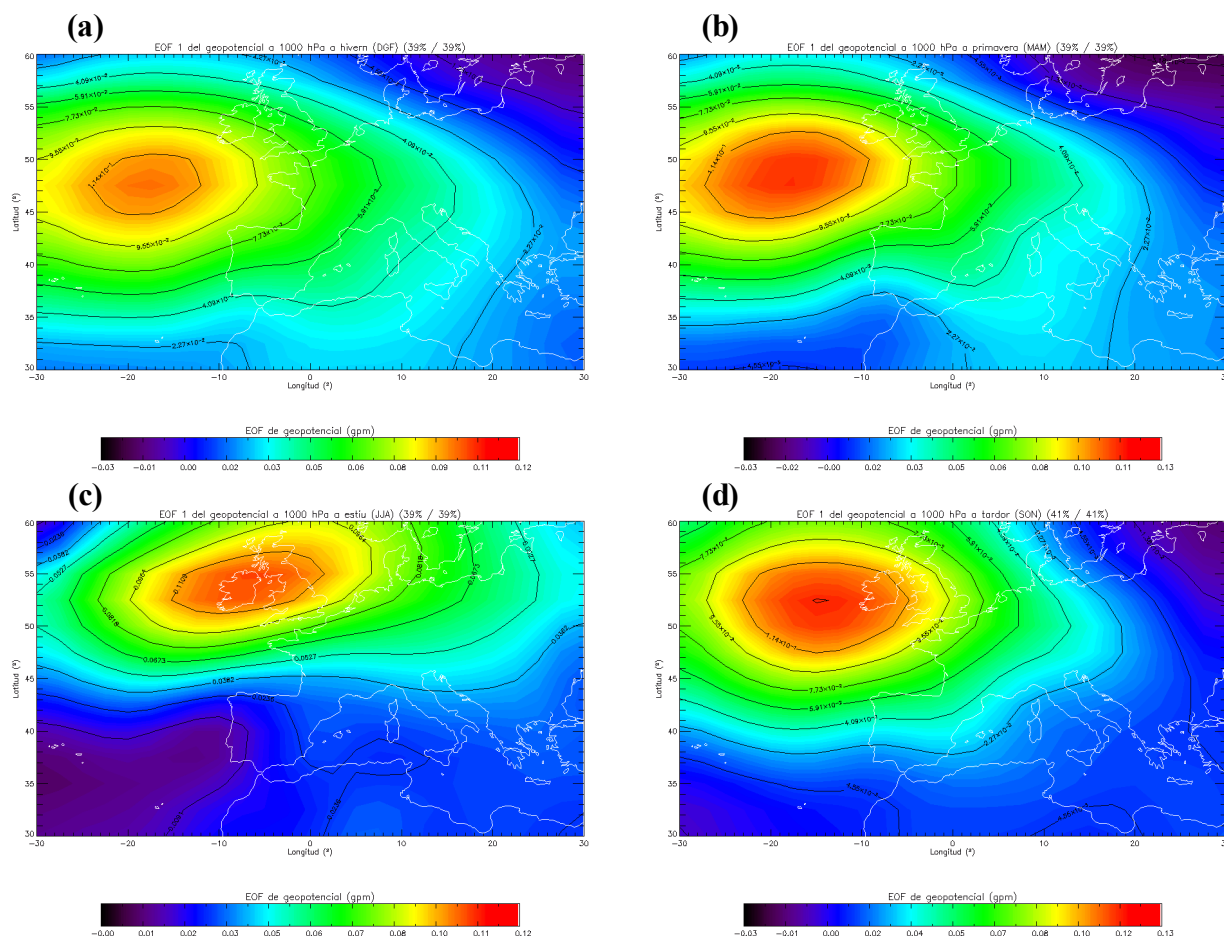


Figura 6.28: EOF1 estacionals del camp gp'_{1000} . Hivern (a), primavera (b), estiu (c) i tardor (d)

Cal remarcar que al realitzar el PCA es treballa amb anomalies mensuals de geopotencial (gp') de manera que no es tenen en compte les diferències entre estacions degudes a la pròpia climatologia de cada època de l'any. Així doncs les diferències que es percebin entre les EOFs estacionals són degudes a les variacions en les anomalies típiques de cada estació. L'objectiu al final de l'estudi serà descobrir si alguna d'aquestes variacions pot explicar i donar lloc al dèficit de precipitació al Pirineu.

En la EOF1 les diferències entre estacions són molt petites, la qual cosa vol dir que aquest autovector respon a un patró de variabilitat que és en bona mesura independent de l'època de l'any. El que sí que s'observa, són variacions en les dimensions del pol positiu i la seva ubicació (fig. 6.28). La oscil·lació espacial d'aquest pol és molt minsa, amb un rang d'uns 10° de longitud i 5° de latitud. En les estacions d'hivern i estiu és quan el pol és menys intens i es troba en els extrems de la seva trajectòria mentre que en la primavera i la tardor el pol es veu més reforçat i es troba en punts intermitjos de la oscil·lació (fig. 6.29). A més en tots els casos explica la mateixa variància del 39%, excepte en la EOF de tardor que explica un 41%. És durant la tardor quan es donen les variacions més importants del camp mitjà degut al pas de les baixes associades al front polar, que típicament solen ser com la fase negativa d'aquesta primera EOF.

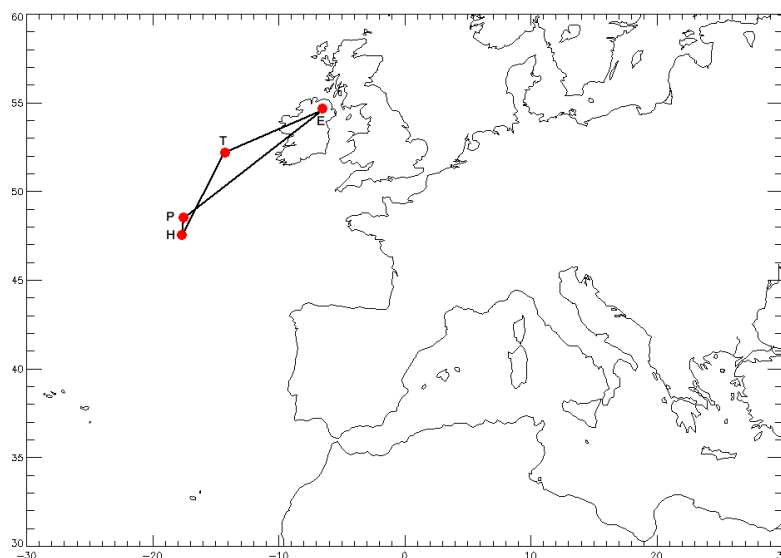


Figura 6.29: Trajectòria del pol de l'EOF1 al llarg de les estacions de l'any

Les EOFs 2 i 3 no presenten el mateix patró en totes les estacions (fig. 6.30 i 6.31). Observant amb deteniment els 8 autovectors es pot establir que la EOF2 d'hivern i la EOF 2 de primavera responen al mateix patró que la EOF3 d'estiu i la EOF3 de tardor en oposició de fase. A la vegada la EOF2 d'estiu i tardor correspon a les EOFs 3 d'hivern i primavera canviades de signe.

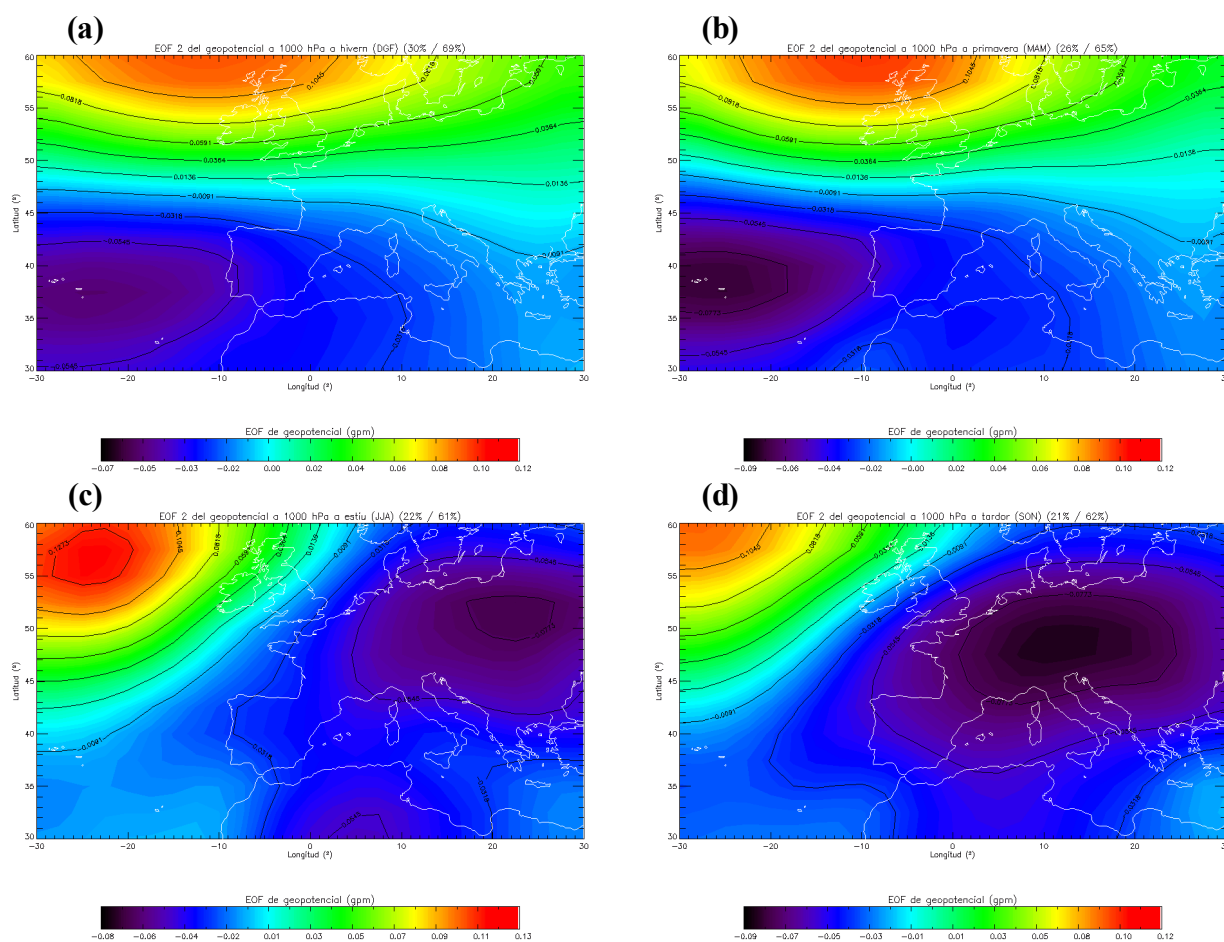


Figura 6.30: EOF2 estacionals del camp gp'_{1000} . Hivern (a), primavera (b), estiu (c) i tardor (d)

Així doncs les EOFs 2 i 3 estacionals poden agrupar-se en dos únics patrons. Un d'ells correspon a la presència d'un pol sobre les Açores (fig. 6.30a, 6.30b) que es troba lleugerament desplaçat cap al nord-est pels casos d'estiu i tardor (fig. 6.31c, 6.31d). L'altre patró s'explica per mitjà d'un pol d'extensió molt gran situat sobre l'Europa central. De la mateixa manera que en l'altre patró dependent de l'estació aquest pol es troba ubicat en regions lleugerament diferents (fig. 6.30c, 6.30d, 6.31a, 6.31b).

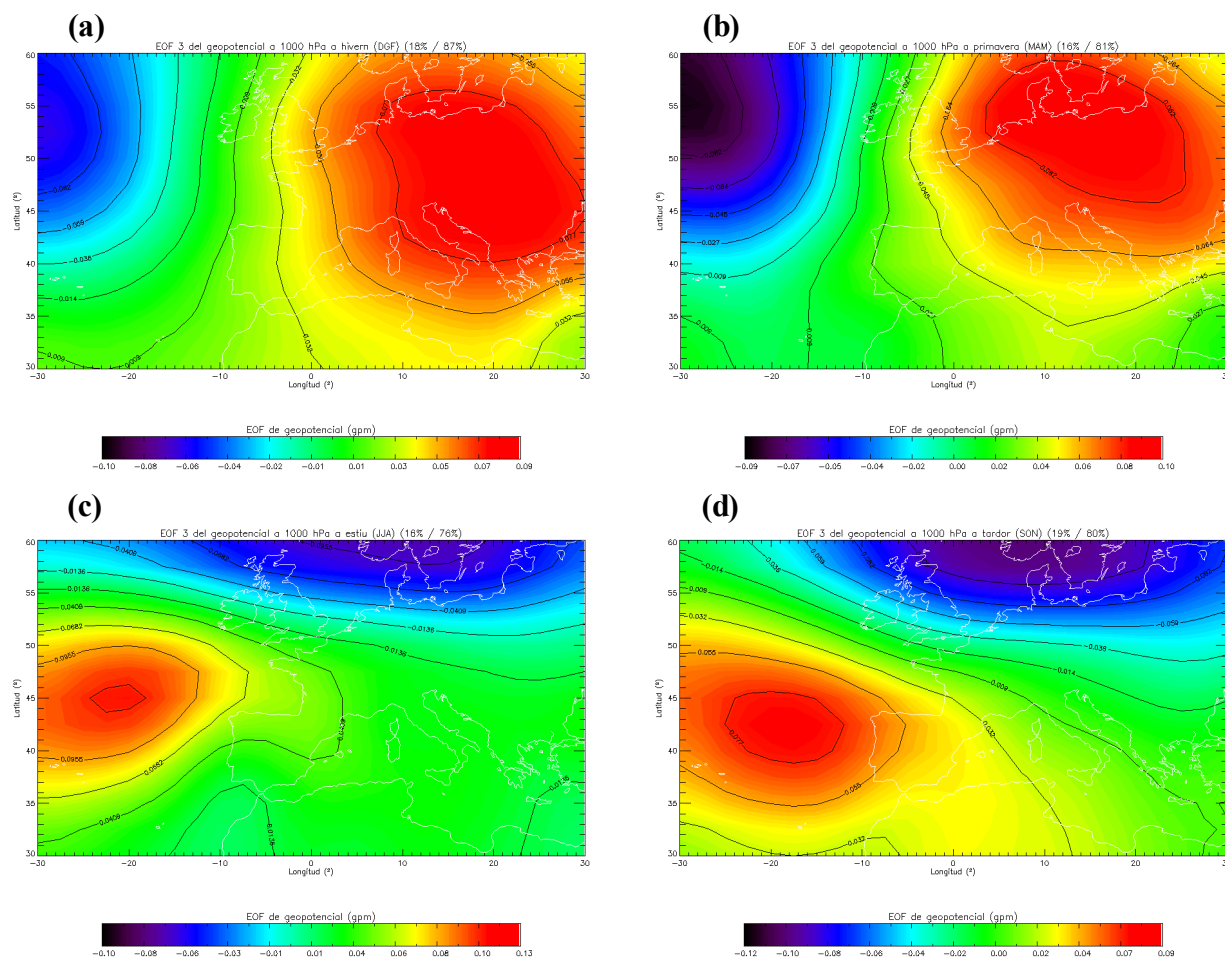


Figura 6.31: EOF3 estacionals del camp gp'_{1000} . Hivern (a), primavera (b), estiu (c) i tardor (d)

Aquesta alteració en l'ordre dels patrons en funció de l'estació de l'any és degut al fet que la variabilitat del camp gp'_{1000} varia al llarg de l'any, i els mateixos patrons no són igualment útils durant tot l'any. Per les estacions d'estiu i tardor el geopotencial varia més degut a les fluctuacions que tenen lloc sobre el continent, que en la fase positiva (fig. 6.30c i 6.30d) tenen el seu origen en l'escalfament excessiu de la superfície terrestre, procés pel qual té lloc la baixa tèrmica (Arhens, 2000). En canvi a l'hivern i primavera la desviació del geopotencial respecte la mitjana en primer terme és deguda a la variació que ocorre sobre l'oceà, que en la fase positiva té a veure amb l'excés d'inèrcia tèrmica de l'oceà. Així doncs, trobem que la EOF 2 en fase positiva en totes les estacions té a veure amb les anomalies que provoca l'excés de calor en algunes zones concretes.

La EOF3 apareix en tots els casos canviada de signe respecte la EOF2, de manera que en la fase positiva ($PC3 > 0$) els quatre patrons tenen a veure amb augments de geopotencial associats a un possible refredament radiatiu de la superfície que provoca una subsidència de l'aire. D'aquesta manera es pot dir que, per les EOFs 2 i 3, la fase positiva correspon al patró que amplifica la

diferència de pressió generada per les altes i baixes tèrmiques. Mentre que la fase negativa juga un paper de compensació de les diferències de pressió entre les diverses zones. Dit d'una altra manera, aquelles situacions en què existeixen els centres de pressió tèrmics estacionals (grans anticiclons i depressions) anormalment reforçats o afeblits respecte la climatologia expliquen entre un 40% i un 45% de la variabilitat.

La EOF4 explica entre un 9% en el més favorable dels casos (estiu i tardor), i un 8% en primavera i un 6% a hivern. En aquest cas sí que existeix una bona correlació entre totes elles i amb l'EOF4 anual. Es corresponen a un pol negatiu ubicat en diverses localitzacions del Mediterrani segons l'estació de l'any (fig. 6.32). En aquest cas totes les fases positives coincideixen donant lloc a un descens del geopotencial mitjà al Mediterrani i l'Europa occidental. Amb valors prou elevats de PC podrien arribar a generar-se baixes individuals mediterrànies. A l'hivern i primavera la depressió es trobaria centrada sobre les illes de Còrsega i Sardenya. A l'estiu en canvi, la baixa apareixeria al nord d'Àfrica, i podria ser deguda al fort escalfament tèrmic del sòl i a la proximitat de la ITCZ (zona intertropical de convergència). En la EOF de tardor l'anomalia apareix desplaçada lleugerament cap al nord, fet que no és d'estrenyar ja que és aquesta època de l'any quan sovintega la circulació de depressions per aquestes latituds.

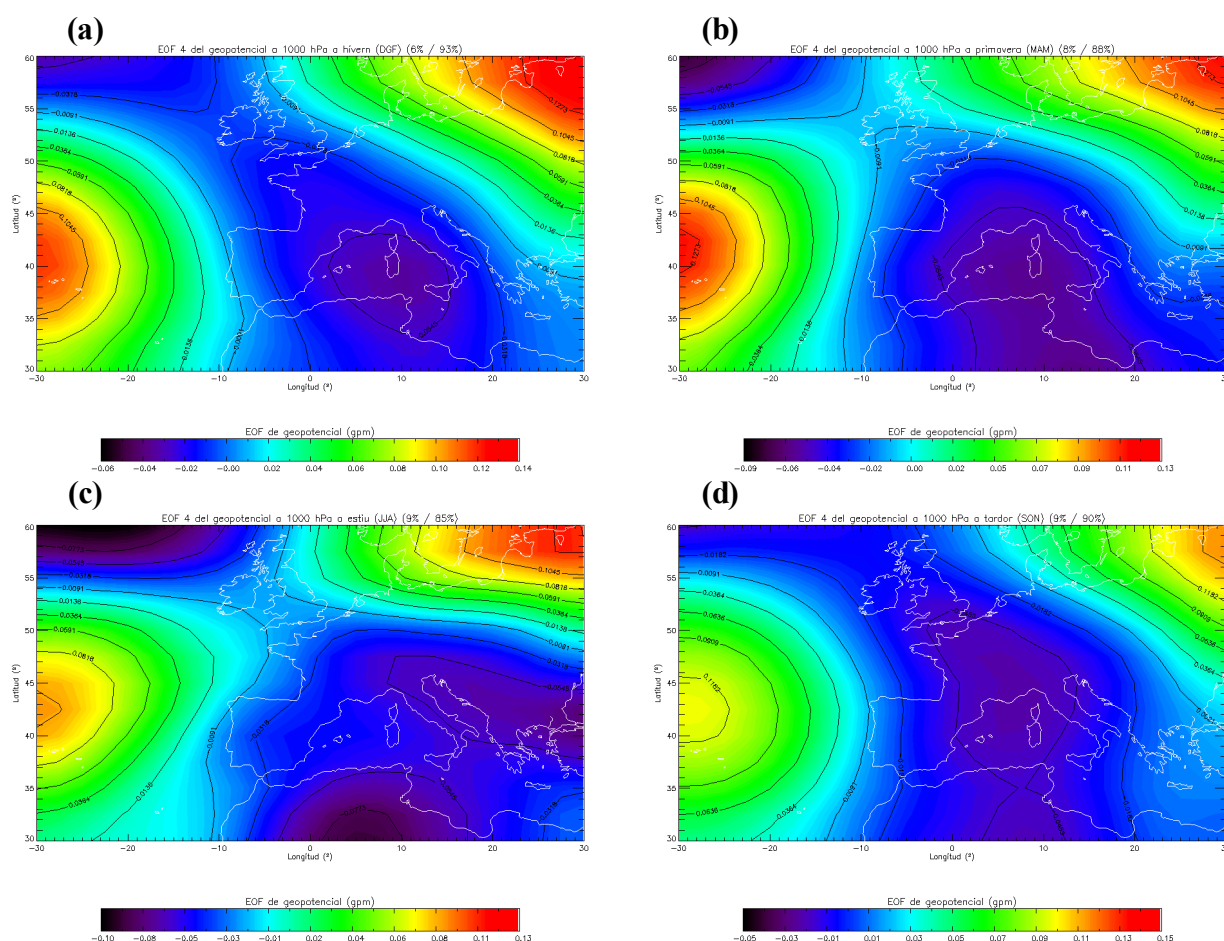


Figura 6.32: EOF4 estacionals del camp gp'_{1000} Hivern (a), primavera (b), estiu (c) i tardor (d)

En la fase negativa d'aquesta EOF per a totes les estacions s'obté un increment del geopotencial al Mediterrani proper a la costa catalana, amb una dorsal que s'estendria en direcció a les illes britàniques. Aquesta disposició d'elements és clarament contrària a la precipitació al Pirineu ja que facilita els moviments descendents i impedeix el pas de depressions sobre aquesta regió, de manera

que és lògic preveure que certa variabilitat de les sequeres als Pirineus s'explicarà amb aquesta EOF en fase negativa.

L'EOF5 explica al voltant d'un 4% de la variància de cada mostra. En totes les estacions es localitza un pol negatiu en diferents posicions de la costa atlàntica europea (fig. 6.33), essent en les estacions de primavera, estiu i tardor molt proper. Per contra la EOF d'hivern sí que ubica el pol ben lluny, al golf de Cadis, fet que denota un canvi en la variabilitat d'aquesta estació respecte la resta.

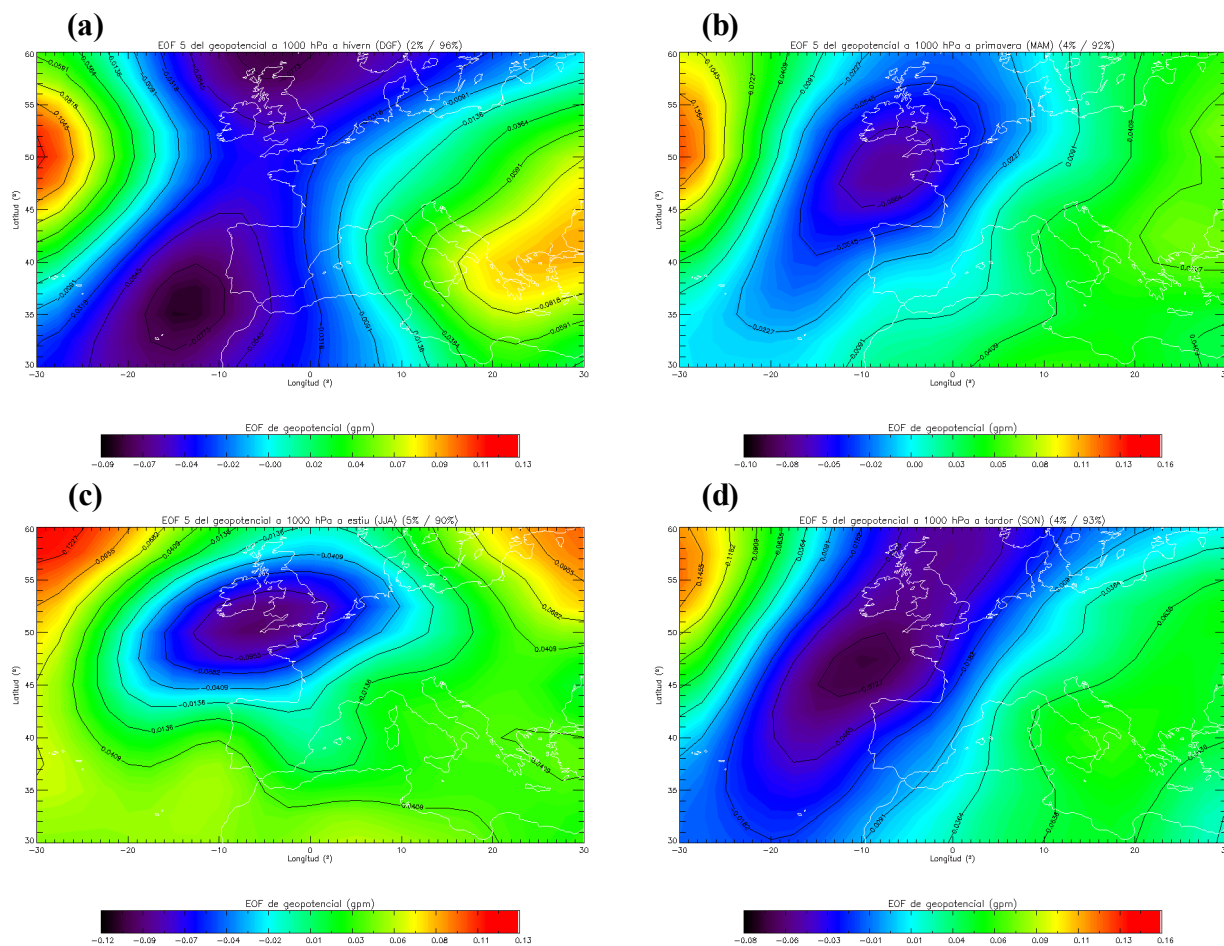


Figura 6.33: EOF5 estacionals del camp gp'_{1000} . Hivern (sup. esq.), primavera (sup. dret), estiu (inf. esq.) i tardor (inf.dret)

6.6 Variabilitat dels camps

Per tal de veure quina variabilitat presenta cada camp sinòptic i quina importància tenen les diferents EOFs, una possible tècnica és l'observació de la PC que presenta un valor més elevat per cada mes. D'aquesta manera es pot deduir en bona aproximació si un mes s'ha comportat segons una EOF o una altra. Per això es confecciona un gràfic amb el recompte de mesos que tenen una mateixa PC màxima, per a tots els camps sinòptics. Degut al fet que no s'ha realitzat una normalització de les EOFs els valors de les PCs són més grans com més variabilitat resolen. D'aquesta manera, és lògic que en un recompte s'obtinguin aquests resultats (fig. 6.34).

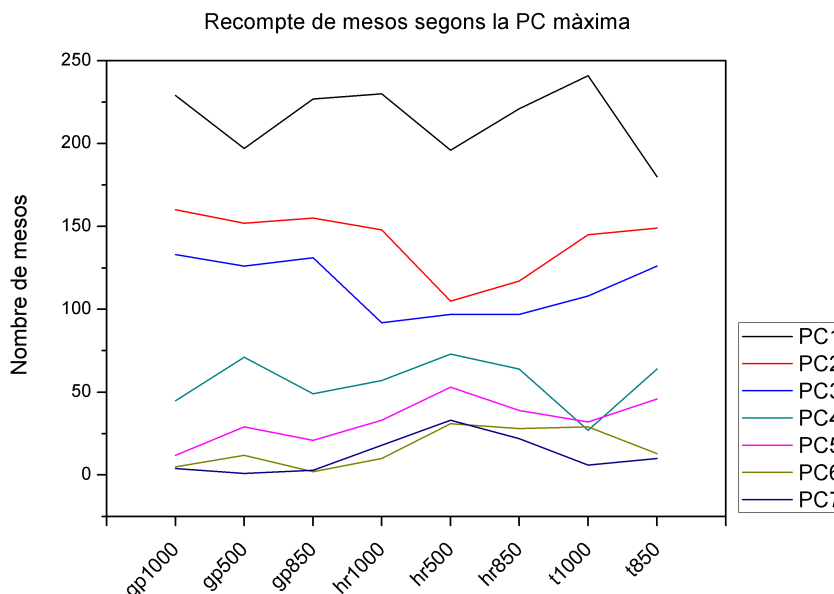


Figura 6.34: Recompte de mesos que presenten la PC màxima corresponent (en valor absolut)

En tots els camps s'observa un comptatge semblant, estant el número de casos per cada EOF sempre dins d'un cert rang. Tot i que no s'està tenint en compte el pes que representa cada EOF per a cada mes, sinó que només es comptabilitzen les EOFs que són màximes per a cada mes, s'obtenen resultats que estan d'acord amb el PCA. Aquells camps pels quals s'obtenen unes EOFs que expliquen la variància de manera molt compartida presenten un recompte on les últimes PCs predominen en força casos, i per contra les primeres PCs apareixen en menys mesos dels que caldria esperar. És el cas de la humitat a 500 hPa i la temperatura a 850 hPa, per les quals efectivament s'obtenien variàncies explicades molt petites (taula 7 i 8). En canvi pel geopotencial a 1000 hPa, pel qual s'observaven variàncies explicades lleugerament més elevades (taula 9) el recompte dona moltes més ocurrences a les EOFs més importants, i moltes menys per les darreres EOFs. Malgrat aquest raonament, les diferències observades entre els camps en el recompte són més elevades del que hom podria imaginar a partir de les variàncies explicades pels diferents anàlisis EOFs.

A partir d'aquest recompte no s'ha deduït quin camp és el més òptim ni s'ha confeccionat cap metodologia per tal de determinar quin camp és el més adequat per relacionar-lo amb la precipitació en una regió de dimensions reduïdes com és el Pirineu català. De totes maneres s'ha utilitzat el camp de geopotencial a 1000 hPa per dur a terme l'estudi més minuciós.

6.7 Anàlisi del camp de geopotencial mensual pels mesos secs: estratègia 1

En aquesta primera estratègia s'han seleccionat els mesos detectats com a secs en l'apartat 6.2 i s'ha extret una submostra, d'ara en endavant "submostra seca", de la sèrie temporal de PCs. A la vegada aquesta selecció de mesos secs permet crear 5 submostres, com en l'anàlisi EOF: la submostra seca total (figura 6.35) i les quatre submostres estacionals.

Així s'obtenen per cada *EOF Analysis* realitzat, set submostres seques de PCs (una per a cada EOF), que donen informació sobre el comportament de cada EOF pels mesos anòmals secs. En els PCAs

que es duen a terme a nivell estacional òbviament per extreure les submostres seques només es tenen en compte els mesos anòmals dins de l'estació en qüestió. De manera que la mostra total conté 83 mesos anòmals amb dèficit de precipitació, dels quals 20 corresponen a l'hivern, 24 a la primavera, 18 a l'estiu i 21 a la tardor.

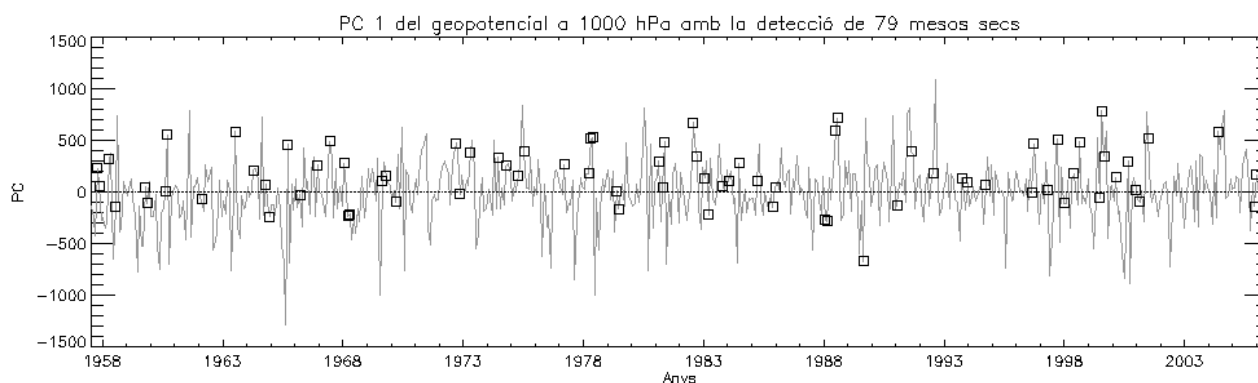


Figura 6.35: PC1 de la mostra total amb la selecció dels mesos secs (requadres)

Tal com es descriu en la metodologia (apartat 5.4) un cop s'han extret les PCs de les submostres seques, per tal d'esbrinar si les EOFs tenen alguna mena de vincle amb el dèficit pluviomètric és necessari estudiar-les estadísticament. Dels gràfics de l'evolució de PCs junt amb la selecció de mesos secs ja es pot observar si el dèficit de pluja té alguna relació amb alguna de les fases de la EOF, com es pot veure en la figura 6.35 on la major part de mesos secs corresponen a la fase EOF positiva ($PC1 > 0$). Tot i així l'ús de mesures de tendència central és més adequat per tenir una visió completa de la influència de cada EOF.

Una possible opció és calcular, per cada submostra, la mitjana i la desviació estàndard per tal de veure si per alguna EOF la submostra té preferència per alguna fase en concret, i també veure quina EOF esdevé la més important per explicar els mesos de la submostra. Una altra opció és analitzar rigurosament l'histograma de cada submostra, però donat que la informació més interessant que poden aportar els histogrames és veure on se situa la mitjana i la dispersió de les mostres, i aquesta informació ja la ofereix la mitjana i l'error associat, s'estudiaran únicament les mitjanes i els errors.

Calculant les mitjanes de totes les submostres seques de les diverses EOFs per totes les estacions es pot realitzar un únic gràfic de barres per comparar els diversos valors que prenen les PCs (fig. 6.36). L'error associat a cada mitjana (δ) es calcula segons la fórmula:

$$\delta = \frac{\pm s}{\sqrt{n}}$$

i també es representa en forma de barres d'error, on s és la desviació estàndard associada a la mostra de n elements.

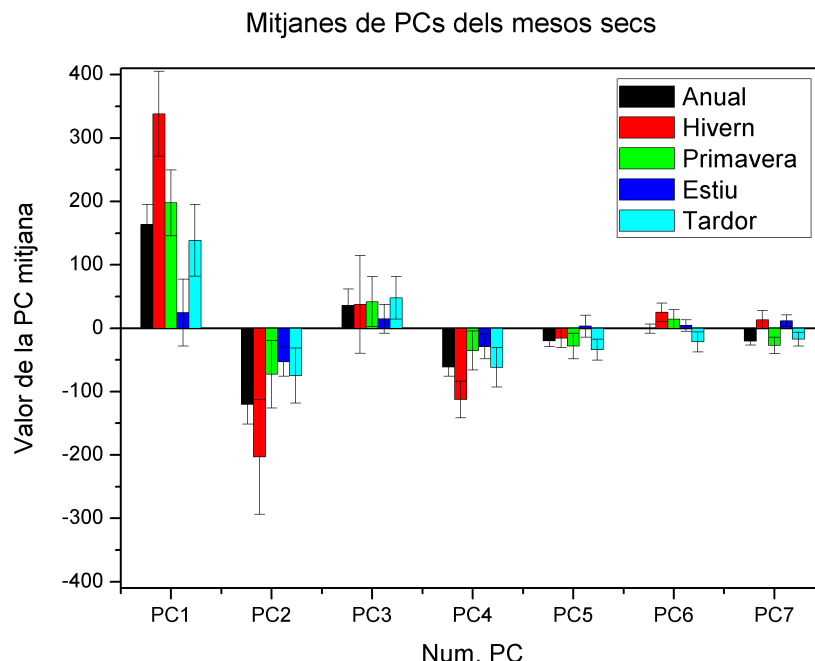


Figura 6.36: Mitjanes dels valors de PCs de les submostres seques de cada EOF i cada estació

En l'apartat 6.9 es discutiran els resultats obtinguts, també en comparació amb els que s'obtenen per mitjà de la segona estratègia. Analitzant un a un els valors de les PCs, és possible deduir si existeix algun tipus de vincle entre les EOFs i el dèficit de precipitació. Es pot veure com els mesos secs tenen una forta dependència amb una fase concreta de les dues primeres EOFs, amb l'excepció de l'estiu, on el valor de la PC no és tan elevat. Els mesos secs tenen una forta contribució d'EOF1 en fase positiva, mentre que la EOF2 sol presentar-se en la fase negativa. De la mateixa manera tot i que amb una contribució molt més minsa es veu com la EOF3 es manifesta preferiblement en fase positiva i la EOF4 en fase negativa. Per la resta d'EOFs la vinculació sembla dependre de l'estació de l'any, ja que s'obtenen els dos signes de les PCs.

6.8 Anàlisi del camp de geopotencial mensual pels mesos secs: estratègia 2

En aquesta estratègia, tal com s'ha explicat en l'apartat 5.4, es calculen els camps mitjans del conjunt de $gp'_{1000,jk}$ dels mesos anòmals secs (jk). Amb aquests camps $\overline{gp'}_{1000}$ mitjans secs es poden arribar a obtenir les PCs que els hi corresponen, simplement projectant aquests camps mitjans sobre l'espai vectorial de les EOFs per a cada cas. D'aquesta manera es poden trobar quines han de ser les components (PCs) per tal d'expressar aquests camps en la nova base vectorial de les EOFs. S'utilitzen les EOFs corresponents en cada cas, és a dir, per la mitjana de tots els mesos secs s'utilitza la base d'EOF de la mostra total, i per la mitjana dels mesos secs de cada estació s'utilitzen les EOFs de l'estació corresponent. Al final el resultat que s'obtingui hauria de ser molt coincident amb el resultat de l'estratègia 1 (apartat 6.7).

La mitjana que s'obté dels $gp'_{1000,jk}$ dels mesos secs totals jk , correspon a un anticicló ubicat clarament al golf de Lleó (fig. 6.37a). D'aquesta manera els Pirineus catalans es troben clarament sota l'efecte de les altes pressions, amb un dèbil flux de component nord, però a la vegada amb una forta subsidència deguda a les altes pressions, situació força estable i persistent. D'aquesta manera

es produeix un impediment molt gran als moviments ascendants i a la inestabilitat que podria provocar precipitació. En la figura 6.37b es pot veure la precipitació associada a aquests mesos secs. Com es pot constatar, la precipitació és molt inferior a les mitjanes mensuals típiques, amb valors entorn dels 20 mm. Tan sols s'aprecia un petit increment de precipitació, d'uns 40 mm a la vessant nord del Pirineu, a la Vall d'Aran, que està d'acord amb la dèbil circulació del nord que es té en valor mig mensual.

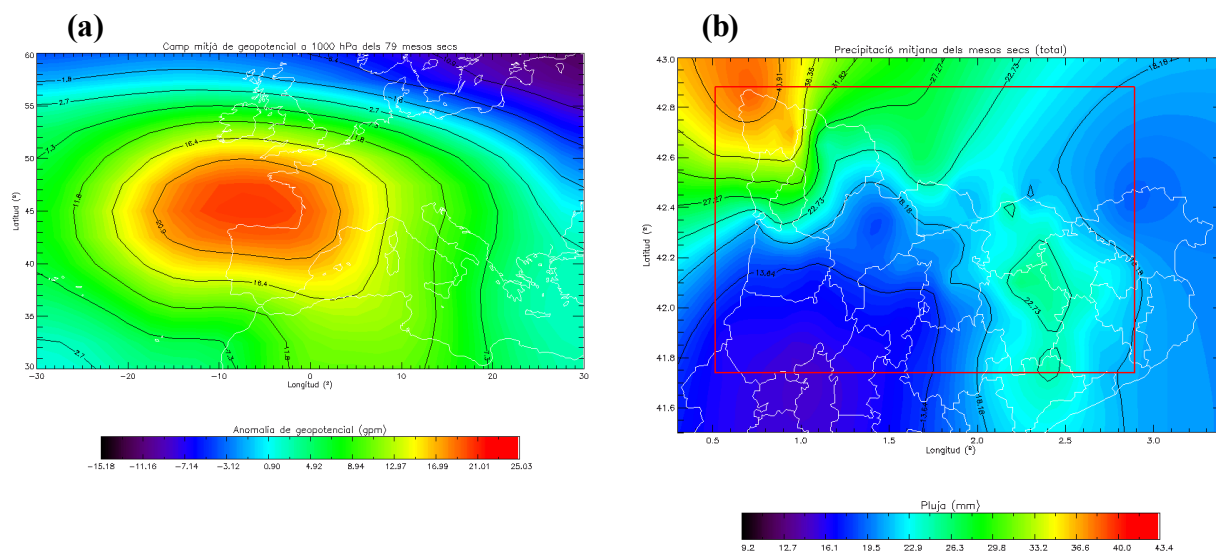


Figura 6.37: Camp $\overline{gp}'_{1000}$ dels mesos secs totals (a) i la pluja mensual mitjana associada (b)

De la selecció de mesos secs que s'ha realitzat (apartat 6.2) es poden construir les quatre submostres que corresponen a les quatre estacions de l'any. D'aquesta manera es poden veure les diferències existents entre les diferents estacions, tant pel que fa al $\overline{gp}'_{1000}$ (fig. 6.38) com pels camps de precipitació associats (fig. 6.5).

En tots els casos es pot apreciar un increment del geopotencial mig en diferents regions de la costa atlàntica europea, amb l'excepció de l'estiu que es troba desplaçat sobre la serralada dels Alps (fig. 6.38c). A l'hivern l'anomalia positiva es troba situada a la costa gallega estenent-se al llarg de la Península Ibèrica i l'Atlàntic (fig. 6.38a). A la primavera es té el mateix patró si bé els valors més elevats es troben lleugerament desplaçats cap al nord, estant ara al seu centre sobre el Mar Cantàbric (fig. 6.38b). Aquest desplaçament és lògic ja que durant la primavera els anticiclons ocupen latituds més elevades que no pas a l'hivern, ja que el front polar retrocedeix a latituds elevades en les estacions més calentes. A l'estiu el camp $\overline{gp}'_{1000}$ mitjà dels mesos secs és ben diferent, com ja s'ha comentat, amb dues febles anomalies positives a centre Europa i al nord d'Àfrica i una de negativa a l'Atlàntic (fig. 6.38c). A la tardor l'anomalia positiva es troba situada sobre la península de la Bretanya de manera que els Pirineus es troben sota la influència de les altes pressions (fig. 6.38d).

Així doncs a l'hivern, primavera i tardor els mesos amb poca precipitació venen caracteritzats per augments del geopotencial en zones molt properes als Pirineus i sempre a latituds superiors, essent notable l'increment també sobre aquesta regió. D'altra banda a l'estiu la poca precipitació no ve donada per la influència directa de les pressions altes, sinó per deformitats del $\overline{gp}_{1000}$ que varien la circulació atmosfèrica a nivell mensual, donant lloc a un flux mitjà de component sud provinent del nord d'Àfrica amb una massa d'aire típicament seca i càlida.

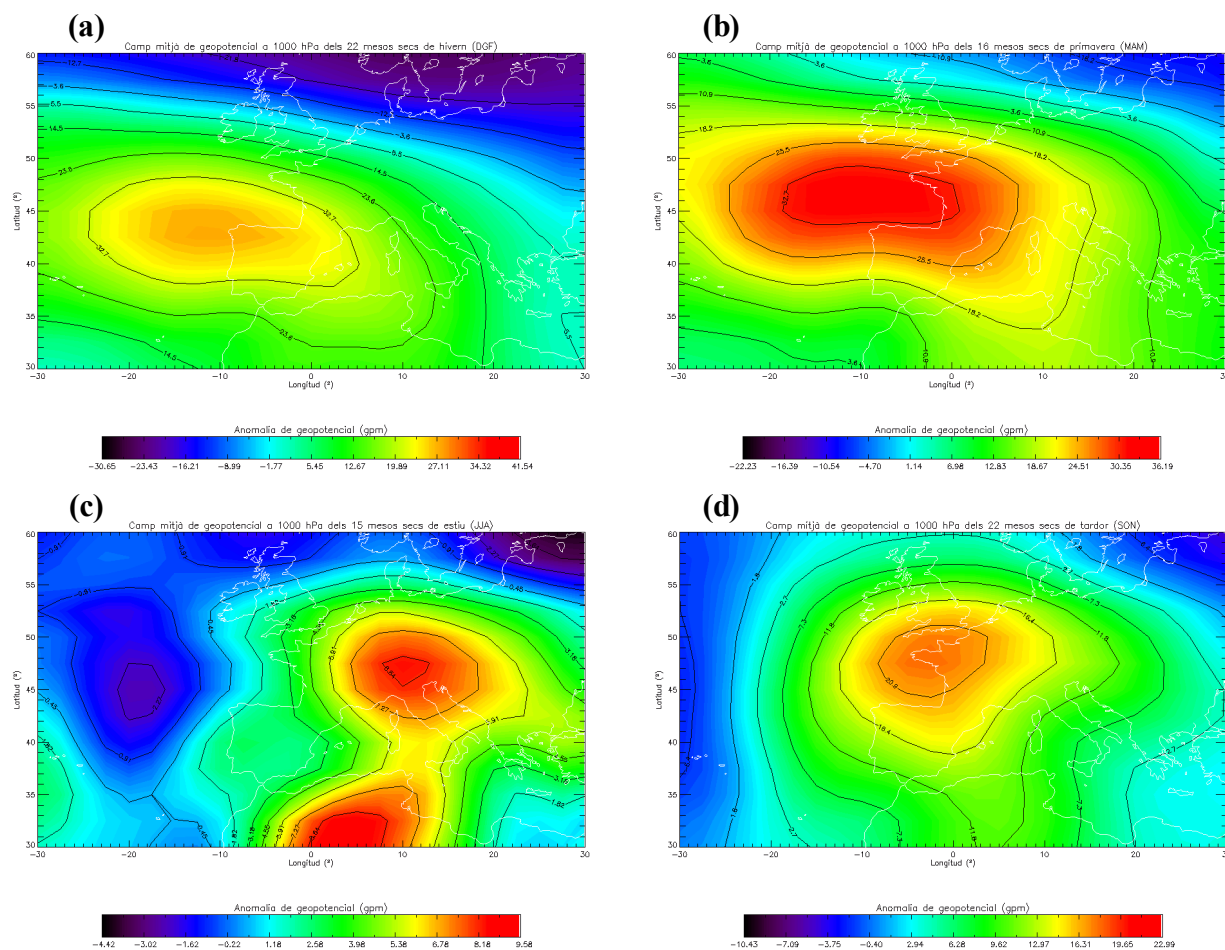


Figura 6.38: Camps $\overline{gP}'_{1000}$ dels mesos secs de les diferents estacions.

Hivern (a), primavera (b), estiu (c) i tardor (d)

Tal com s'ha descrit en la metodologia, un cop s'han obtingut els camps mitjans, per relacionar-los amb les EOFs obtingudes es pot fer qualitativament, però també es pot realitzar un canvi de base per expressar aquests camps mitjans en funció de les EOFs corresponents. Així s'obtenen els coeficients de les EOFs, o PCs, de cada camp mitjà. Finalment s'acaba obtenint el mateix gràfic que en l'apartat anterior però per mitjà d'una altra via (fig. 6.39).

Comparant amb el resultat de l'estratègia 1 (fig. 6.36), les coincidències són extraordinàries fet que denota la robustesa i complementarietat dels mètodes. En concret els resultats són exactes amb tota la precisió de quatre decimals amb la que s'han realitzat els càlculs. Així doncs la discussió entorn dels resultats és equivalent a la que s'ha realitzat en l'apartat anterior.

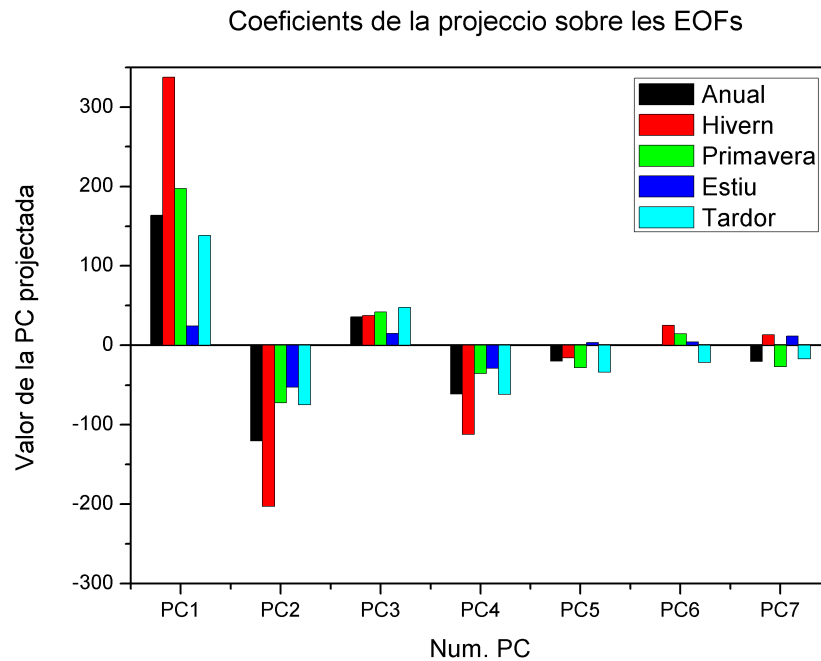


Figura 6.39: Valors de les PCs per a cada estació trobats per mitjà de l'estratègia 2

6.9 Caracterització de les sequeres al Pirineu

Observant els resultats d'ambdues metodologies es conclou que les dues vies són alternatives ja que s'obtenen els mateixos valors de PCs. Si s'observa la situació amb certa perspectiva és possible veure el perquè d'aquesta exacta equivalència (fig. 6.40). En total s'apliquen dues operacions: el canvi de base donat per l'anàlisi EOF, i el càlcul de la mitjana del camp, component a component, per la selecció de mesos anòmals.

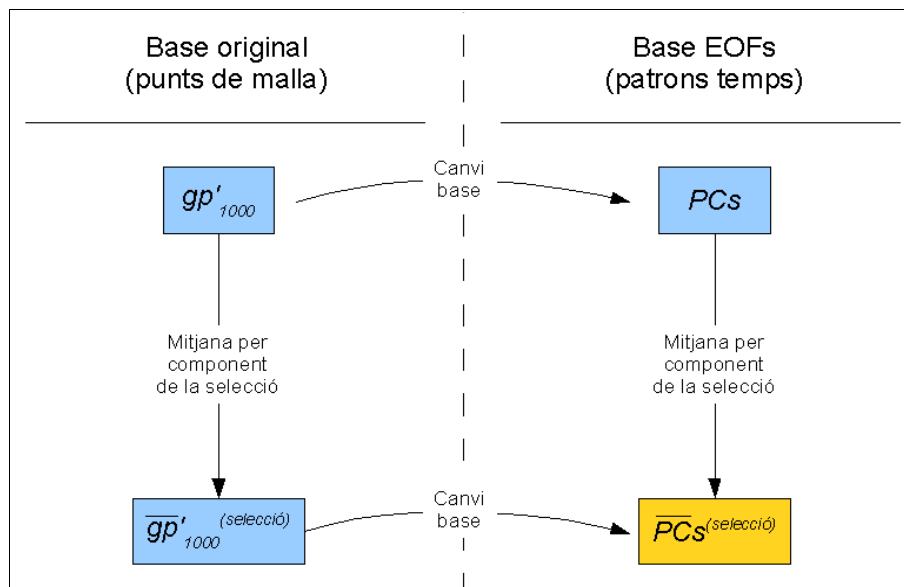


Figura 6.40: Esquema explicatiu de les estratègies 1 i 2

I aquestes dues operacions compleixen la propietat commutativa ja que estan basades en productes i sumes, de manera que l'ordre en què s'aplica no altera el resultat final. L'únic avantatge que planteja aplicar primer el canvi de base i després la selecció (estratègia 1) és que és senzill calcular l'error associat al càlcul de les $\overline{PC}s$ ja que es calcula sobre el camp expressat en la nova base, i per tant l'espai vectorial té dimensions reduïdes.

En la taula 10 es detallen per a cada estació les EOFs que són més influents en primer, segon i tercer lloc. Cal fer notar que tot i que no s'especifiqui cap distinció entre elles les EOFs de cada columna són diferents ja que s'han obtingut d'anàlisis de submostres diferents. D'ara en endavant quan es parla d'una EOF s'escriu a continuació un signe + o -, per fer notar la fase de la qual es tracta.

EOFs principals per les submostres seques					
	Total	Hivern	Primavera	Estiu	Tardor
EOF ppal	1 (+)	1 (+)	1 (+)	2 (-)	1 (+)
EOF segona	2 (-)	2 (-)	2 (-)	4 (-)	2 (-)
EOF tercera	4 (-)	4 (-)	3 (+)	1 (+)	4 (-)

Taula 10: EOFs amb valors de PC més elevats pels mesos secs

De la taula 10 s'observa que les estacions d'hivern, primavera i tardor la EOF més influent en la submostra seca és la primera en fase positiva i la segona en ordre d'importància és la EOF2-. Per l'hivern i la tardor, la següent EOF és la EOF4-, essent doncs la descomposició d'aquestes dues estacions la més freqüent tal com es veu en la mostra total. Les sequeres d'estiu es descomposen en els mateixos patrons però amb ordre diferent, essent doncs una estació particularment diferent. En el cas de la primavera també és interessant fer notar que la EOF3+ esdevé més rellevant que la EOF4-, situant-se en tercer lloc.

En la figura 6.41 s'ha representat de forma conjunta el geopotencial mitjà de cada estació juntament amb l'anomalia $\overline{gp}'$ i la precipitació mitjana $\overline{pp}$ associades a la submostra seca. En la primera columna s'observen els camps de $\overline{gp}_{1000}$ a nivell estacional. És important fer notar que l'escala de colors no és la mateixa en tots els gràfics sinó que en cada cas depèn del recorregut que presenten els valors de geopotencial. És per això que en l'annex 11.6 s'han adjuntat aquests quatre gràfics amb més detall.

Per l'hivern, el geopotencial mensual correspon a l'anticicló de les Açores afeblit i centrat sobre les Açores, amb la presència d'un anticicló tèrmic sobre Europa i una depressió tèrmica ubicada al mar Mediterrani, tal com es comenta a Arhens (2000). En el camp de $\overline{gp}_{1000}$ que s'ha obtingut (figs. 6.41 i 11.11a) es constata que l'hivern és l'estació per la qual es registren els valors més elevats de geopotencial sobre Europa, inclosa també la regió d'estudi, i s'aprecia també la baixa tèrmica del Mediterrani.

A la primavera l'anticicló es troba més restringit a la regió de les Açores ja que sobre Europa el geopotencial ja no és tan elevat, però tot i així encara s'observa un cert nucli de geopotencial baix sobre el Mediterrani. Un aspecte important a destacar s'observa en les figures 6.41 i 11.11b i és que el gradient meridional de geopotencial és molt més lleu que pel cas de l'hivern ja que el front polar es troba en latituds més elevades, i per tant la variació queda més repartida latitudinalment. És per això que hom pot pensar que un possible desplaçament de l'anticicló de les Açores cap al nord és més factible que no pas a l'hivern.

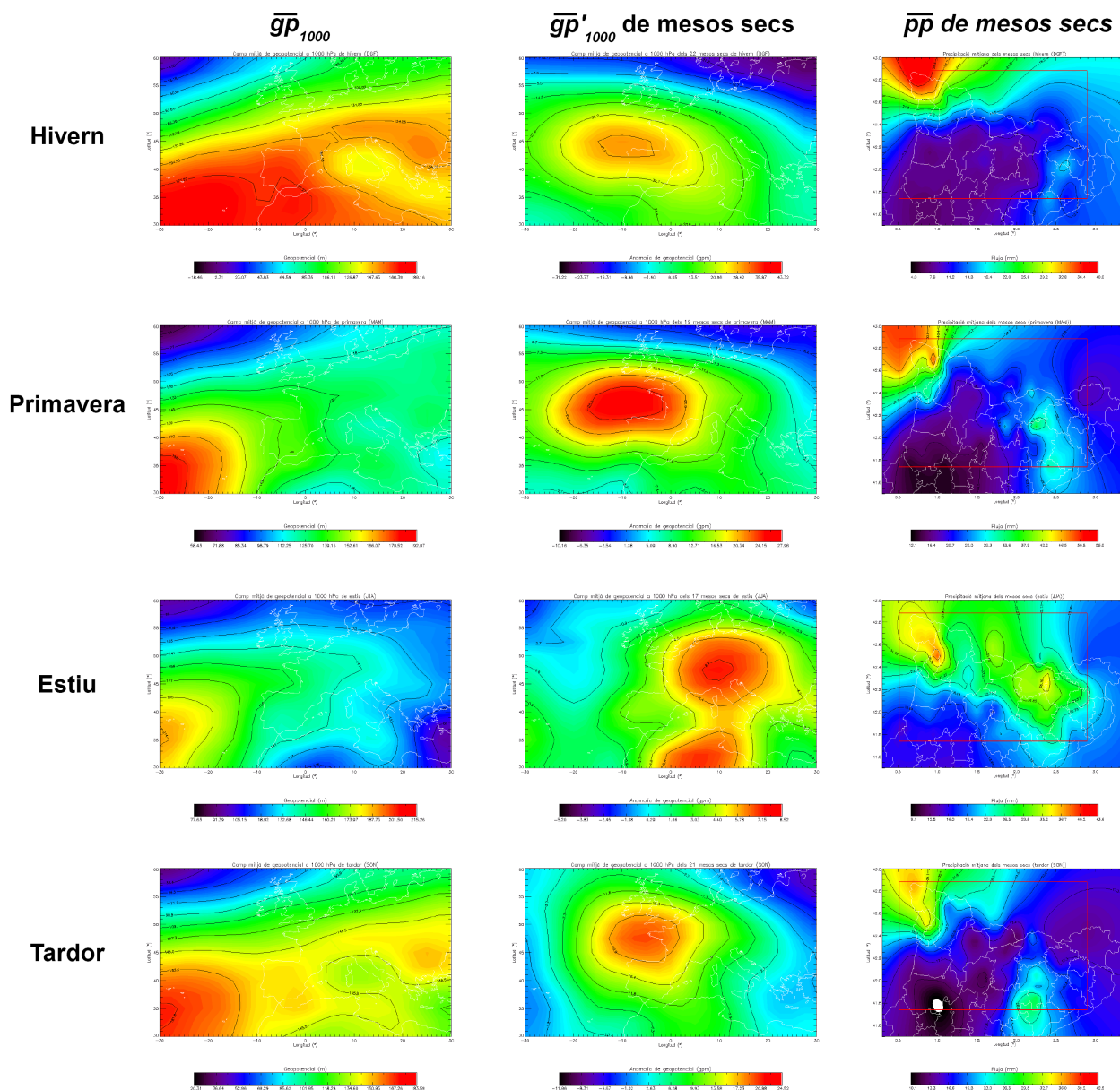


Figura 6.41: Quadre resum del geopotencial mitjà de 1000 hPa per a cada estació, junt amb l'anomalia mitjana que presenten els mesos secs, i el camp de precipitació mensual mitjana d'aquests mesos

A l'estiu s'observa una lleu falca anticiclònica entrant pel golf de Biscaia, i un clar predomini de baixes pressions sobre bona part d'Europa (figs. 6.41 i 11.11c). Pel cas dels mesos secs d'estiu el més típic és que l'anticicló de les Açores abarqui molta més extensió, prenent pràcticament la totalitat de l'Atlàntic nord, mentre que les depressions tèrmiques queden ubicades sobre els continents, i és per això que el geopotencial sobre Europa és menor.

Durant la tardor l'anticicló de les Açores té les mateixes dimensions que en la primavera, però el geopotencial sobre Europa augmenta lleugerament restringint les baixes pressions a latituds elevades, i en concret apareix un petit centre anticiclònic sobre la península balcànica, fruit del refredament radiatiu de la superfície (figs. 6.41 i 11.11d). Normalment a la tardor, a nivell mensual ja es comença a observar la depressió tèrmica al mediterrani ja que el mar es troba a més temperatura que no pas el continent que es va refredant radiativament amb l'avanç de l'estació, de manera que propicia l'augment del geopotencial, tal com s'observa a les figures. L'anticicló de les

Açores ja es troba a latituds més baixes i afeblit, de manera que el pas de depressions del front polar a latituds mitjanes és possible, i solen activar-se al mediterrani donada l'energia que encara conté.

En la segona columna de la figura 6.41 s'observa el camp $\overline{gp}'_{1000}$ associat al conjunt dels mesos secs. De manera que es pot tenir un cert patró de la situació sinòptica mensual que es dona en superfície quan es té un dèficit pluviomètric al Pirineu, o en tot cas es pot afirmar que aquest patró mitjà ha estat el responsable de les sequeres mensuals ocorregudes dins el període d'estudi 1958-2006. Precisament aquest camp de precipitació anòmal a és el que s'ha representat per a cada estació en la tercera columna per tal de tenir la vinculació directa entre l'anomalia sinòptica i l'anomalia de pluja. El que sí s'observa és que l'anomalia positiva de geopotencial a l'hivern, primavera i tardor és molt més intensa que per l'estiu, trobant-se pràcticament la totalitat de la finestra gràfica sota l'efecte de l'anomalia positiva. En concret pel cas de l'hivern es té l'anomalia $\overline{gp}'_{1000}$ més intensa i extensa ubicada a la costa atlàntica del nord-oest de la Península abarçant bona part d'Espanya. A la primavera, en canvi, s'observa una anomalia intensa però no tant com per l'hivern, i es troba lleugerament desplaçada cap al nord, amb el seu centre sobre el golf de Biscaia. És una distribució semblant a la que es té a la tardor on el centre es troba sobre la Bretanya francesa. Pel cas de l'estiu els mesos secs presenten anomalies molt febles i de dimensions més reduïdes. En concret es tenen valors baixos de gp_{1000} a l'Atlàntic nord, creant un dipol amb l'increment de geopotencial de centre Europa, a banda d'una altra regió de valors elevats al nord d'Àfrica.

La tercera columna permet tenir una visió conjunta de l'associació entre els camps de $\overline{gp}'_{1000}$ i de $\overline{pp}$ dels mesos secs. Les diferències que s'observen entre les diferents estacions ja han estat comentades a l'apartat 6.2.

Malgrat tenir el quadre relatiu a les sequeres (fig. 6.41) no es té una informació clara de quins són els elements individuals que provoquen les alteracions en el camp de geopotencial a 1000 hPa, que a la vegada provoca les anomalies pluviomètriques. És per això que és útil la vinculació establerta per mitjà de l'estratègia 1 i 2 ja que aleshores és possible explicar aquestes quatre anomalies del $\overline{gp}_{1000}$ per mitjà dels patrons de temps típics del camp sinòptic de tota la mostra completa estacional. Amb aquest objectiu es representen conjuntament les tres EOFs més rellevants per tal de tenir una idea dels tres patrons sinòptics principals que descriuen els mesos amb dèficit pluviomètric per cada època de l'any (fig. 6.42). Observant les diverses EOFs i tenint en compte la fase es corrobora que les sequeres venen caracteritzades a nivell sinòptic per la presència d'anomalies positives de geopotencial com és àmpliament sabut. Però el que és interessant és veure quines són les fluctuacions concretes dels centres d'altres pressions per a cada estació, que superposades generen les situacions de dèficit de pluja.

Per l'hivern la combinació òptima en tres patrons es compon de: EOF1+, EOF2- i EOF4-. Si l'anticicló de les Açores es desplaça lleugerament cap al nord i cap a l'est, esdevenint més proper a la Península, és molt probable l'ocurrència de mesos secs (EOF1+), essent aquesta la causa principal. El segon patró en importància que dona lloc a mesos amb dèficit pluviomètric correspon a l'anticicló de les Açores en el seu lloc habitual, però intensificat de manera que ja es tindrà una probabilitat prou alta de sequera (EOF2-). La tercera EOF per ordre d'importància presenta la EOF 4 en la fase negativa, la qual situa una anomalia positiva de geopotencial sobre Sardenya. Aquesta situació és atípica a l'hivern ja que sol haver-hi una baixa tèrmica. La presència de la EOF4- però, també té la seva rellevància ja que aquest patró implica un impediment important al pas de depressions sobre els Pirineus, fet que redueix considerablement la gènesi de precipitació al Pirineu. Els tres patrons comporten estabilitat i subsidència sobre els Pirineus, dificultant la precipitació.

Donat que la EOF1+ i la EOF2- contribueixen a augmentar el geopotencial, tal com s'ha comentat, es genera un flux mensual de component nord el qual és propici a precipitacions a la vessant nord i no pas a la vessant sud. I aquesta distribució de pluja està d'acord amb el camp mitjà $\overline{pp}$ que s'obté dels mesos secs hivernals.

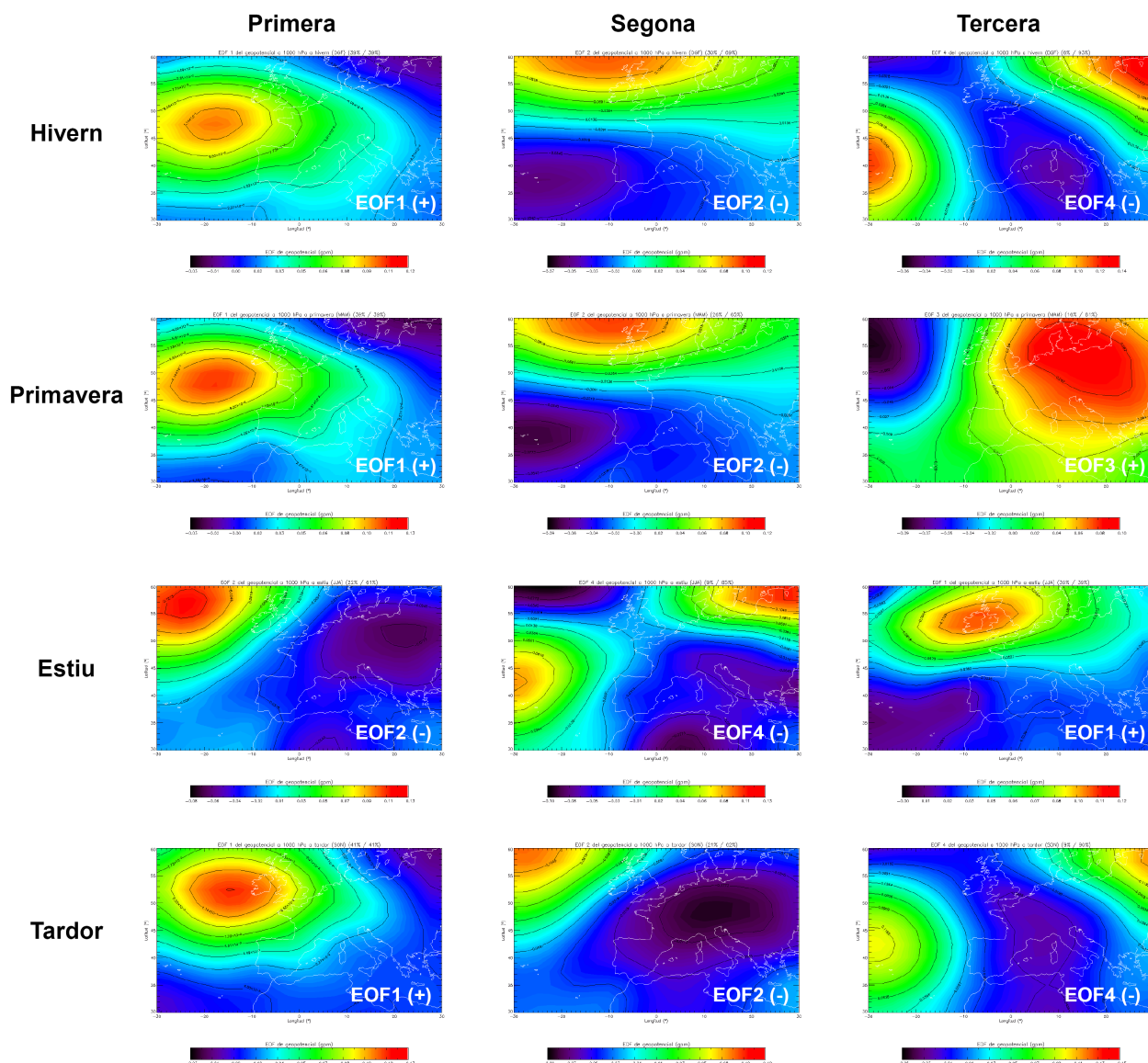


Figura 6.42: Quadre resum de les tres EOFs més importants en els mesos secs de les quatre estacions.

A cada gràfic s'hi adjunta la fase de la EOF: + (positiva) o – (negativa)

Per a la primavera s'obtenen els patrons EOF1+, EOF2- i EOF3+, de manera que els patrons que causen les “sequeres” poden explicar-se amb la intensificació de l'anticicló de les Açores i el seu desplaçament cap a regions més septentrionals i properes als Pirineus. En concret la EOF1+, la més rellevant, és molt semblant i respon a un desplaçament de l'anticicló pràcticament igual que per l'hivern, com es pot veure de la figura 6.29. Una lleu diferència és que a la primavera la EOF2- perd molta contribució (figs. 6.36 i 6.39), de manera que els mesos secs són deguts bàsicament a un desplaçament cap al nord de l'anticicló de les Açores (EOF1+) però no tant reforçat com a l'hivern. Efectivament aquesta preponderància de la EOF1+ queda palesa en el $\overline{sp}'_{1000}$ dels mesos secs de la figura 6.38. En tercer lloc apareix la EOF3+ que denota l'augment del geopotencial sobre Europa, tot i així la $\overline{PC}$ és molt semblant a la de la EOF4-, de manera que la contribució d'aquest patró

es troba compartida amb la EOF4-.

L'anomalia mitjana $\overline{gp}'_{1000}$ de l'estiu es descomposa en patrons bastant diferents respecte els dos casos anteriors, tant perquè els autovectors EOFs són diferents, com perquè l'ordenació d'importància també varia (taula 10). El patró principal respon a una anomalia positiva de gp_{1000} sobre l'est d'Europa (EOF2-), on normalment es tenen pressions més baixes (fig. 11.11c), de manera que se situa un anticicló sobre Europa, que dificulta la precipitació. Aquesta situació ve reforçada pels patrons secundaris que aporten l'anomalia positiva al nord d'Àfrica i al mediterrani oriental (EOF4-) i a les illes britàniques (EOF1+). D'altra banda la EOF2- i la EOF4- aporten un descens del geopotencial mensual sobre l'Atlàntic nord, que no és tan marcat en la resta d'estacions, ja que la EOF4- que el conté no té tanta representativitat. També és interessant fer notar que la descomposició en patrons EOFs dels mesos secs (figs. 6.36 i 6.39) manifesta un clar dèficit de caracterització d'aquests mesos estivals per mitjà de les EOFs, ja que els valors de les PCs són molt petits i semblants, per la qual cosa, la causa de les sequeres es troba més desvinculada del marc sinòptic estudiat que per la resta d'estacions (fig. 6.43). Aquest fet és lògic ja que la major part de precipitació estival al Pirineu es produeix per mecanismes que no són pròpiament sinòptics, sinó que responen a processos termodinàmics de petita escala, com l'escalfament del terra que provoca grans pluges convectives.

Un cas ben diferent és la tardor en la qual els valors de PCs per les tres EOFs són majors fet que indica una relació més estreta amb el dèficit de precipitació al Pirineu, si bé no és tant clara com per l'hivern i la tardor. Al descomposar el camp mitjà $\overline{gp}'_{1000}$ en tres patrons, en primer lloc hi ha la EOF1+ i en segon lloc apareix la EOF2-. És a dir l'absència de pluja mensual a la tardor té a veure principalment amb un increment sobre l'Atlàntic nord, en concret a l'oest d'Irlanda (EOF1+) i/o amb un augment del geopotencial mitjà sobre Europa central (EOF2-). La EOF4- aporta un reforç a l'anomalia positiva de centre Europa. Així doncs els dos patrons principals combinats donen lloc a un anticicló a nivell mensual ubicat a una regió molt septentrional per l'època, donant lloc a pressions elevades a Europa central i a l'Atlàntic nord amb el seu centre sobre la Bretanya francesa (fig. 6.38). Una disposició d'aquesta mena provocaria una circulació mensual mitjana del nord-est sobre els Pirineus, advecció continental seca i freda, i que no sol deixar grans precipitacions al Pirineu català.

Un altre aspecte important a tenir en compte és l'estudi de l'evolució de les PCs al llarg de l'any, ja que s'observen valors ben diversos en funció de la EOF que es tracti. Si les PCs presenten valors elevats implica que el camp mitjà corresponent als mesos secs s'explica en bona mesura amb les EOFs, mentre que per PCs amb valors petits el camp mitjà no s'explica tan idòniament.

En la figura 6.43 es pot observar la oscil·lació que es produeix, més intensa en algunes EOFs que en d'altres, i la diferent correlació existent entre EOFs i sequeres depenent de l'estació de la que es tracti. L'hivern és l'estació en la que les EOFs tenen més relació amb l'ocurrència de sequeres, molt menys pel cas de primavera i tardor, i pràcticament gens per l'estiu. Contràriament al que hom podria pensar, el fet que la PC1 vagi variant el seu valor al llarg de l'any no implica que quan la PC1 té un valor baix, alguna altra PC assoleixi un valor més alt, per tal de conservar el valor total de les PCs. De fet es produeix l'efecte totalment contrari, de manera que les oscil·lacions de totes les PCs es troben en fase, assolint els valors màxims i mínims de PCs en les mateixes estacions. A l'hivern les PCs assoleixen el valor màxim, excepte en la PC3, la PC5 i la PC7, que assoleixen el màxim a la primavera i tardor.

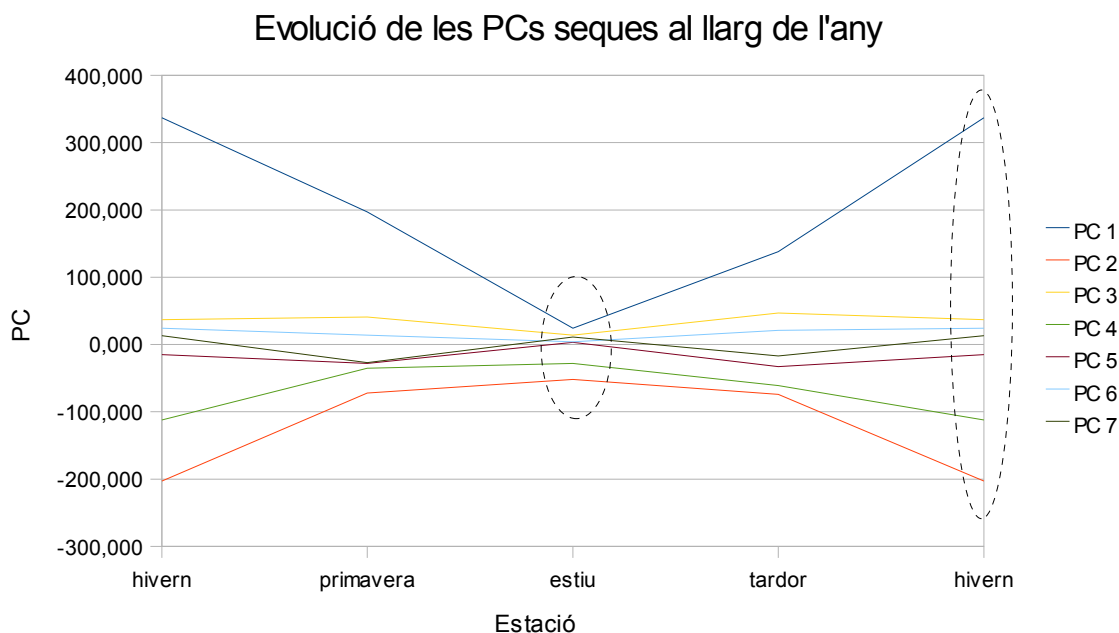


Figura 6.43: Evolució de les PCs al llarg de l'any. Amb una el·lipse petita apareix marcada l'estació amb correlació mínima, i amb l'el·lipse gran la màxima

Així doncs la relació entre l'anomalia negativa de precipitació i el camp sinòptic de geopotencial a 1000 hPa, presenta el seu màxim a l'hivern i el seu mínim a l'estiu, mentre que per la primavera i la tardor presenta valors mitjans. És totalment coherent que la precipitació a l'estiu tingui poc a veure amb el camp gp_{1000} com s'ha dit abans ja que moltes pluges es produeixen per efecte tèrmic de l'escalfament del terra, procés que no és visible en l'entorn sinòptic.

	EOFs per ordre d'importància						
	Principal		Segona		Tercera		Total
	EOF	Variància explicada	EOF	Variància explicada	EOF	Variància explicada	Variància acumulada
Hivern	EOF1+	39	EOF2-	30	EOF4-	6	75
Primavera	EOF1+	39	EOF2-	26	EOF3+	16	81
Estiu	EOF2-	22	EOF4-	8	EOF1+	39	69
Tardor	EOF1+	41	EOF2-	21	EOF4-	9	71

Taula 11: Variàncies explicades per cada una de les EOFs que s'han obtingut com a principals de la vinculació de les EOFs estacionals i els mesos secs

Les bases vectorials d'EOFs estacionals no són les mateixes ja que cada una prové d'anàlisis de submostres diferents, de manera que depenent de l'estació la variabilitat explicada es reparteix de manera diferent entre les diverses EOFs (taula 11). L'ordre d'importància de les EOFs vinculades a sequeres s'ha fet en base al valor associat de PC, i no pas a la variància explicada ja que aquesta fa referència a tota la mostra completa. Així comparant l'ordre obtingut amb les PCs (taula 10) amb les variàncies es posa de manifest fins a quin punt les sequeres mensuals estacionals es produeixen en situacions sinòptiques poc freqüents. Destaca el cas de l'estiu en el qual la variància acumulada és més baixa, i on les dues EOFs més vinculades tan sols representen el 30% de variabilitat, enfront dels 60-70% que s'obtenen per a la resta d'estacions. Això corrobora el que s'ha comentat abans, que per l'estiu no s'obté una justificació de déficit pluviomètric en els patrons sinòptics tan clara com per la resta d'estacions.

6.10 Episodi de març – abril de 2008

S'han seleccionat dos mesos emmarcats en les acaballes de la darrera sequera que es va viure a Catalunya. Es tracta dels mesos de març i abril de 2008. Aquests mesos presenten l'avantatge que no formen part del període emprat per dur a terme la caracterització de les sequeres amb el geopotencial a 1000 hPa, de manera que pot testear-se la capacitat aplicativa de les conclusions del treball a períodes no calibrats, tenint present en tot moment que aquests mesos no són pròpiament secs sinó que incorporen una certa recuperació pel que fa al nivell de pluviometria.

En la figura 6.44a del mes de març s'observa que la major part del territori es troba amb registres de pluja entorn de la mitjana i fins i tot per sota. Únicament a la zona del Pirineu aranès i també al Pallars Sobirà hi ha un excedent de pluja respecte la climatologia. D'altra banda observant el mes d'abril (fig. 6.44b), la precipitació sí que presenta una anomalia ben diferent de les que s'han obtingut a nivell mitjà (fig. 6.41), amb un pic situat a cavall entre les comarques de l'Alt Urgell, el Solsonès i el Berguedà. I es pot veure com a l'abril la pluja és més generalitzada i abundant a tot el domini, marcant doncs el final del període de dèficit de pluja. Tot i així el decret de sequera de l'abril de 2007 no es va derogar fins al desembre de 2008, quan el recurs hídric es trobà en un escenari de normalitat.

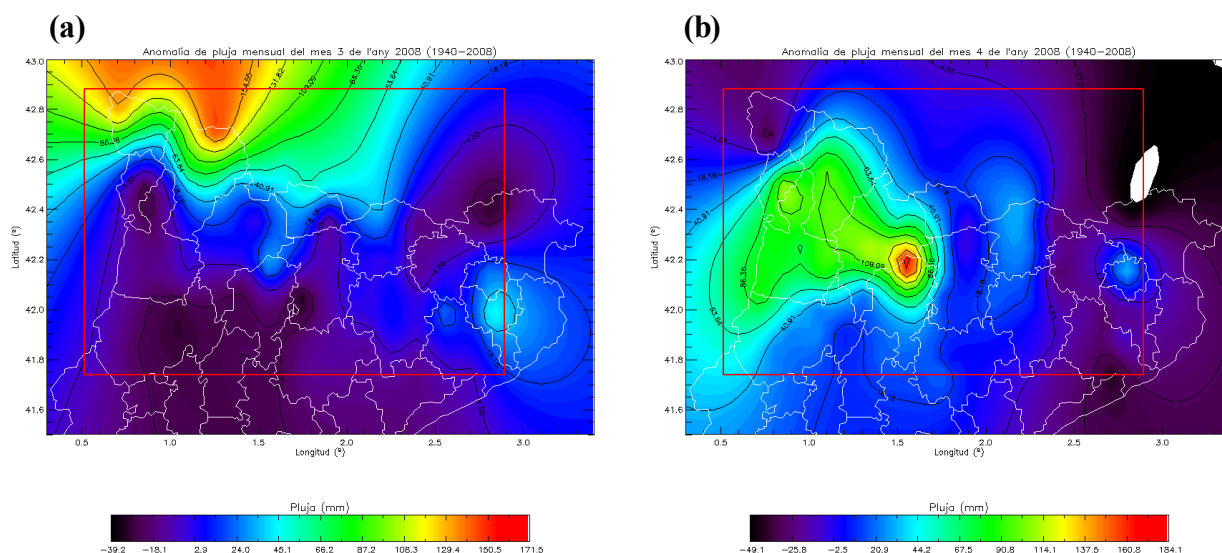


Figura 6.44: Anomalies de precipitació respecte la mitjana del mes de març (a) i abril (b) de 2008

Es pot realitzar el filtrat emprat a l'apartat 6.2 per tal de detectar si aquests mesos serien detectats com a secs o no, i en ambdós casos el resultat és negatiu. Pel mes de març un 10.3% dels punts es troben allunyats suficientment i per l'abril només un 2%, per tant no s'arriba al 70%, de manera que aquests mesos no serien detectats com a secs. Ans el contrari, el 2% del mes d'abril evidencia l'extensió de les pluges a tot el domini, ja que tan sols un 2% de punts es troben amb pluges molt inferiors a la mitjana.

S'han obtingut els mapes de geopotencial mensual a 1000 hPa i la seva anomalia del servei NOMADS (http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data) a la secció de “CDAS-NCEP/NCAR Reanalysis pressure level – monthly mean” per tal de comparar aquests camps amb els que s'han obtingut en l'estudi realitzat (fig. 6.45).

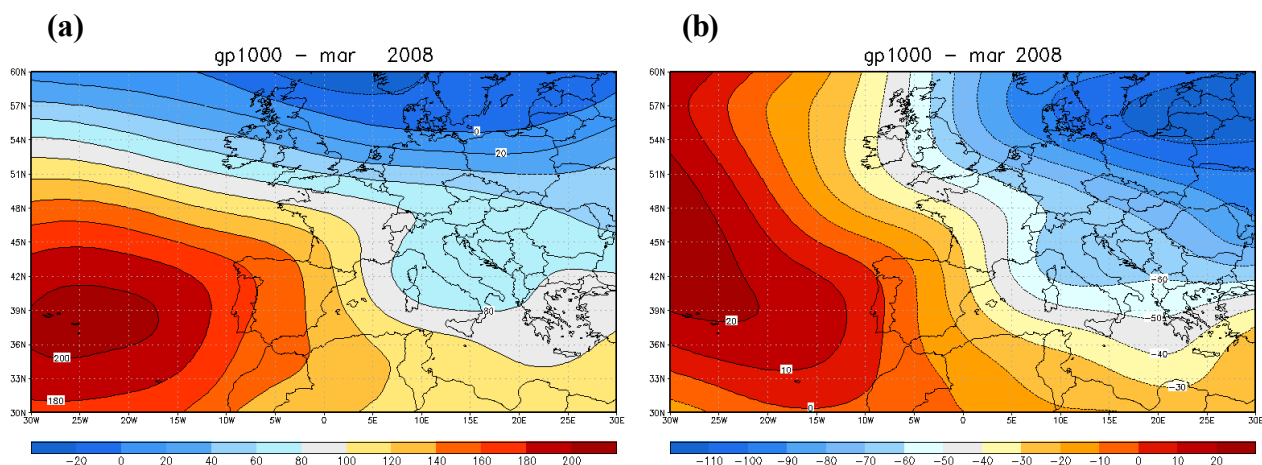


Figura 6.45: Geopotencial a 1000 hPa (a) i anomalia mensual (b) pel mes de març de 2008

L'anomalia gp'_{1000} (fig. 6.45b) d'entrada no es correspon amb l'anomalia típica que s'ha obtingut pels mesos secs de primavera (fig. 6.41). Si es compara qualitativament aquest camp d'anomalia del NCEP amb les EOFs principals en les quals es descomposen les sequeres, es veu que té una forta correlació amb la EOF1+ i la EOF2-, mentre que la EOF3+ no hi té contribució, per la qual cosa l'anomalia positiva no es troba gaire desplaçada cap a l'est, sinó que es manté a l'Atlàntic nord. Tot i així la forta contribució de les dues primeres EOFs asseguren el dèficit de pluja, sobretot a la vessant sud del Pirineu tal com es veu en la figura 6.44a.

Si s'analitza el camp de gp'_{1000} (fig. 6.46b) no es troba cap coincidència qualitativa amb les EOFs més rellevants per les sequeres primaverals, de manera que la pluja no hauria de ser deficitària, i efectivament no ho és pas. El camp gp'_{1000} contribueix a la restitució del geopotencial climatològic de primavera.

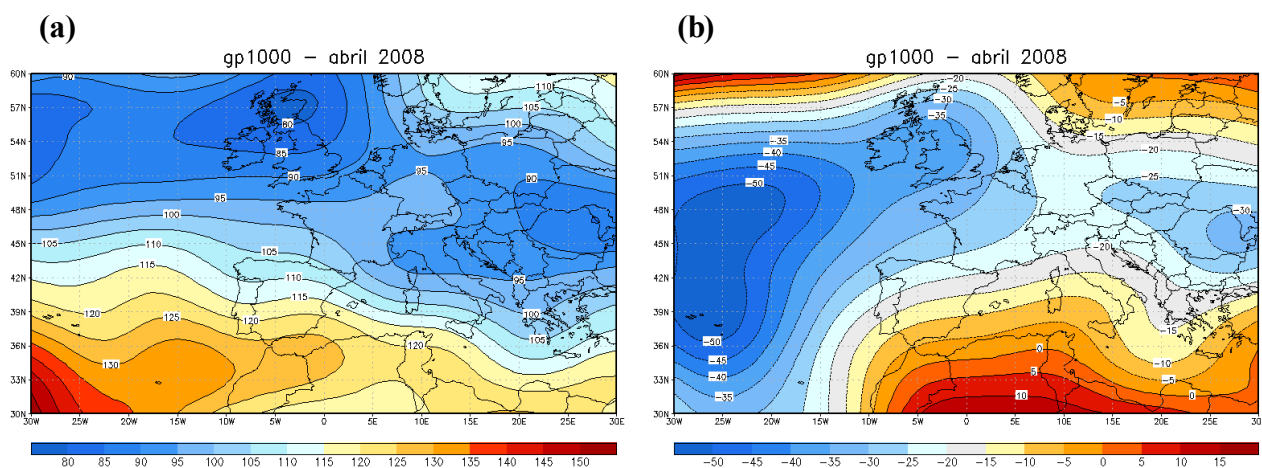


Figura 6.46: Geopotencial a 1000 hPa (a) i anomalia mensual (b) pel mes d'abril de 2008

7 Discussió i conclusions

A partir de l'estat de l'art s'ha constatat que la meteorologia de muntanya a Catalunya ha tingut poca dedicació en referència a d'altres zones on ha tingut molta més rellevància, com és als Alps. També es fa cada cop més palès que la meteorologia de muntanya juga un paper molt rellevant en la seguretat de les activitats a l'aire lliure. I més en l'actualitat quan el canvi climàtic sembla accentuar els riscos naturals, i també resulta important assolir una millora en la gestió de l'aigua. Tot plegat reforça la importància de dedicar més estudis i esforços a la meteorologia de muntanya. A partir de la recopilació d'articles que fan referència a la meteorologia de muntanya s'ha realitzat una proposta de classificació per aquesta disciplina. Els cinc blocs en els que es pot dividir són els següents. Estudis que versen sobre la climatologia particular de regions muntanyoses. Estudis que tracten de la influència dels grans sistemes muntanyosos o la orografia en general, sobre la circulació general i les variables meteorològiques en general a escala sinòptica o mesoscala. D'altra banda es troben els articles que tracten fenòmens atmosfèrics propis de regions d'alta muntanya. D'altres estudis se centren únicament en els riscos associats a la muntanya, ja siguin mixtos o directes. I el darrer bloc acull tots els articles referits a l'efecte del canvi climàtic en zones de muntanya.

L'objectiu del present treball és la caracterització per mitjà de patrons de gp_{1000} de les situacions de dèficit pluviomètric mensual al Pirineu català. Per això s'ha realitzat l'anàlisi EOF a nivell estacional de la desviació respecte la mitjana gp'_{1000} , i les bases vectorials EOFs que s'han obtingut s'han emprat per descomposar els camps de $\overline{gp}'_{1000}$ dels mesos anòmals secs, de manera que s'ha aconseguit expressar el camp de geopotencial responsable de les sequeres en funció dels patrons EOFs principals.

Els diversos passos que s'han seguit es poden dividir en tres blocs segons l'objecte de treball. Primerament s'han realitzat els càlculs pertinents amb els valors de pluja, seguit dels càlculs referents a l'anàlisi dels camps sinòptics, i en darrer terme s'ha realitzat l'estudi de les sequeres alimentant els càlculs amb alguns resultats dels blocs anteriors.

Per dur a terme l'estudi de la precipitació al Pirineu, s'ha confeccionat una base de dades mensuals composta dels pluviòmetres de tres xarxes diferents: AEMET, SAIH i XEMA, de cobertures espacials i temporals diferents, que en total abarca un període des del 1940 fins al 2008. Amb aquestes dades primerament s'han presentat els camps mitjans de precipitació a nivell anual i estacional, calculats a partir de les estacions interiors al domini del Pirineu definit per $longitud \in [0.51, 2.89]$ i $latitud \in [41.74, 42.88]$, i que serà la regió que s'estudia en tot el treball. Igualment per tal de conèixer els patrons de precipitació més freqüents que responen a la variabilitat del Pirineu, s'ha realitzat l'anàlisi EOF de les diferències de pluja respecte a la mitjana, pp' . A banda de fer una primera aproximació a la climatologia de la pluja al Pirineu català, és necessari determinar els mesos que han estat anòmals pluviomètricament parlant, amb més èmfasi pel que fa als dèficits. Així s'ha establert un criteri de detecció d'anomalies mensuals considerant que un mes presenta anomalia mensual quan més del 70% dels punts són anòmals, a la vegada que un punt és anòmal si el seu valor absolut estandarditzat és major que 0.7. La selecció resultant és utilitzada més endavant en la caracterització de sequeres, i també s'ha emprat per representar gràficament la pluja mitjana $\overline{pp}$ associada als mesos anòmals secs agrupats estacionalment, per tal de tenir una aproximació fiable al camp de precipitació típic dels mesos secs per a cada estació.

Pel que fa als camps sinòptics es tenen les dades diàries del NCEP de les 00 UTC de geopotencial, humitat relativa i temperatura a diversos nivells, pel període 1958-2006, en una malla de 325 punts

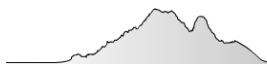
de 2.5° de resolució espacial dins la finestra de -30°W a 30°E per la longitud, i de 30°N a 60°N per la latitud. Un cop calculada la desviació mensual respecte la mitjana de cada punt, s'ha aplicat un anàlisi EOF per a cada un dels camps amb la mostra total. Posteriorment pel cas del camp de gp'_{1000} s'ha aplicat de nou l'anàlisi EOF però per les quatre submostres agregades estacionalment. Per finalitzar els càlculs en aquest bloc s'ha observat la variabilitat que expliquen les EOFs pels diversos casos.

Amb l'objectiu de caracteritzar i entendre algunes de les causes dels dèficits pluviomètrics mensuals al Pirineu català, s'ha ideat una metodologia consistent en dues estratègies diferents que permeten relacionar el camp de gp_{1000} d'Europa i el camp de precipitació al domini del Pirineu, per mitjà de l'anàlisi EOF. Ambdós mètodes permeten obtenir els diversos valors de la submostra de PCs, tant a nivell total com estacional, que corresponen en valor mitjà als mesos detectats com a secs. En la primera estratègia es selecciona la submostra de PCs dels mesos detectats com a secs, i se'n calcula la mitjana per a cada PC, tant pels anàlisis estacionals, com per la mostra total. L'estratègia 2, en canvi, proposa calcular el camp mitjà $\overline{gp}'_{1000}$, i aquest expressar-lo respecte la base vectorial EOF que li correspongui segons l'estació, obtenint les components en la nova base, les PCs. D'una forma o altra, el resultat final que s'obté és el mateix. Finalment a partir dels gràfics de les PCs de la submostra seca, es confecciona una taula amb les EOFs principals, aquelles que tenen les components més altes, de manera que aquestes EOFs són els patrons principals que expliquen les situacions de dèficit de pluja al domini.

A partir de les dades de pluja registrades a les estacions del domini d'estudi, s'ha realitzat l'estudi introductori a la climatologia del Pirineu català. S'ha obtingut que l'estació més seca és l'hivern mentre que la més plujosa és l'estiu, tot i que la tardor i la primavera presenten acumulacions mensuals molt importants. Cal destacar que un fet comú en totes les estacions és la presència de dos pics de precipitació, un d'ells ubicat a la zona del Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici, i l'altre ubicat a la comarca del Ripollès essent pel cas de l'estiu, el màxim pluviomètric de tot l'any. En la pluja acumulada anual també s'observen aquests dos pics ben diferenciats superant els 1000 mm anuals. En totes les èpoques de l'any també s'observen les valls dels rius Segre i Noguera Pallaresa amb un dèficit pluviomètric considerable, reforçat per l'efecte de les ombres pluviomètriques de l'orografia. S'ha representat el gràfic del coeficient de variació anual on s'observa que la variabilitat de la pluja és superior al Pirineu oriental que a l'occidental, on és mínima coincidint amb el pic d'Aigüestortes.

Respecte a l'anàlisi de les EOFs que expliquen el camp total de pp' , s'observa que la primera EOF que explica un 63% de la variància presenta els dos màxims típics, tot i que el del Ripollès apareix desplaçat a l'Alt Empordà. En total, amb les cinc primeres EOFs és possible explicar un 89% de la variabilitat, de manera que aquests patrons descriuen amb prou exactitud la distribució de la precipitació al Pirineu català.

A nivell sinòptic s'ha aplicat l'anàlisi EOF sobre les mostres totals de geopotencial, humitat relativa i temperatura a diversos nivells. En el cas del geopotencial s'ha obtingut patrons corresponents a diferents situacions i intensitats dels pols, i s'han manifestat també algunes correlacions entre les EOFs a diferents nivells, degut al fet que la circulació atmosfèrica és tridimensional i per tant en el seu moviment s'hi troben implicats tots els diferents estrats. Pel que fa a la humitat, les EOFs obtingudes expliquen variàncies molt més petites que pel geopotencial la qual cosa implica que aquest camp és força inhomogeni, i no presenta patrons clars que permetin explicar un gran nombre de casos. Tot i així s'han arribat a determinar les distribucions d'humitat més representatives a nivell mensual. I l'anàlisi EOF de la temperatura ha permès obtenir les EOFs a 850 i 1000 hPa, les quals



no es troben gaire relacionades, la qual cosa implica que sí que existeix una certa independència entre el comportament de la temperatura de l'aire a diferents nivells.

El camp gp'_{1000} s'analitza amb més detall a escala estacional i s'observen algunes variacions, més o menys importants en funció de la EOF de la que es tracti. Aquesta aplicació estacional és important degut al fet que la gènesi de les sequeres al Pirineu té a veure amb processos i situacions diferents segons l'època de l'any. Així doncs finalment es tenen cinc espais vectorials EOF corresponents a la mostra total i a les quatre submostres estacionals. Per la EOF1 al llarg de les estacions s'observa un desplaçament del pol positiu, comprès entre 10° de longitud i 5° de latitud, trobant-se en els extrems a l'hivern i a l'estiu i arribant als valors màxims a la primavera i tardor. Les EOFs 2 i 3 estacionals poden agrupar-se en dos únics patrons. Un d'ells correspon a un pol situat sobre les Açores que és negatiu en la EOF2 d'hivern i primavera, i positiu lleugerament desplaçat cap al nord-est en la EOF3 d'estiu i tardor. L'altre patró correspon a un pol d'extensió considerable sobre Europa central amb algunes variacions de localització en funció de l'estació. Aquest pol és negatiu en les EOF2 d'estiu i tardor, i és positiu en les EOF3 d'hivern i primavera. Donada la posició dels pols sobre les Açores i el continent s'ha conclòs que per a totes les estacions la EOF 2 i 3 en fase positiva amplifiquen les diferències de pressió creades per les altes i baixes tèrmiques, mentre que aquestes EOFs en la fase negativa tenen un efecte de compensació. Aquests dos patrons expliquen entre un 40 i un 45% de la variabilitat. La EOF 4 és semblant en totes les estacions i correspon a un pol situat en diferents indrets del Mediterrani. La EOF5 també localitza un pol però en aquest cas, sobre diferents regions de la costa atlàntica europea, trobant-se pel cas d'hivern en una regió força llunyana a la resta.

En l'anàlisi de la variabilitat, no s'ha registrat cap diferència rellevant entre les EOFs dels diversos camps que faci pensar en una preferència d'algun dels camps per vincular-lo amb la precipitació, de manera que s'ha escollit utilitzar el geopotencial de 1000 hPa pels càlculs posteriors.

Respecte a l'enllaç entre les EOFs estacionals i total del gp'_{1000} i la selecció de mesos anòmals secs, s'han obtingut els mateixos resultats tant per un mètode com per l'altre de manera que les dues estratègies plantejades són equivalents. És a dir, és equivalent calcular la mitjana d'una submostra seca de PCs mensuals obtingudes de l'anàlisi EOF, que calcular els valors dels camps $\overline{gp}_{1000}$ dels mesos secs tot aplicant un canvi de base cap al mateix espai vectorial EOF. S'ha constatat que les operacions que conformen les dues estratègies són les mateixes aplicades en ordre diferent, i com que compleixen la propietat commutativa el resultat final és idèntic. A més a més s'ha pogut concloure que és recomanable realitzar primer el canvi de base, ja que permet realitzar el càlcul de la mitjana i l'error en poques dimensions.

S'han seleccionat per a cada estació les tres EOFs que presenten una $\overline{PC}$ "seca" més alta, per la qual cosa són les més importants d'entre els mesos secs, i s'han obtingut amb ordres diferents d'importància depenent de l'estació: EOF1+, EOF2-, EOF4- i EOF3+. Amb la finalitat d'entendre els mesos amb dèficit de pluja s'ha representat per a cada estació, el camp de geopotencial mitjà ($\overline{gp}_{1000}$), l'anomalia mitjana associada als mesos secs ($\overline{gp}'_{1000}$), i la precipitació mitjana que es registra per aquests mateixos mesos ($\overline{pp}$). A banda de les particularitats climatològiques que s'observen en els gràfics de $\overline{gp}_{1000}$, s'han obtingut els camps $\overline{gp}'_{1000}$ de la submostra seca, que poden interpretar-se com els patrons d'anomalia de geopotencial a 1000 hPa que s'han de donar a cada estació perquè al Pirineu català hi hagi dèficit de pluja. En els quatre casos s'han obtingut situacions en les quals es té un increment de geopotencial important a diferents zones properes als Pirineus. A l'hivern és quan aquesta anomalia és més intensa, i es troba ubicada al nord-oest de la Península. A la primavera i la tardor es tenen anomalies positives bastant generalitzades al territori

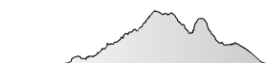
Europeu amb el seu centre al golf de Biscaia i a la Bretanya francesa respectivament, si bé no arriben a ser tan intenses com a l'hivern. A l'estiu les variacions respecte el camp mitjà són molt més petites tant en intensitat com en dimensions, i apareix un dipol amb valors baixos a l'Atlàntic nord i una alta a centre Europa. Els gràfics de la precipitació mitjana dels mesos anòmals permeten observar com a l'hivern es tenen els dèficits més importants i com per la resta d'estacions apareixen alguns pics de precipitació coincidint amb els pics climatològics.

La selecció de les EOFs amb $\overline{PC}$ “seques” més altes permet entendre els camps $\overline{gp}'_{1000}$ dels mesos secs descomposats en els tres patrons EOFs estacionals més importants. Així s'obté que les sequeres mensuals hivernals i de tardor es donen amb combinacions de EOF1+, EOF2- i EOF4-, si bé cal remarcar que les EOFs de cada estació són lleugerament diferents. A la primavera l'absència de pluja ve donada pels patrons: EOF1+, EOF2- i EOF3+. I a l'estiu es donen amb EOF2-, EOF4- i EOF1+.

En totes les estacions existeix una vinculació entre l'ocurrència de sequeres i el geopotencial a 1000 hPa, però no en totes les estacions de l'any té la mateixa importància. Si s'observa l'evolució al llarg de les estacions de les $\overline{PCs}$ es troba que en totes les EOFs existeix una oscil·lació, més àmplia o més lleu depenent de quina EOF es tracti, però totes elles en fase. A l'estiu la vinculació entre el dèficit de pluja i les EOFs és mínima, mentre que per l'hivern és màxima, i durant la tardor i la primavera les sequeres també es troben correlacionades amb les EOFs de geopotencial a 1000 hPa, si bé no tant com per l'hivern. La baixa correlació de l'estiu es justifica sabent que la precipitació en aquesta estació és deguda a processos que no pertanyen pròpiament a l'escala sinòptica, i per tant l'ocurrència d'anomalies no tindrà uns patrons de temps propis tan clars com per la resta d'estacions. Si s'observen els valors de variabilitat explicada de la mostra total per les EOFs que s'han vinculat amb les sequeres mensuals es pot saber fins a quin punt aquests patrons són freqüents en la mostra completa. Per l'hivern, primavera i tardor, les dues EOFs principals corresponen al 60-70 % de la variabilitat explicada, mentre que per l'estiu només corresponen al 30% de la variabilitat.

Es pot concloure que l'anàlisi EOF pot emprar-se per descomposar en diferents patrons de temps, els camps sinòptics coneguts representatius d'un conjunt d'episodis anòmals de precipitació. Així s'estableixen vinculacions entre el geopotencial mensual a 1000 hPa i les anomalies de precipitació associades a la regió del Pirineu català. Si bé la configuració dels camps de gp_{1000} responsables de les sequeres al Pirineu ja es coneixen, i es poden arribar a deduir en base a l'anàlisi objectiu dels camps sinòptics dels episodis anòmals, en el present treball s'han descomposat, per mitjà d'un mètode estadístic, en diversos patrons de temps que són propis de la circulació a 1000 hPa. En concret per la precipitació al Pirineu es pot dir que la relació més estreta entre les sequeres i les EOFs estacionals és deguda a la presència d'anomalies positives que alteren el camp de geopotencial de manera que els anticiclons es desplacen en regions impròpies a l'època de l'any. Depenent de l'estació les altes pressions se situen en diverses localitzacions i es presenten amb diverses intensitats, però en bona mesura totes elles són combinació lineal amb diferents coeficients de EOF1+, EOF2-, EOF4- i EOF3+. La detecció de fortes contribucions d'aquests quatre patrons en el camp mensual gp_{1000} pot utilitzar-se en el reanàlisi mensual d'episodis secs i en la predicció mensual o estacional de la precipitació, que són de vital importància per a l'estudi del recurs hídric i les reserves d'aigua.

Dels dos mesos que s'han escollit per analitzar breument, març i abril de 2008, cap d'ells correspon a un mes sec dels detectats segons els criteris establerts, ja que pertanyen a una tendència de recuperació de la pluviometria. Tot i així pel mes de març s'han apreciat algunes semblances qualitatives amb alguns dels patrons EOFs més rellevants.



8 Treball futur

En aquest treball tan sols s'han trobat possibles relacions entre un camp sinòptic, el geopotencial mensual a 1000 hPa, i la precipitació al Pirineu català, ni molt menys s'han identificat tots els factors que provoquen les sequeres al Pirineu. Com bé s'ha comentat els processos físics atmosfèrics que tenen lloc en l'àmbit de la muntanya són ben diversos i poden ser estudiats des de diverses àrees, de manera que és necessari un treball conjunt per avançar en la comprensió de la precipitació al Pirineu.

Les oscil·lacions que s'han descobert de les PCs seques al llarg de l'any, seria interessant calcular-les a nivell mensual per conèixer de forma més acurada el cicle anual. Això implicaria realitzar l'anàlisi EOF amb les mostres agregades a nivell mensual, i realitzar les posteriors estratègies 1 i 2 pels dotze mesos de l'any.

En el present treball tan sols s'ha aplicat la metodologia ideada sobre les submostres de mesos secs. Seria interessant aplicar la metodologia també a les submostres dels mesos plujosos per tal de veure quins patrons sinòptics donen lloc a mesos anormalment plujosos. D'altra banda també s'ha constatat que l'estació menys correlacionada amb el geopotencial a 1000 hPa és l'estiu, de manera que seria interessant realitzar un estudi més minuciós d'aquesta estació, per tal de descobrir-ne alguna de les possibles causes. A més s'afegeix l'agregant que aquesta estació és la més plujosa al Pirineu, de manera que es té una metodologia que és menys eficient en l'estació més rellevant pluviomètricament parlant, raó de més per indagar en aquesta direcció.

9 Agraïments

Expresso el meu agraïment a la meva tutora Ma. Carme Llasat, qui ha confiat en mi des del primer moment, i m'ha brindat la possibilitat de poder realitzar un treball que aglutina la meva formació amb la meva passió, la meteorologia i la muntanya, descobrint noves possibilitats i horitzons en aquesta temàtica. Agraïxo la dedicació per part del Vicent qui m'ha orientat en la meva petita recerca d'aquest treball, amb entusiasme i temps, facilitant-me entre d'altres coses, algunes dades de pluviometria i camps sinòptics, com també part de la bibliografia per a la confecció del treball. També vull donar les gràcies a l'Ana pels mapes en GIS que m'ha facilitat, i a l'Aitor per ajudar-me en temes de programació, i per fer molt entretinguts els dies al departament. I també vull fer constar el meu agraïment a la resta de grup GAMA, amb qui he compartit tot un any de feina.

Dono gràcies també als companys que he conegut durant el curs de màster, que han fet d'aquest any un aprenentatge divertit i amè. Com també el professorat del màster, que m'ha permès aprofundir en els meus coneixements de física de l'atmosfera, i els companys que he conegut al Departament d'Astronomia i Meteorologia (DAM) els quals sempre han estat disposats a ajudar-me en el que fes falta.

La motivació per la temàtica d'aquest treball ve clarament de la meva passió per la muntanya. Sens dubte he d'agrair a aquells que mantenen aquesta espurna encesa: els talladits. Amb ells imaginar cims impossibles ha deixat de ser un joc per ser una realitat, i m'han ajudat a arribar als llocs més alts.

I no puc cloure aquest treball sense dedicar un paràgraf a la família qui ha confiat en mi des de sempre, i m'ha encoratjat en tots els projectes que he emprès. Aquest treball és un pas més del meu itinerari com a estudiant que ha estat possible gràcies als meus pares. I en el Jordi sempre hi puc trobar un germà pel que faci falta. Vull agrair també a la Mireia que m'acompanya en tot el que faig, i que m'ha donat forces per tirar endavant aquest màster. I en darrer terme són ells els qui m'han ajudat a no perdre el nord, i a seguir descobrint que els aspectes realment importants no són els acadèmics.

10 Referències

- Alcoverro, J., J. Corominas i M. Gómez: The Barranco de Arás flood of 7 August 1996 (Biescas, Central Pyrenees, Spain). *Engineering Geology*, 51, 237–255. 1999.
- Álvarez, J., A. Potenciano de las Heras i J. Villaverde: Evolución histórica de sequías en España. *Revista de obras públicas*, 155 (3486), 53-68. 2008.
- Ahrens, C. D.: *Essentials of Meteorology, an invitation to the atmosphere*. Third edition. ISBN10: 0534372007. Brooks Cole. 2000.
- Ambrosetti, P., L. Mariani i P. Scioli: Climatology of north föhn in canton ticino and western lombardy. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, 2, 24-30. MeteoSvizzera. 2005.
- Beniston, M., H. F. Diaz i R. S. Bradley: Climatic change at high elevation sites: an overview. *Climatic Change*, 36, 233–251. Institute of Geography. University of Fribourg, Switzerland. 1997.
- Borgognone, M. G., J. Bussi i G. Hough: Principal component analysis in sensory analysis: covariance or correlation matrix? *Food Quality and Preference* 12, 323-326. Elsevier Science Ltd. 2001.
- Bornman, C., C. Botha i L. Nash: *Welwitschia mirabilis*: observations on movement of water and assimilates under föhn and fog conditions. *Madoqua*, Windhoek (Namíbia), 251, 25-31. 1973.
- Campins, J.: L'estudi de la tramuntana: de J. M. Jansà al PYREX. *Territoris*, 1, 111-122. 1998.
- CMT (Centre Meteorològic Territorial de l'AEMET): *Guia de muntanya*, 2004.
- Corominas, J., J. Moya, A. Ledesma, J. Rius, J.A. Gili i A. Lloret: Monitoring of the Vallcebre landslide, Eastern Pyrenees, Spain. *Proceed. Intern. Symp. on Slope Stability Engineering*, 1239-1244. 1999.
- Corripio J.G. , Y. Durand, G. Guyomarc'h i L. Mérindol: Modelling and monitoring snow redistribution by wind. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, 06409. Météo France, Centre d'Etudes de la Neige (CEN). 2003.
- Chamarro, A. L.: Aspectos psicológicos de los accidentes de montaña. II Jornada tècnica de neu i allaus del IGC. 2006. http://www.icc.es/web/gcontent/pdf/allaus/jortec/jortec2/7_EducDivulg_1_AChamarro.pdf
- Chiao S.: The dynamics of orographic precipitation: a mesoscale modeling perspective. Department of Marine, Earth, and Atmospheric Sciences. North Carolina State University. 2002.
- Darby, L. S. i G. S. Poulos: The Evolution of Lee-Wave–Rotor Activity in the Lee of Pike's Peak under the Influence of a Cold Frontal Passage: Implications for Aircraft Safety. *American Meteorological Society*, 134, 10, 2857-2876. 2006.
- Das, S., S.V. Singh, E.N. Rajagopal i R. Gall: Mesoscale Modeling for Mountain Weather Forecasting Over the Himalayas. National Centre for Medium Range Weather Forecasting (NCMRWF), New Delhi, India. A Workshop Report. 2002.
- Deline, P., S. Gruber, S. Jailliet, J. Noetzli i L. Ravanel: Permafrost and rock falls in high mountain: the Drus (Mont Blanc massif, France). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 02033.

2006.

Diaz, H. F., M. Grosjean i L. Graumlich: Climate variability and change in high elevation regions: past, present and future. *Climatic Change*, 59, 1-4. Kluwer Academic Publishers. 2003.

Doorschot, J.N., Raderschall, i M. Lehning: Measurements and one-dimensional model calculations of snow transport over a mountain ridge. *Annals of Glaciology*, 32, 153–158. 2001.

Durand Y., G. Guyomarc'h, L. Mérindol: Numerical experiments of wind transport over a mountainous instrumented site: I. Regional scale. *Annals of Glaciology*, Volume 32, Number 1, 187-194(8). 2001.

Dyrgerov, M. B. i M. F. Meier: Twentieth century climate change: Evidence from small glaciers. *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, 97, 4, 1406–1411. Institute of Arctic and Alpine Research and Department of Geological Sciences, University of Colorado, Boulder. 2000.

Esteban Vea, P.: La complexitat de la meteorologia de muntanya. II Jornada tècnica de neu i allaus del'IGC. 2006.

Esteban, P., J. Martín-Vide i M. Mases: Daily atmospheric circulation patterns over western Europe. A new approach using PCA and k-means clustering. *European Meteorological Society Annual Meeting Abstracts*, 200 (1). 2004

Esteban, P., P.D. Jones, J. Martín-Vide i M. Mases: Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees. *International journal of climatology*, 25, 319-329. 2005.

Fazzini, M., A.Giuffrida, G.Frustaci: Snowfall analysis over peninsular Italy in relationship to the different types of synoptic circulation: first results. *Dipartimento di Scienze della Terra, Ferrara University*. 2005.

Fletcher R. J.: "Föhn illness" and human biometeorology in the Chinook area of Canada. *Department of Geography. University of Lethbridge, Alberta, Canada*. 1987.

Frei, C. i C. Schär: A precipitation climatology of the alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal Climatology*, 18, 873–900. *Atmospheric Science, ETH Zürich, Switzerland*. 1998.

Frei, C. i E. Häller: Mesoscale Precipitation Analysis from MAP SOP Rain-Gauge Data. *Climate Research, ETH Zürich, Switzerland*. 2001.

Garvert, M. F., B. Smull i C. Mass: Multiscale Mountain Waves Influencing a Major Orographic Precipitation Event. *Journal of the atmospheric sciences*, 64, 711-737. 2007.

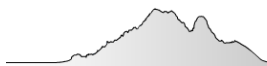
Gavaldà, J. i I. Moner: Predicció d'allaus en itineraris de muntanya a l'Aran. II Jornada tècnica de neu i allaus de l'IGC. *Departament Tècnic del Conselh Generau d'Aran*. 2006.

Gold, E.: The upper air during Föhn. *Nature*, Volum 91, 2271, (282). 1913.

Gómez, B.: El fogony (efecto föhn) en el valle pirenaico de Sort. *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, 52, 311-320. 2001.

Hack, K.H.: Situations météorologiques typiques dans la région des Alpes. *Office fédéral de météorologie et climatologie MétéoSuisse et Winterthur Assurances*. 2006.

Holub M. i J. Hübl: Local protection against mountain hazards – state of the art and future needs.



NHESS (Natural Hazards and Earth System Sciences), 8, 81–99. Institute of Mountain Risk Engineering. University of Natural Resources and Applied Life Sciences (Vienna, Austria). 2008. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/8/81/2008

Huth, R.: Continental-Scale Circulation in the UKHI GCM. *Journal of Climate*, 10, 1545–1561. Institute of Atmospheric Physics, Prague, Czech Republic. 1997.

Jaedicke, C.: Acoustic snowdrift measurements: experiences from the FlowCapt instrument. *Cold Regions Science and Technology*, 32, 71–81. 2001.

James, P.M.: An objective classification for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theoretical and applied Climatology*, 88, 17–42. 2007

Keller, D.W.: *Leading on Top of the World: Lessons from Into Thin Air*. The department of the air force. Texas A&M University. 2007.

Koffi, E., B. Bénech, J. Stein i B. Terliuc: Dynamic Characteristics of Regional Flows around the Pyrenees in View of the PYREX Experiment. Part II: Solution of a Linear Model Compared to Field Measurements. *Journal of applied meteorology*, 37, 53–71. Laboratoire d'Aérodologie, Université Paul Sabatier, Toulouse, France. 1998.

Kostopoulou, E. i P. D. Jones: Comprehensive analysis of the climate variability in the eastern Mediterranean. Part I: map-pattern classification. *International Journal of Climatology*, 27, 1189–1214. 2007.

Lampre Vitaller, F.: *Clima de alta montaña y sistemas morfoclimáticos fríos en el macizo de la Maladeta (Pirineo aragonés)*. Treballs de la Societat Catalana de Geografia, 52. 2001.

Lehning, M., J. Doorschot and P. Bartelt: A Snow Drift Index Based on snowpack Model Calculations. *Annals of Glaciology*, 31, 382–386. 2000a.

Lehning, M., J. Doorschot, N. Raderschall i P. Bartelt: Combining snow drift and snowpack models to estimate snow loading in avalanche slopes, in *Snow Engineering*. Hjorth-Hansen, Holand, Loset and Norem (eds), Balkema, 113–122. 2000b.

Lehning, M., F. Naaim, M. Naaim, B. Brabec, J. Doorschot, Y. Durand, G. Guyomarc'h, J.L. Michaux, and M. Zimmerli: Snowdrift: acoustic sensors for avalanche warning and research. *NHESS (Natural Hazards and Earth System Sciences)*, 2, 121–128. 2002.

Lilly, D.K.: Wave momentum flux – a GARP problem. *Bulletin American Meteorological Society*, 53, 17–23. 1972.

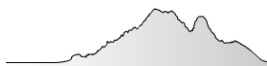
Lilly, D.K. i E.J. Zipser: The Front Range windstorm of 11 January 1972 – a meteorological narrative. *Weatherwise*, 25, 56–63. 1972.

Lilly, D.K. i P.J. Kennedy: Observations of a stationary mountain wave and its associated momentum flux and energy dissipation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 30, 1135–1152. 1973.

Lin, Y., S. Chiao, T. Wang, M. Kaplan i R. Weglarz: Some Common Ingredients for Heavy Orographic Rainfall. *American Meteorological Society*, volume 16, 633–660. 2001.

Llasat, C., M. Barriendos, A. Barrera i T. Rigo: Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of Hydrology* 313, 32–47. 2005.

Losada, T., B. Rodríguez-Fonseca i C. R. Mechoso: Impacts of SST anomalies on the North



Atlantic atmospheric circulation: a case study for the northern winter 1995/1996. *Climate Dynamics*, 29, 807–819. 2007.

Martí, G., C.G. Sellés i S. Manguan: Situacions crítiques per allaus de les temporades 2004-05 i 2005-06 al Pirineu de Catalunya. II Jornada tècnica de neu i allaus del'IGC. Servei Meteorològic de Catalunya. 2006.

Martín-Vide, J.: "El clima i el relleu". Secció del llibre *Geografia General dels Països Catalans*, I. Enciclopèdia catalana. 1992.

Martín-Vide, J. i J. Olcina: *Climas y tiempos de España*. ISBN: 84-206-5777-8. 2001.

Martínez Figueras, P. i P. Oller: Els accidents per allaus al Pirineu de Catalunya. I Jornada tècnica de neu i allaus del'IGC. Institut Cartogràfic de Catalunya. 2004.

Mases M., D. Font i J.M. Vilaplana: Relationship between snowdrift development and drifted snow during a wind episode. *International Glaciological Society*, 26. 1998.

Medina, S. i R. Houze jr.: Air motions and precipitation growth in alpine storms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Department of Atmospheric Sciences, University of Washington. 2002.

Michaux, J.L., F. Naaim-Bouvet i M. Naaim: The acoustic snowdrift sensor: interests, calibration and results. *Proceedings of International Snow Science Workshop, Big Sky, Montana*, 390-395. 2001.

Michaux, J.L., F. Naaim-Bouvet, M. Naaim, M. Lehning i G. Guyomarc'h: Effect of unsteady wind on drifting snow: first investigations. *NHESS*, 2, 129–136. CEMAGREF-ETNA. 2002.

Musso A. i C. Cassardo: *Climatologia del föhn*. Nimbus. 2004.

Naaim-Bouvet, F., M. Naaim i J.L. Michaux: Snow fences on slope at high wind speed: physical modeling in the CSTB cold wind tunnel. *NHESS*, 3/4, 137-145. Cemagref, Torrent and Avalanche Research Unit. 2002.

Olcina, J.: Tipología de sequías en España. *Ería*, 56, 201-227. Instituto universitario de geografía. Universidad de Alicante. 2001.

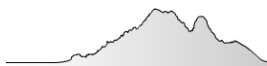
Oller, P.: Les allaus i la seguretat en muntanya. *Revista Horitzó (CRECIT)*, 3, 26-31. Institut Cartogràfic de Catalunya. Grup de nivologia i allaus. 2003.

ONERC: Changements climatiques dans les Alpes: Impacts et risques naturels. *Rapport Technique N°1 de l'ONERC*. ClimChAlp Interreg III B Alpine Space. 2008.

Pascual, R.: La situació meteorològica del 30 de desembre de 2000 al Pirineu Oriental: Entrada sobtada de vents forts. Publicació de l'ACAM. VII Jornades de Meteorologia, Eduard Fontserè. Centre Meteorològic Territorial a Catalunya. 2001.

Pascual, R.: Meteorología de montaña. *RAM (Revista del aficionado a la meteorología)*, 2. 2002.
Pascual, R.: El efecto Föhn en el Pirineo Catalán. Características generales y un caso de estudio. *AEMET - Centre Meteorològic Territorial a Catalunya. Boletín Informativo y Cultural de la Asociación Meteorológica Española (AME)*, 10, 20-24. 2005.

Pascual, R.: Vents Forts al Pirineu: torb i föhn. II Jornada tècnica de neu i allaus de l'IGC. INM - Centre meteorològic territorial a Catalunya. 2006a.



Pascual, R.: Aplicaciones meteorológicas para el montañismo: una perspectiva actual. AEMET - Centre Meteorològic Territorial a Catalunya. 2006b.

Pascual R. i A. Callado: Accidentes de montaña y vientos fuertes del norte en el Pirineo Mediterráneo. AEMET - Centre Meteorològic Territorial a Catalunya. 2007.

Redmond, K.T.: Climate in Three Dimensions: Integrated Mountain Climate Observations. CCSP Workshop Climate Science in Support of Decision Making. Western Regional Climate Center, Desert Research Institute. 2005.

Reinecke, P.A., i D. R. Durran: Estimating Topographic Blocking Using a Froude Number When the Static Stability Is Nonuniform. Journal of the Atmospheric Sciences, 65, 1035-1048. Department of Atmospheric Sciences, University of Washington, Seattle, Washington. 2008.

Reiter, E.R.: Where we are and where we are going in mountain meteorology. American Meteorological Society, 63, 10. Department of atmospheric science, Colorado State University. 1982.

Reiter, E.R. i L. Teixeira: Mesoscale Severe Weather Development Under Orographic Influences. Colorado State University. 1992.

Rodriguez-Puebla C., A. H. Encinas, S. Nieto i J. Garmendia: Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian peninsula. International Journal of climatology, 18, 299-316. 1998.

Rodríguez-Fonseca, B. i E. Serrano: Winter 10-Day Coupled Patterns between Geopotential Height and Iberian Peninsula, Rainfall Using the ECMWF Precipitation Reanalysis. Journal of Climate, 15, 1309-1321. 2002.

Rotunno, R. i R. Ferretti: Mechanisms of Intense Alpine Rainfall. Journal of the atmospheric sciences, 58, 1732-1749. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado. 2001.

Sacasas, J.: Meteorologia del Pirineu català. Publicacions de l'Abadia de Montserrat. ISBN: 84-8415-113-1. 1999.

Sacasas, J.: Meteorologia i muntanya. Publicacions de l'Abadia de Montserrat. ISBN: 84-8415-800-4. 2006.

Smith, R.B.: Mountain meteorology and regional climates. Coeditors: E. Fedorovich, R. Rotunno, Bjorn Stevens, D.K. Lilly. ISBN: 0521835887. Cambridge University Press. Department of Geology and Geophysics, Yale University, New Haven (USA). 2004.

Super, A.B.: The mountain snowpack as environmental indicator. Montana State University. 1971.

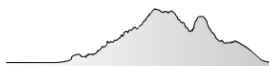
Thillet, J.J.: La météo de montagne. Éditions du Seuil. 1997.

UCAR-COMET: Anticipating hazardous weather and community risk. UCAR. Projecte MetEd. 2001a.

UCAR-COMET: Flow Interaction with Topography. UCAR. Projecte MetEd. 2001b.

UCAR-COMET: Mountain Waves and Downslope Winds. UCAR. Projecte MetEd. 2004.

Vilaplana J.M.: L'impacte dels riscos naturals en zones de muntanya. I Jornada tècnica de neu i allaus de l'IGC. 2004.



Von Storch, H. i F. W. Zwiers: Statistical Analysis in Climate Research. Cambridge University Press. ISBN 0-521-45071-3. 1999.

Wilks, D. S.: Statistical methods in the atmospheric sciences. Elsevier Academic Press Publications. ISBN 13: 978-0-12-751966-1. 2006.

Zängl G., B. Chimani i C. Häberli: Numerical simulations of the Foehn in the Rhine Valley on 24 October 1999 (MAP IOP 10). Meteorologisches Institut der Universität München, Munich, Germany. 2002.

11 Annexos

11.1 Mapes de l'Atles Climàtic de Catalunya del SMC

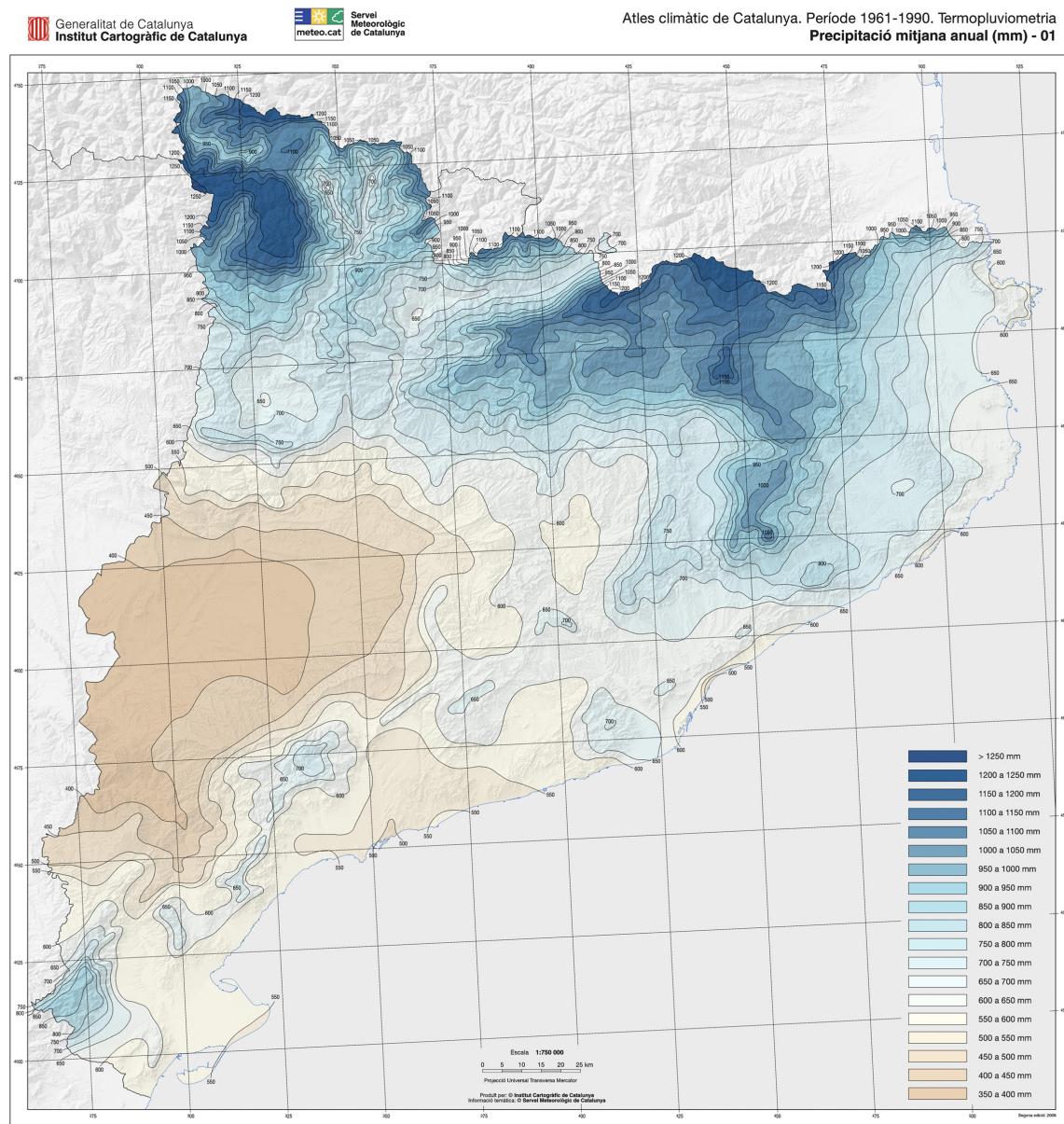


Figura 11.1: Precipitació mitjana anual a Catalunya pel període 1961-1990.

Font: Atles climàtic de Catalunya del SMC

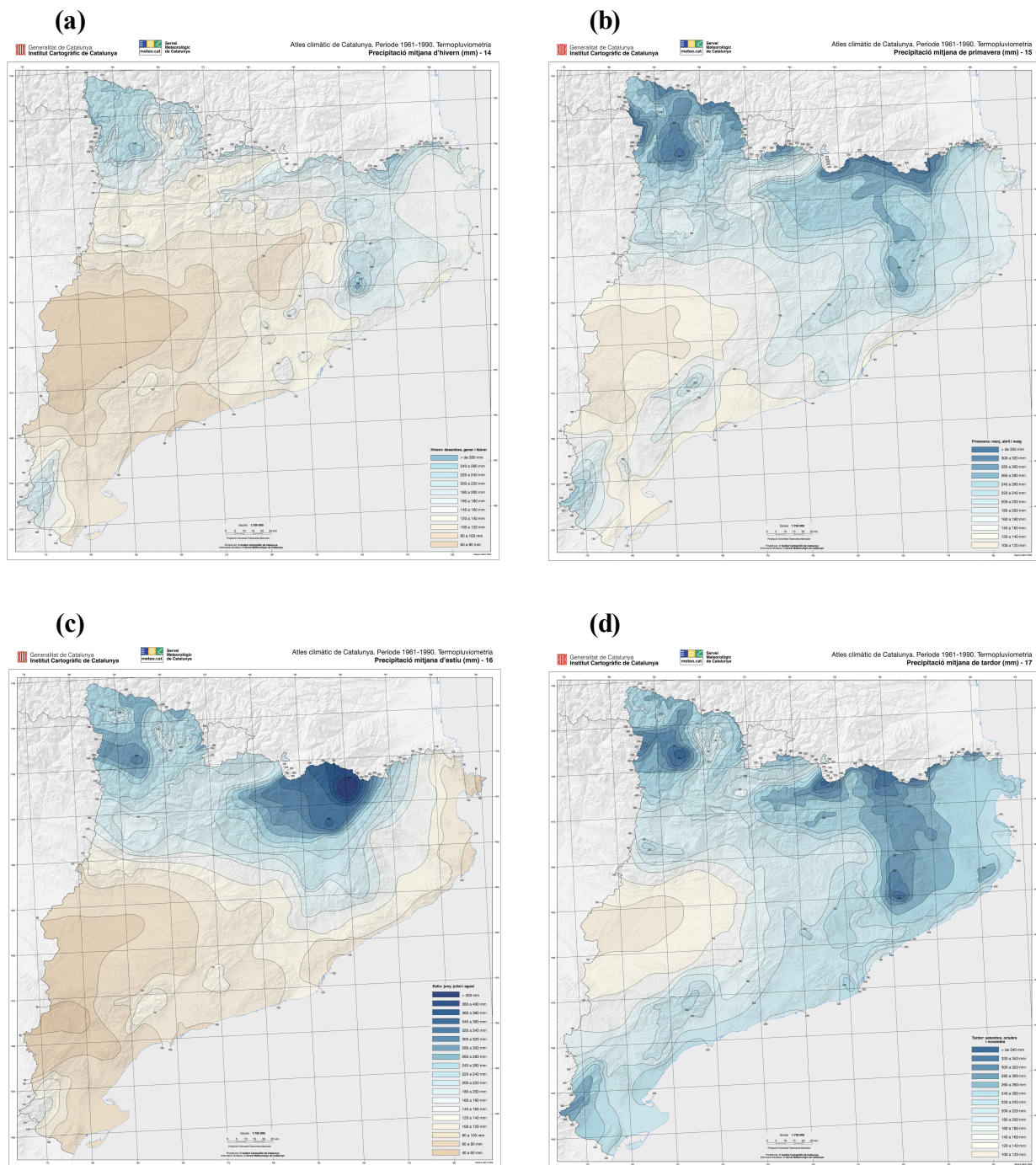


Figura 11.2: Mapes de precipitació mitjana d'hivern (a), de primavera (b), d'estiu (c) i de tardor (d).

Font: Atlas climàtic de Catalunya del SMC

11.2 Altres EOFs dels camps sinòptics

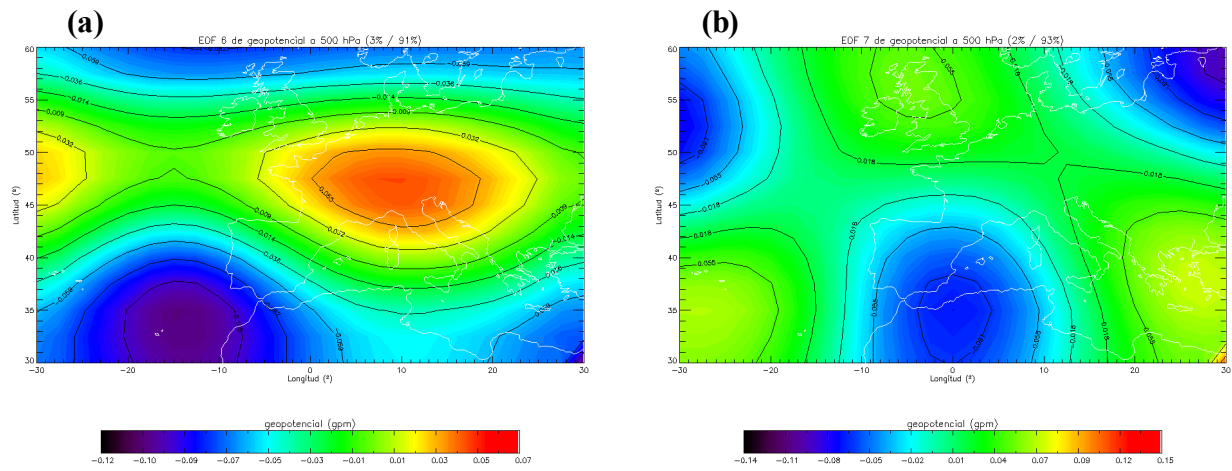


Figura 11.3: EOF 6 (a) i 7 (b) del geopotencial a 500 hPa

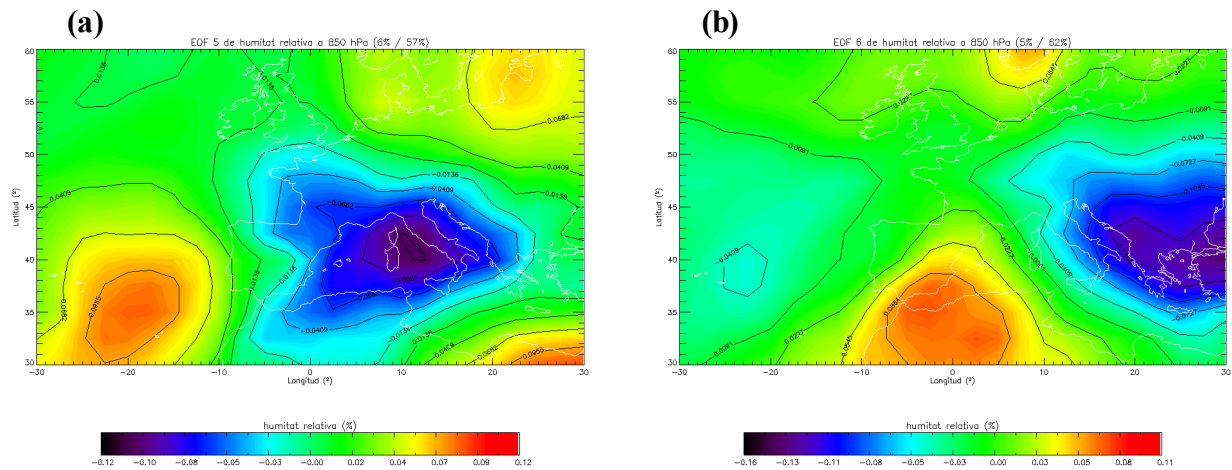


Figura 11.4: EOF 5 (a) i 6 (b) de la humitat relativa a 850 hPa

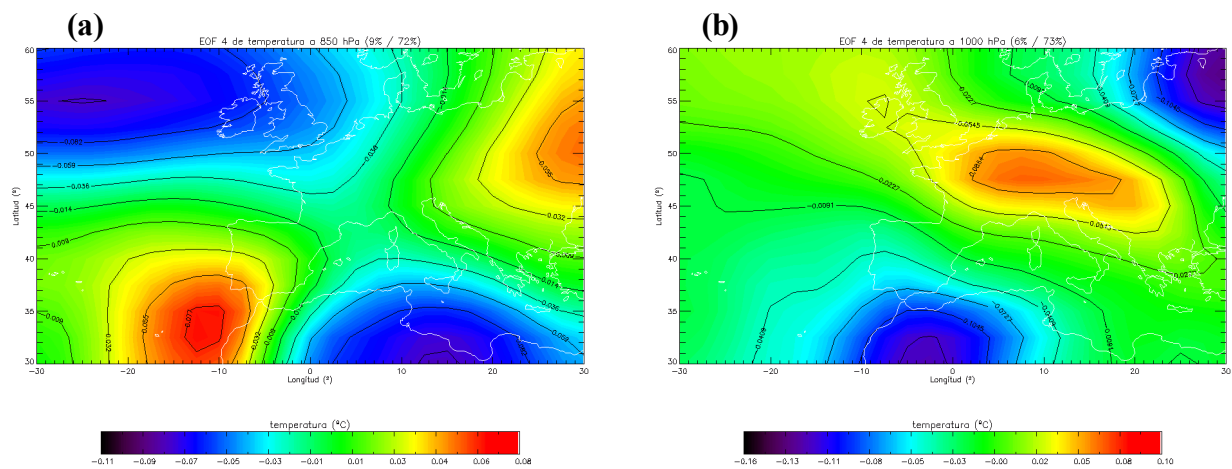


Figura 11.5: EOF 4 de la temperatura a 850 hPa (a) i a 1000 hPa (b)



11.3 PC màxima dels diversos camps sinòptics per a cada mes

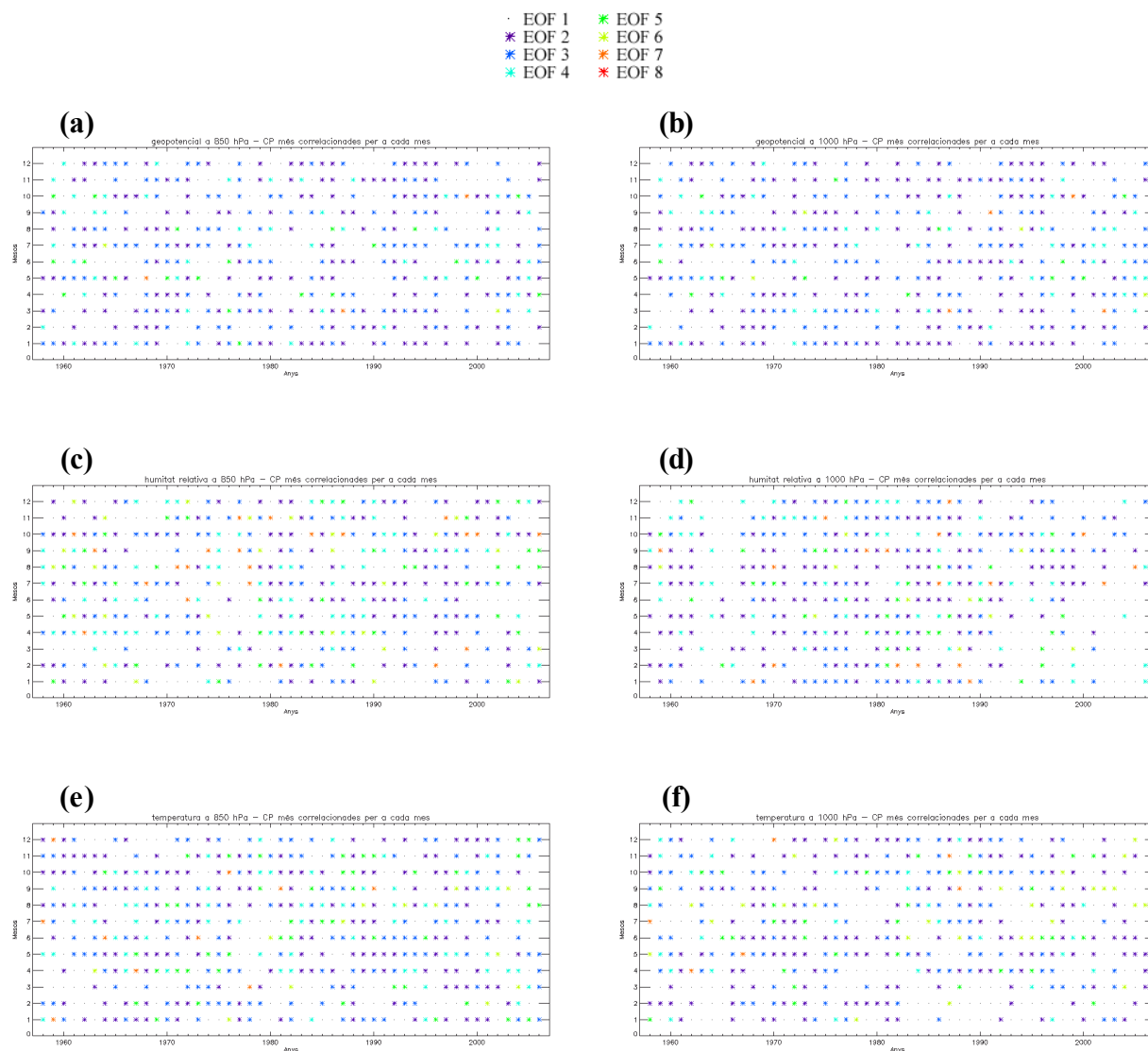


Figura 11.6: CP més important per a cada mes pel geopotencial a 850 hPa (a) i a 1000 hPa (b), per la humitat relativa a 850 (c) i a 1000 hPa (d) i per la temperatura a 850 (e) i a 1000 hPa (f).

11.4 Camps gp'_{1000} mitjans dels mesos amb PC elevada

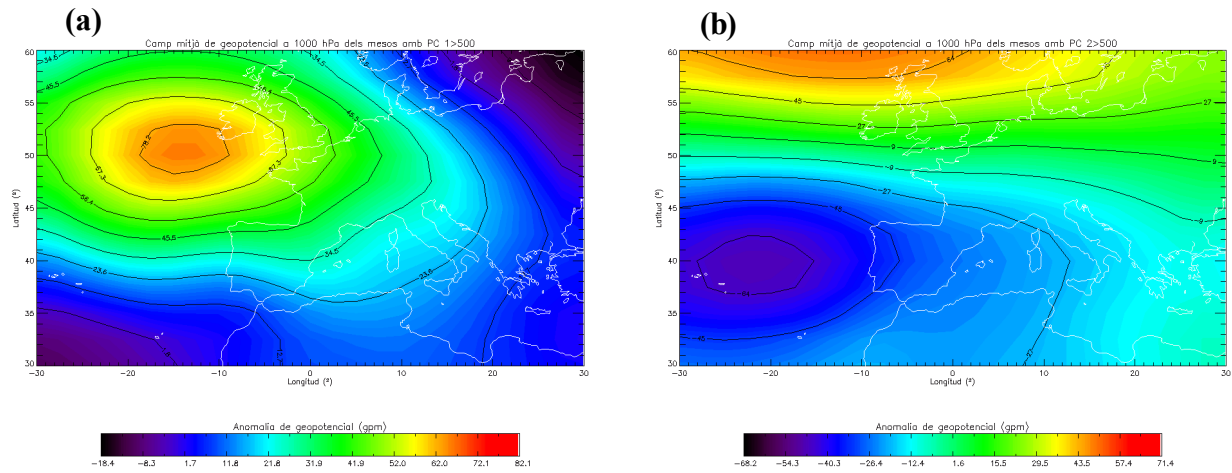


Figura 11.7: Anomalia de geopotencial a 1000 hPa mitjana dels mesos que presenten una PC1 (a) i una PC2 (b) elevades

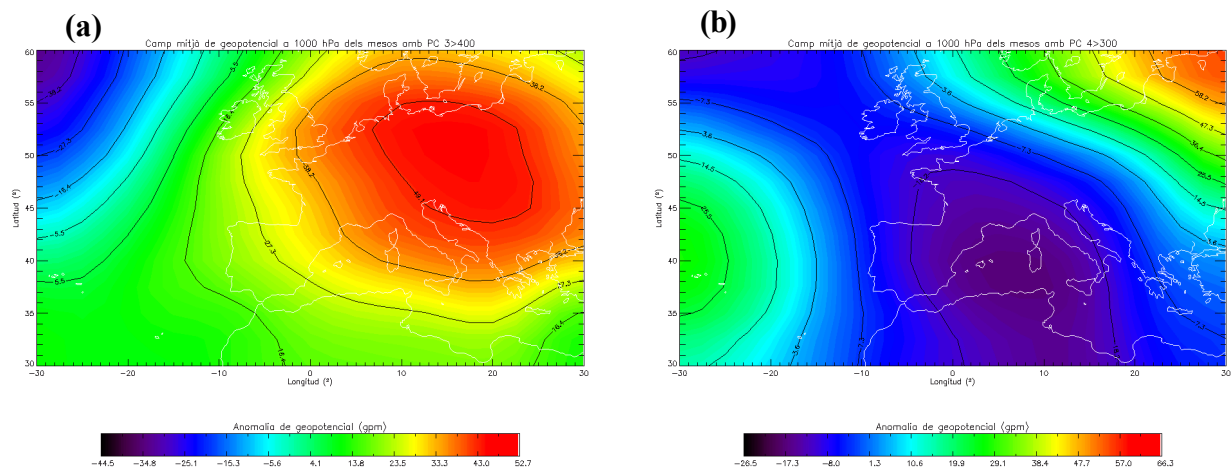


Figura 11.8: Anomalia de geopotencial a 1000 hPa mitjana dels mesos que presenten una PC3 (a) i una PC4 (b) elevades

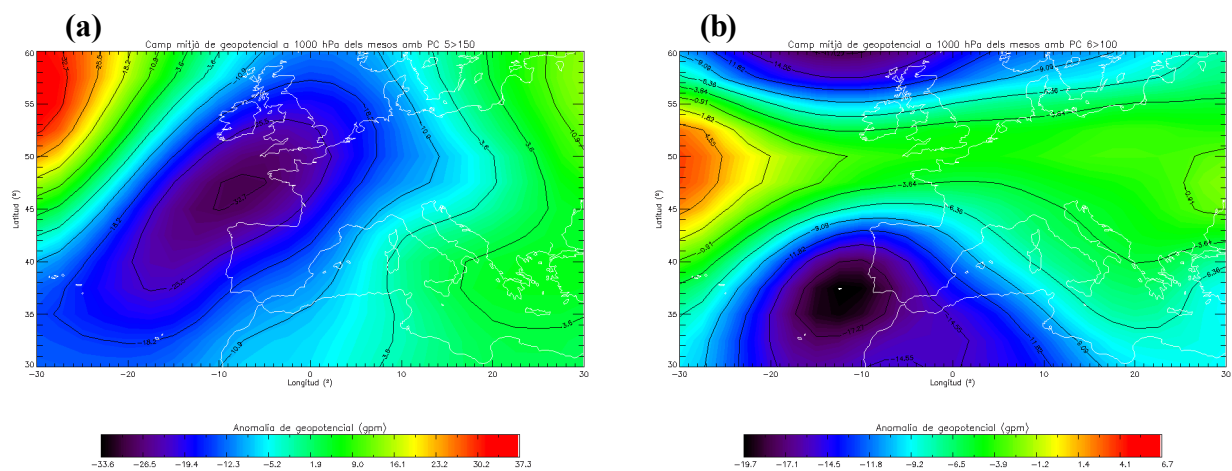


Figura 11.9: Anomalia de geopotencial a 1000 hPa mitjana dels mesos que presenten una PC5 (a) i una PC6 (b) elevades



11.5 Mesos anòmals segons diferents llindars areals i de valor tipificat

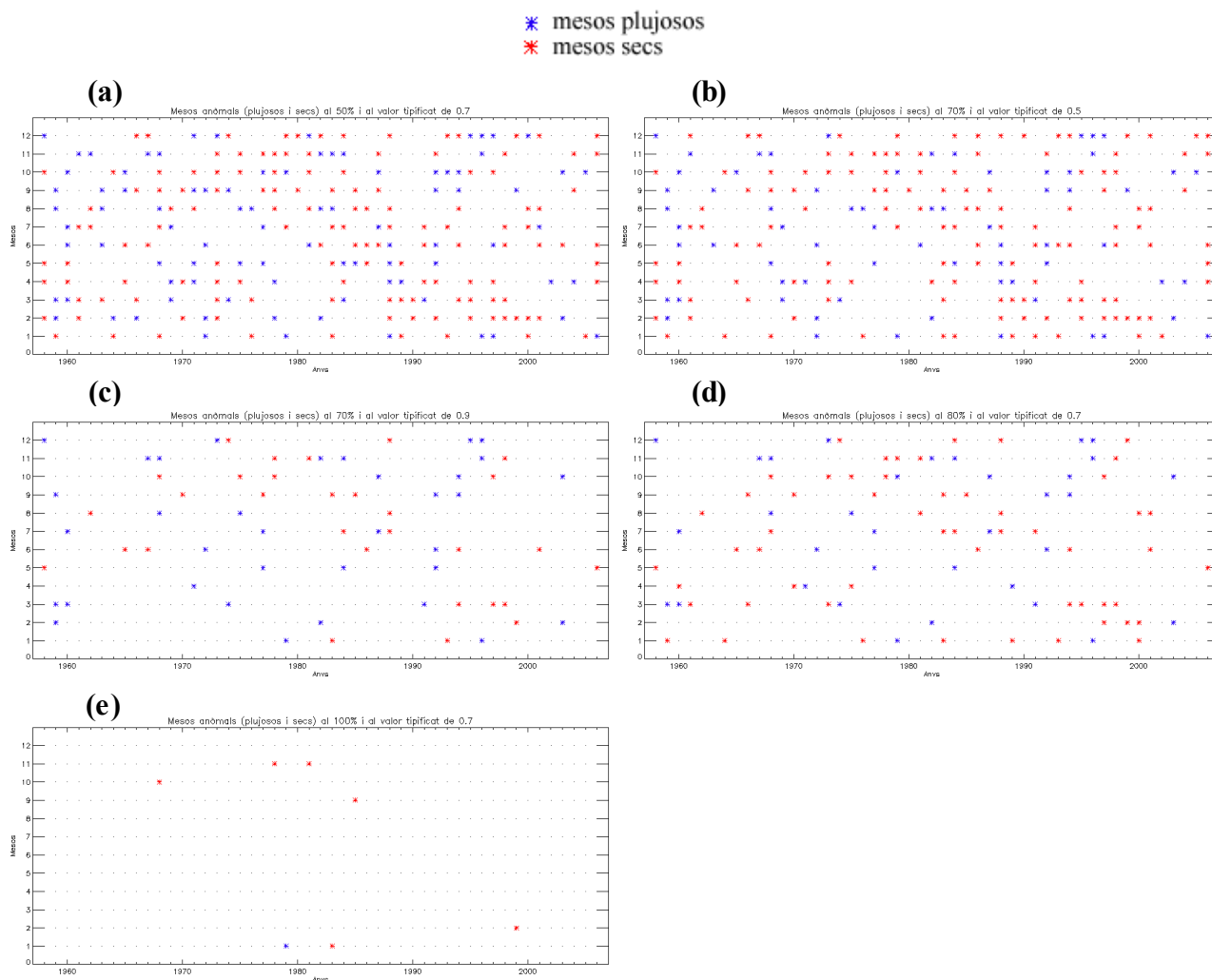


Figura 11.10: Detecció de mesos anòmals en el domini d'estudi segons diferents llindars areals i de valor tipificat: 50% i 0.7 (a), 70% i 0.5 (b), 70% i 0.9 (c), 80% i 0.7 (d), 100% i 0.7 (e)

11.6 Camps de $\overline{gP}_{1000}$ mensual per a les quatre estacions

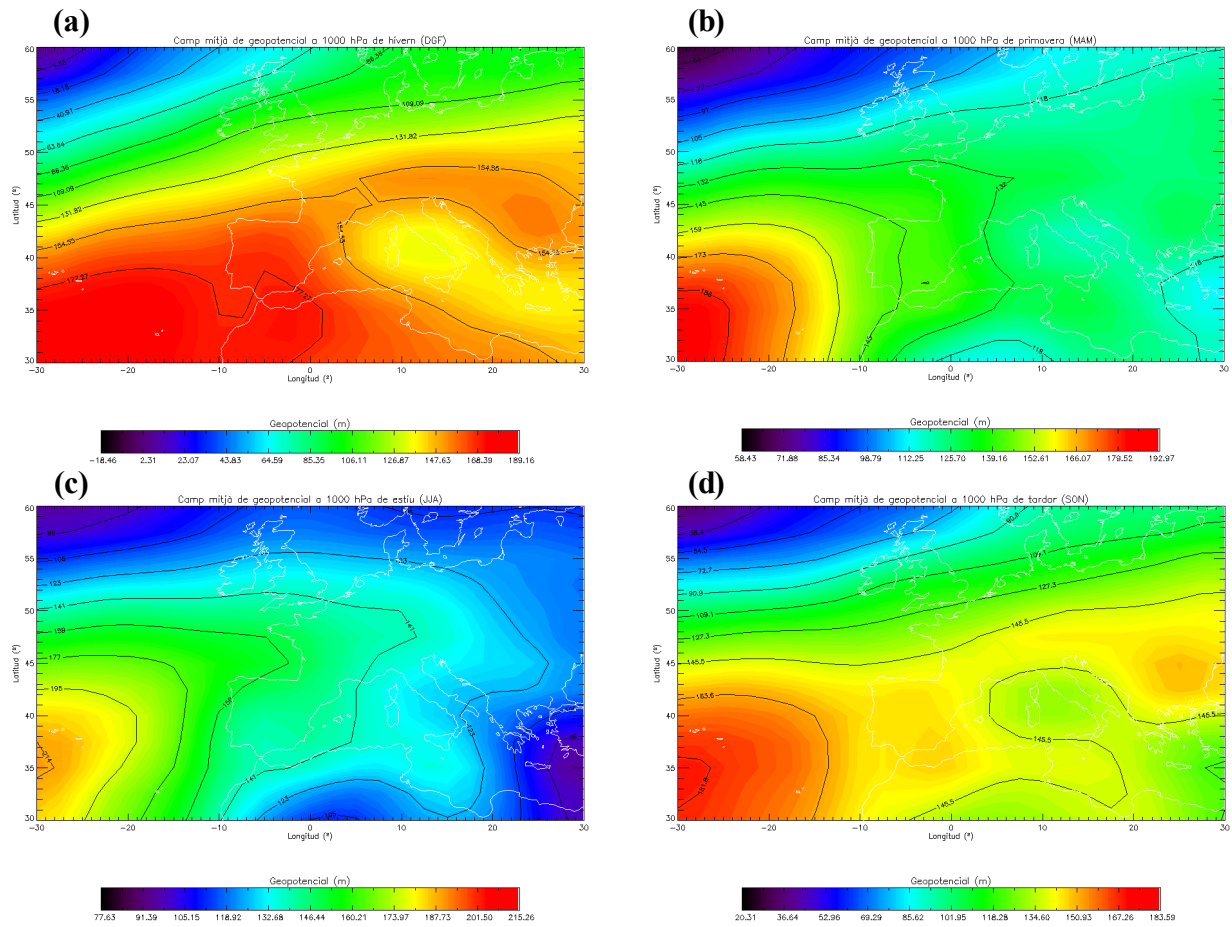


Figura 11.11: Mitjana de geopotencial a 1000 hPa, $\overline{gP}_{1000}$ per a les estacions d'hivern (a), primavera (b), estiu (c) i tardor (d).