



UNIVERSITAT DE BARCELONA

Departament de Geografia Física
i
Anàlisi Geogràfica Regional

***INCIDÈNCIA DE LES
GRANS ERUPCIONS VOLCÀNIQUES
EN EL CLIMA DE LA PENÍNSULA IBÈRICA
I BALEARS***

Memòria presentada per

Marc Jaume PROHOM DURAN

Per a optar al títol de doctor en Geografia

Desembre de 2003

CAPÍTOL 5 – EL FORÇAMENT DINÀMIC INDUÏT PEL VULCANISME

En els capítols anteriors, s'ha analitzat la incidència del vulcanisme de gran magnitud sobre la temperatura i la precipitació de la Península Ibèrica i de les Illes Balears. El principal efecte sobre la temperatura mitjana consisteix en un descens de la temperatura en els dos o tres anys posteriors al fenomen de l'erupció, fruit del bloqueig de la radiació solar d'ona curta per part dels aerosols volcànics. Malgrat tot, hi ha certs moments i determinades àrees del planeta en el període post-volcànic en els que el refredament desapareix i és substituït per un incipient escalfament. Els dos primers hiverns posteriors a una gran erupció d'origen tropical i les masses continentals de l'HN solen ser els períodes i els sectors, respectivament, més afectats (veure figura 3.2.). Paral·lelament, en el conjunt de l'àrea peninsular i balear s'ha pogut constatar una major freqüència d'anomalies negatives de precipitació en el període post-volcànic, essent precisament l'època hivernal la més afectada. En funció dels resultats doncs, no és gens estrany suposar la presència d'un forçament de tipus dinàmic induït per grans erupcions volcàniques i que generin les esmentades anomalies. En aquest apartat, s'analitzaran les possibles modificacions en els patrons de circulació atmosfèrica sobre el sector europeu durant el període posterior a aquests fenòmens.

5.1. ELS PRECEDENTS

Groisman [1985] fou un dels primers climatòlegs en suggerir la relació entre hiverns temperats sobre la Rússia central i grans erupcions volcàniques. En aquest estudi, seleccionà diferents observatoris europeus i del nord-est de Nord Amèrica i analitzà la resposta de la temperatura hivernal en nou anys afectats per vulcanisme (1815, 1822, 1831, 1835, 1872, 1883, 1902, 1912 i 1963), comprovant la presència d'un escalfament significatiu sobre el sector europeu de Rússia, i un refredament de poca entitat al nord-est de Nord Amèrica [*Robock*, 2000]. Posteriorment, el mateix autor va confirmar els mateixos resultats per a les erupcions de El Chichón i el Pinatubo, detectant en aquest cas però un escalfament també sobre el sector nord-oriental de Nord Amèrica [*Groisman*, 1992].

A partir d'aquest estudi, se n'iniciaren d'altres encaminats a confirmar aquestes troballes i a descobrir els mecanismes que expliquessin el patró de l'escalfament

hivernal. En aquest sentit fou la contribució de *Robock & Mao* [1992] els quals, extraient l'efecte del fenomen ENSO, identificaren el patró espacial de la temperatura superficial hivernal a l'HN després de dotze grans erupcions. Posteriorment, demostraren que eren les erupcions tropicals les principals responsables de l'esmentat patró [*Robock & Mao*, 1995]. Gairebé al mateix temps, varen aparèixer les primeres teories que explicaven les causes dinàmiques d'aquesta distribució espacial de la temperatura. Les aportacions de *Graf et al.* [1994] i *Kodera* [1994] indicaren que amb posterioritat a les grans erupcions tropicals del segle XX, el vèrtex polar estratosfèric s'havia intensificat clarament durant els mesos hivernals. Més concretament *Kodera* [1994] suggeria que aquest fenomen estrictament estratosfèric també es propagava a la troposfera provocant canvis en la circulació sobre les latituds mitjanes. El mecanisme doncs va ser finalment identificat: els aerosols volcànics escalfen la baixa estratosfera tropical com a conseqüència de l'augment de l'absorció de la radiació d'ona curta, modificant-se el gradient de temperatura Pol-Ecuador. Com a resultat, el vèrtex polar estratosfèric de l'HN s'intensifica i es genera un reforçament de la circulació de l'oest a la troposfera durant el primer i/o segon hivern post-volcànic [*Graf et al.*, 1993, 1994; *Kodera*, 1994]. Més recentment, d'altres estudis assenyalen que juntament amb el reforçament del vèrtex polar, s'ha pogut constatar una reducció en el gradient superficial de temperatura [*Stenchikov et al.*, 2002]. Aquest mecanisme s'expressa en forma de diagrama a la figura 5.1.

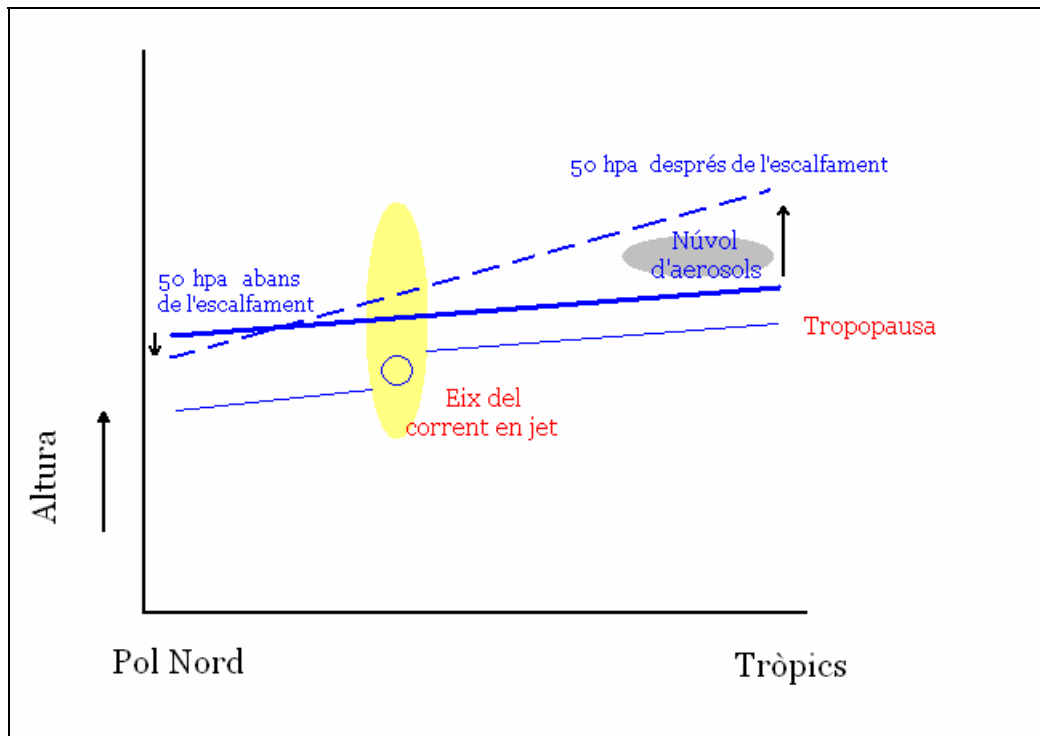


Figura 5.1. Diagrama esquemàtic de l'escalfament de la baixa estratosfera tropical produït pels aerosols volcànics. Els aerosols incrementen el gradient tèrmic entre l'Equador i el Pol, incrementant-se el gradient en altura i reforçant-se el corrent en jet (vèrtex polar). En reforçar-se el vèrtex, la circulació NAO s'amplifica produint l'escalfament hivernal.
 Font: elaboració pròpia a partir de *Robock* [2000].

La identificació d'aquest mecanisme fou confirmat i recolzat per posteriors aplicacions de models climàtics, malgrat les dificultats de la simulació d'un tipus de forçament tant específic [*Graf et al.*, 1996; *Kirchner et al.*, 1999; *Shindell et al.*, 2001], sobretot si aquest coincideix en el temps amb un destacat fenomen ENSO [*Kirchner & Graf*, 1995]. Així doncs, el patró de circulació establert durant l'hivern post-eruptiu sobre l'Atlàntic Nord seria molt similar al generat durant els anys amb un índex NAO (North Atlantic Oscillation) o índex AO (Arctic Oscillation) molt elevat, és a dir, quant tant la baixa d'Islàndia com l'anticicló de les Açores es reforcen de manera evident [*Barnston & Livezey*, 1987; *Hurrell*, 1995; *Slonosky et al.*, 2000; *Thompson & Wallace*, 1998].

L'objectiu d'aquest apartat de la investigació serà comprovar si, efectivament, la circulació sobre el sector de l'Atlàntic Nord i Europa es veu modificada durant els hiverns post-eruptius dels segles XIX i XX, però també s'avaluarà si es donen modificacions en els patrons de circulació en d'altres èpoques de l'any. Al mateix temps, s'esbrinarà si aquests possibles canvis expliquen les anomalies detectades sobre la temperatura i la precipitació.

5.2. FONTS DE DADES I METODOLOGIA

5.2.1. La base de dades

La naturalesa puntual del forçament volcànic fa recomanable la selecció, quan això és possible, d'aquelles bases de dades amb una cobertura temporal més àmplia. El projecte de subvenció europea ADVICE (*Annual-to-Decadal Variability In Climate in Europe*), va permetre la recuperació, digitalització i homogeneïtzació de 51 sèries mensuals de pressió atmosfèrica en superfície repartides per tot Europa i que s'iniciaven cap a finals del segle XVIII [Jones *et al.*, 1999b]. A partir d'aquestes observacions es generà una base de dades mensual de pressió atmosfèrica en superfície, en format de punts de graella (grid-points) de 5° de latitud per 10° de longitud, abastant la regió compresa entre 70°N-20°W i 35°N-40°E i cobrint el període 1780-1995. Les reconstruccions foren en general d'excel·lent qualitat, tot i que en aquelles regions amb una escassa cobertura d'estacions en els primer anys, es detectà una reducció en la qualitat de les dades, sobretot en els mesos d'estiu [Jones *et al.*, 1999b]. Aquesta font de dades suposà una nova eina per a l'estudi de la variabilitat climàtica sobre el continent. La figura 5.2. mostra la distribució dels punts de graella i l'àrea coberta.

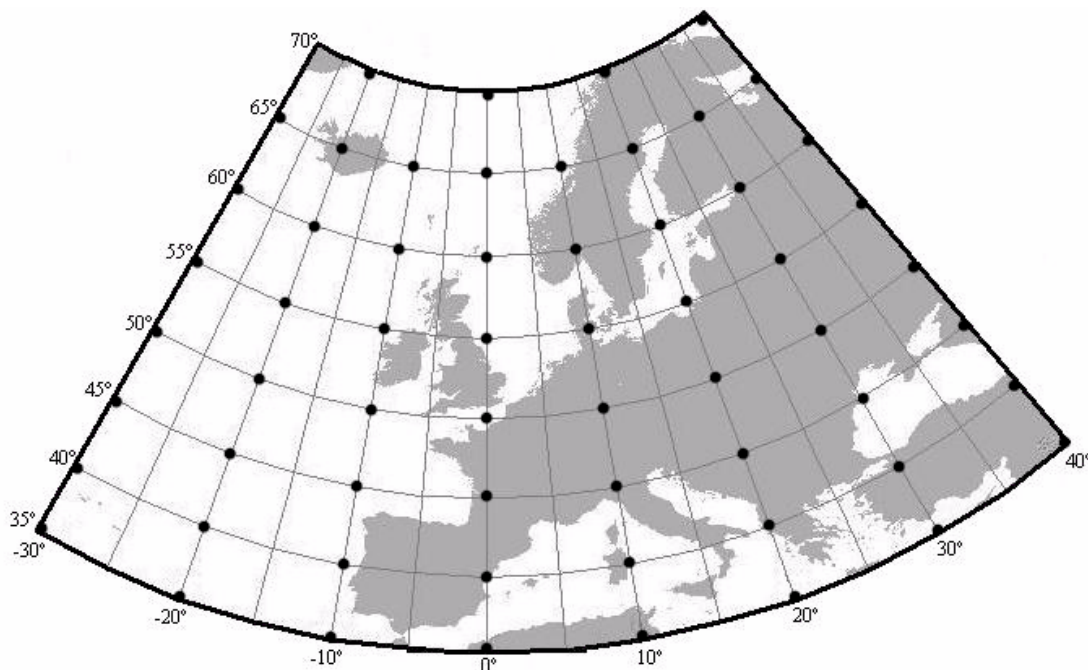


Figura 5.2. Distribució espacial dels punts de graella amb dades mensuals de pressió atmosfèrica utilitzada en l'anàlisi.

5.2.2. Selecció de les erupcions volcàniques

En el capítol segon d'aquest treball de recerca, s'ha demostrat que la quantitat de gasos rics en sofre injectats a l'estratosfera és el condicionant principal per a que una erupció tingui significació climàtica, per damunt d'altres paràmetres com ara la magnitud [Rampino & Self, 1984; Pinto *et al.*, 1989]. Igualment, les erupcions capaces de provocar modificacions de naturalesa dinàmica són, inicialment, les que es localitzen a la franja equatorial [Robock & Mao, 1995]. Basant-se doncs en aquests dos criteris, en la informació proporcionada pels diferents índexs i registres de vulcanisme històric i en la cobertura temporal de la base de dades, s'han seleccionat les onze erupcions volcàniques tropicals que es mostren a la taula 5.1.

	Lat.	Long.	Data (mes, any)	VEI	DVI	IVI*
Erupcions						
Desconeguda (tropical)	?	?	3-6, 1808	6	1500	5.9
Tambora, Indonèsia	-8.3°	118.0°E	4, 1815	7	3000	15.0
Galunggung, Indonèsia	-7.3°	108.1°E	10, 1822	5	500	0.2
Babuyon Claro, Filipines	19.5°	121.9°E	?, 1831	4-5	300	1.5
Cosigüina, Nicaragua	12.6°	87.3°W	1, 1835	5	4000	3.2
Makyan, Indonèsia	0.5°	127.4°E	?, 1861	4-5	800	0.4
Krakatau, Indonèsia	-6.1°	105.4°E	8, 1883	6	1000	3.1
Santa Maria, Guatemala	14.8°	91.5°W	10, 1902	6	600	1.0
Agung, Indonèsia	-8.3°	115.5°E	3, 1963	4	800	2.2
El Chichón, Mèxic	17.4°	93.2°W	4, 1982	5	800	1.7
Pinatubo, Filipines	15.1°	120.3°E	6, 1991	6	1000	4.0

Taula 5.1. Erupcions volcàniques incloses en l'anàlisi EOF, indicant la localització, la data i la magnitud basada en tres criteris: VEI, DVI i IVI.

* IVI global expressat com a desviacions estàndard [Robock & Free, 1995].

5.2.3. Metodologia

Un cop seleccionades les dates clau, el següent pas és l'aplicació d'un anàlisi de Funcions Ortogonals Empíriques o també anomenat de Components Principals, i que a partir d'ara recollirem sota l'acrònim anglosaxó EOF⁸. L'anàlisi EOF és una reconeguda tècnica multivariant utilitzada per a la derivació dels patrons dominants de variabilitat [Yarnal, 1993]. Aquest anàlisi converteix la base de dades original composta per un conjunt d' N observacions en M variables interconnectades, amb l'objectiu de simplificar i facilitar la seva comprensió i interpretació [Barry &

⁸ Hi ha certa polèmica sobre quin és el qualificatiu més adequat, anàlisi EOF o PCA. En aquest estudi s'ha optat pel criteri proposat per von Storch & Zwiers [1999] els quals postulen que anàlisi EOF és l'assignació més correcta per als estudis en ciències de la terra.

Carleton, 2001]. En climatologia ha estat una eina àmpliament utilitzada, especialment per a identificar els principals patrons espacials de variabilitat de la temperatura i de la precipitació [*Kelly et al.*, 1982; *Folland et al.*, 1991; *Slonosky et al.*, 2001], i també per a la identificació del senyal volcànic en els registres de temperatura global [*Jia & Kelly*, 1996].

En aquest estudi s'emprarà l'anàlisi EOF i més concretament la variances representada per cadascuna de les noves variables o components de l'anàlisi EOF (també anomenats *eigenvalues*) com a criteri per tal de detectar canvis en la persistència dels patrons de circulació després de grans erupcions volcàniques tropicals. Un anàlisi similar, però, amb una mostra d'erupcions inferior (vuit casos) fou dut a terme per *Prohom et al.* [2003]. En aquest estudi, els autors detectaren quatre mesos dins del primer any post-eruptiu amb elevats valors de variances de les components líder. En l'estudi que tot seguit s'exposa però, s'ha considerat una mostra més ampla (11 casos) i s'ha ampliat l'estudi fins al tercer any post-eruptiu.

La tècnica a aplicar implica un seguit de passes:

- (1) Càlcul dels EOFs no rotats utilitzant una matriu tipus-S (*S-mode*) de dades de 60 variables (els punts de graella amb dades de pressió atmosfèrica superficial) i 11 observacions (els onze anys post-volcànics identificats), a resolució mensual i mitjançant la correlació de les variables estandarditzades.
- (2) Un cop realitzat el càlcul, retenir la quantitat de variabilitat representada per la primera, segona i tercera components (o EOF1, EOF2 i EOF3).
- (3) Seleccionar a l'atzar 100 conjunts d'onze anys cadascun d'ells a partir de tota la base de dades (1780-1995), de nou a resolució mensual.
- (4) Obtenir els EOF no rotats de tots aquests 100 conjunts (mitjançant la matriu tipus-S i correlacions), retenint novament el percentatge de variabilitat representada per les primeres, segones i terceres components. Com que el càlcul es realitzarà en base mensual, finalment es repetirà l'anàlisi EOF 1200 vegades.
- (5) Càlcul de la mitjana i dels llimars dels percentils 10, 75 i 90 de les tres components retingudes i que s'obté a partir del conjunt de les 100 components.

Tots aquests càlculs foren realitzats mitjançant el paquet estadístic SPSS 10.0.

En el punt tercer es seleccionen cent conjunts d'onze anys cadascun d'ells. Això respon al fet que escollint conjunts d'un nombre d'anys igual al nombre d'anys post-

eruptius (o observacions), es fa possible la comparació final dels resultats. Per contra, si s'obtinguessin els components a partir de la totalitat de la base de dades, el tant per cent de variabilitat tindria molta més mostra per a repartir-se, fent inútil la comparació.

El motiu per a utilitzar el percentatge de variabilitat com a criteri d'anàlisi respon a la següent teoria. Si el percentatge de la primera component (EOF1) és extraordinàriament elevada en comparació amb el valor mitjà, això indicarà que el patró per a un determinat mes és més persistent, és a dir, que el primer EOF recull o representa un nombre de casos més elevat, fent possible detectar aquells mesos amb una persistència anòmalament elevada d'un determinat patró. Per contra, si en un determinat mes la component líder perd pes (o representativitat) en favor de la resta de modes, assenyalarà una més gran diversitat de patrons, fent difícil detectar un patró clarament predominant. En el nostre estudi es farà especial atenció a identificar aquells mesos que mostren un patró més persistent, és a dir, que superen un determinat llindar (el del 4t quartil i/o del 9è decil).

Com s'ha comprovat, s'ha utilitzat el percentatge de variabilitat dels EOF no rotats (o variança original) com a criteri per a determinar "l'excepcionalitat" d'un determinat mes post-volcànic, però indistintament també es podrien haver seleccionat els percentatges de les components rotades. En aquest cas la selecció d'un o altre mètode resulta arbitrari, però no ho serà a l'hora de la representació física dels resultats, com tot seguit s'explica.

Un cop identificats aquells mesos post-volcànics anòmals, el següent pas implica el càlcul de les components rotades segons el criteri VARIMAX, per així obtenir un patró espacial més coherent [Richman, 1986]. Respecte al tema de la rotació, la comunitat científica té una opinió dividida. Mentre alguns autors argumenten que la rotació genera uns patrons més estables i compactes per a la posterior regionalització, d'altres en critiquen alguns aspectes polèmics, com la selecció sovint arbitrària del criteri de rotació o la sensibilitat dels resultats a la normalització [Von Storch & Zwiers, 1999, pàg. 307]. Deixant de banda la qüestió de la rotació o no rotació, cal ser prudent i assumir els problemes en la interpretació dels patrons derivats de l'anàlisi EOF, i que sorgeixen del fet que aquest anàlisi no és res més que un mètode estadístic al qual estem forçant una sortida física, i que no necessàriament ha de coincidir amb els modes físics reals [Dommenget & Latif, 2002].

Essent conscients de les limitacions del mètode, també s'ha de dir que és relativament fàcil associar el primer EOF amb un procés físic conegut essent més difícil amb el segon (o un altre d'ordre superior) ja que aquest està forçat a ser ortogonal al primer [Von Storch & Zwiers, 1999, pàg. 296]. Així doncs, en el cas que ens ocupa i en treballar només amb el primer mode de variabilitat, com a mínim la qüestió de la rotació passa a un segon terme. Malgrat tot, en el treball que ens ocupa, es va considerar oportú calcular per separat les components no rotades i les rotades amb criteri VARIMAX de la matriu de correlació i es representaren físicament. Tot i que les primeres components rotades generalment no simplificaven els patrons espacials obtinguts, es varen utilitzar aquestes per a la interpretació física final dels resultats.

5.3. RESULTATS

5.3.1. Anàlisi de la variança explicada durant el període post-volcànic

S'aplicà la metodologia als mesos, dins dels tres anys posteriors a les onze erupcions considerades, iniciant-se l'anàlisi en el mes de novembre de l'any de les erupcions o novembre (0). El motiu d'iniciar l'anàlisi en aquest mes respon al fet que la major part de les erupcions considerades es localitzen entre gener i agost. A les taules 5.2., 5.3. i 5.4. es mostren els resultats de l'aplicació de l'anàlisi EOF corresponents a la primera, segona i tercera components, respectivament. Abans d'iniciar l'anàlisi dels resultats, és interessant realitzar un cop d'ull als valors de la variabilitat mitjana mensual dels EOF1, doncs donen una informació força interessant sobre la dinàmica de la circulació atmosfèrica a les latituds mitjanes. En aquest sentit es comprova com són els mesos hivernals els que presenten valors més alts (superiors al 40%), mentre que en la resta d'estacions de l'any el primer EOF té un pes inferior (veure taula 5.2., tercera columna). Això té una explicació climàtica evident, i que recolza la idea del percentatge de variabilitat com a criteri de persistència, ja que és en els mesos d'hivern quan la circulació en superfície en aquesta franja latitudinal és més estable i està més ben establerta. Per contra, i posant a l'estiu com a exemple la configuració de les isòbares és molt menys definida i un patró "principal" és menys identificable.

El primer any post-eruptiu es caracteritza globalment per un major pes de les primeres components. Així, apareixen tres mesos amb uns nivells de variabilitat que

superen el llindar fixat pel 9è decil; gener (+1), març (+1) i juny (+1), i quatre més que si bé no superen aquest llindar, mostren uns nivells clarament superiors a la mitjana, superant el 4t quartil (taula 5.2.): novembre (0), desembre (0), febrer (+1) i octubre (+1). De tots ells, el mes de gener (+1) és especialment anòmal doncs no només supera el llindar del 9è decil sinó també el del 99è percentil, és a dir, un valor del tot inusual. De fet, per a aquest mes l'EOF1 i l'EOF2 sumen un 88.8% del total de la variança, mentre que el percentatge de l'EOF3 cau fins a un valor crític del 8.4% (taula 5.4). És evident doncs que el primer gener post-volcànic mostra uns canvis destacats en la distribució de la freqüència dels patrons de circulació.

En els mesos primaverals corresponents al primer any post-eruptiu hi ha una tendència cap a una més gran variabilitat que es desprèn de la distribució més equitativa de la variança entre els tres principals modes de variabilitat (amb l'única excepció del març, +1). Així, és possible trobar percentatges de variabilitat elevats en l'EOF3, superant-se el llindar del 9è decil en un dels mesos (abril, +1). Un fenomen similar a l'anterior té lloc a l'estiu, amb una clara dissidència al mes de juny (+1) quan l'EOF1 pren protagonisme i supera el llindar del 9è decil de manera evident, fent que el tercer mode de variabilitat perdi pes. En canvi els mesos de juliol (+1) i agost (+1) presenten elevats valors en aquesta tercera component, el que indicaria una major diversitat en la presència dels diferents patrons.

El conjunt de mesos de tardor no segueixen una pauta comuna. Si bé octubre (+1) presenta un major pes de la primera component, en detriment de la segona, en el mes de novembre (+1) succeeix un efecte contrari, és a dir, l'EOF1 perd pes i en guanya l'EOF3 fent que el percentatge de variabilitat es reparteixi força equitativament entre les tres primeres components. Al setembre (+1) no es detecta cap variació important en la distribució dels percentatges.

Els mesos hivernals del segon any post-volcànic mostren un comportament força diferenciat envers al període hivernal anterior. En aquest cas els EOF1 perden pes en favor de les segones i terceres components, tendint doncs a repartir-se la variança. Després d'una primavera amb valors de variabilitat propers als mitjans, l'estiu (+2) torna a mostrar un comportament força similar a l'assenyalat en l'estiu (+1). Com en aquell cas la tercera component guanya pes en detriment de les components líders, fet que succeeix en els tres mesos estiuencs, mentre que a la tardor (+2) la segona component guanya protagonisme, especialment en els mesos de setembre (+2) i novembre (+2).

Tot i la llunyania del tercer any post-eruptiu respecte a les dates clau i la possible atenuació del forçament dinàmic, s'ha considerat oportú perllongar l'anàlisi fins a la tardor d'aquest any. En el tercer hivern hi ha un cert retorn a la dinàmica detectada durant el primer hivern. Així, les components líder tendeixen a guanyar pes, sobretot en els mesos de desembre (+2) i gener (+3). Per contra, el mes de febrer (+3) mostra una segona component amb un percentatge de variabilitat més elevat. Durant la primavera, és especialment remarcable el valor de variabilitat de l'EOF1 del mes de maig (+3), superant-se el llinar del 9è decil, fet que també s'havia detectat amb menor mesura en el mes de maig precedent. Com en els mesos estiuencs anteriors, en l'estiu (+3) tendeixen a tenir més protagonisme les components segona i tercera, especialment palpable en el mes de juny (+3). Finalment, durant la tercera tardor són les segones components les que expliquen un percentatge de variances clarament per damunt dels valors mitjans.

Mesos	Variabilitat representada pels EOFs1 post-volcànics, %	Mitjana de la variabilitat representada pels EOFs1 obtinguts a partir de la mostra de 100 casos d'onze anys seleccionats a l'atzar, %	Llindar del 9è decil fixat a partir de la mostra de 100 casos d'onze anys seleccionats a l'atzar, %	Llindar del 1r decil fixat a partir de la mostra de 100 casos d'onze anys seleccionats a l'atzar, %
Novembre (0)	45.8	41.1	46.7	35.5
Desembre (0)	46.1	40.9	47.4	35.2
Gener (+1)	59.1	46.3	53.9	39.4
Febrer (+1)	52.6	47.3	54.5	39.5
Març (+1)	53.7	44.2	52.7	36.1
Abril (+1)	33.5	39.1	45.1	32.9
Maig (+1)	34.0	38.4	44.6	32.3
Juny (+1)	48.9	39.3	45.7	33.1
Juliol (+1)	38.0	37.7	44.0	31.2
Agost (+1)	34.6	39.6	47.5	33.7
Setembre (+1)	37.5	37.7	43.8	32.2
Octubre (+1)	42.2	38.3	44.6	33.1
Novembre (+1)	<i>33.4</i>	41.1	46.7	35.5
Desembre (+1)	<i>34.1</i>	40.9	47.4	35.2
Gener (+2)	41.8	46.3	53.9	39.4
Febrer (+2)	<i>34.3</i>	47.3	54.5	39.5
Març (+2)	43.6	44.2	52.7	36.1
Abril (+2)	39.0	39.1	45.1	32.9
Maig (+2)	44.0	38.4	44.6	32.3
Juny (+2)	32.3	39.3	45.7	33.1
Juliol (+2)	<i>29.0</i>	37.7	44.0	31.2
Agost (+2)	44.9	39.6	47.5	33.7
Setembre (+2)	36.3	37.7	43.8	32.2
Octubre (+2)	39.7	38.3	44.6	33.1
Novembre (+2)	38.4	41.1	46.7	35.5
Desembre (+2)	44.7	40.9	47.4	35.2
Gener (+3)	51.4	46.3	53.9	39.4
Febrer (+3)	46.6	47.3	54.5	39.5
Març (+3)	41.8	44.2	52.7	36.1
Abril (+3)	44.0	39.1	45.1	32.9
Maig (+3)	45.3	38.4	44.6	32.3
Juny (+3)	36.2	39.3	45.7	33.1
Juliol (+3)	34.9	37.7	44.0	31.2
Agost (+3)	34.4	39.6	47.5	33.7
Setembre (+3)	39.4	37.7	43.8	32.2
Octubre (+3)	40.3	38.3	44.6	33.1
Novembre (+3)	<i>34.1</i>	41.1	46.7	35.5

Taula 5.2. Resultats de l'anàlisi EOF1.

La primera columna mostra els mesos post-eruptius, on 0 indica l'any de l'erupció, +1 el primer any posterior a l'erupció, i així progressivament. En negreta i ombrejat, aquells mesos que excedeixen el llindar del 9è decil, únicament en negreta els mesos que excedeixen el llindar del 4t quartil però no el del 9è decil i en cursiva els mesos inferiors al llindar del 1r decil (veure text per a més informació).

Mesos	Variabilitat representada pels EOF2 post-volcànics, %	Mitjana de la variabilitat representada pels EOF2 obtinguts a partir de la mostra de 100 casos d'onze anys seleccionats a l'atzar, %	Llindar del 9è decil fixat a partir de la mostra de 100 casos d'onze anys seleccionats a l'atzar, %	Llindar del 1r decil fixat a partir de la mostra de 100 casos d'onze anys seleccionats a l'atzar, %
Novembre (0)	20.2	26.9	31.7	22.4
Desembre (0)	24.6	28.3	32.0	25.0
Gener (+1)	29.7	27.7	32.0	23.0
Febrer (+1)	24.2	27.8	34.5	22.5
Març (+1)	25.6	27.2	31.8	22.8
Abril (+1)	27.4	25.8	30.3	20.9
Maig (+1)	27.7	24.7	28.5	21.1
Juny (+1)	25.4	24.1	28.6	20.0
Juliol (+1)	22.7	25.2	29.3	21.7
Agost (+1)	26.9	25.1	29.3	20.6
Setembre (+1)	24.7	25.1	29.3	21.2
Octubre (+1)	22.4	27.1	31.0	23.2
Novembre (+1)	28.4	26.9	31.7	22.4
Desembre (+1)	27.8	28.3	32.0	25.0
Gener (+2)	32.0	27.7	32.0	23.0
Febrer (+2)	31.1	27.8	34.5	22.5
Març (+2)	29.9	27.2	31.8	22.8
Abril (+2)	27.9	25.8	30.3	20.9
Maig (+2)	26.0	24.7	28.5	21.1
Juny (+2)	26.2	24.1	28.6	20.0
Juliol (+2)	21.6	25.2	29.3	21.7
Agost (+2)	22.2	25.1	29.3	20.6
Setembre (+2)	29.4	25.1	29.3	21.2
Octubre (+2)	27.4	27.1	31.0	23.2
Novembre (+2)	32.4	26.9	31.7	22.4
Desembre (+2)	27.6	28.3	32.0	25.0
Gener (+3)	30.4	27.7	32.0	23.0
Febrer (+3)	32.1	27.8	34.5	22.5
Març (+3)	30.4	27.2	31.8	22.8
Abril (+3)	23.7	25.8	30.3	20.9
Maig (+3)	23.8	24.7	28.5	21.1
Juny (+3)	29.2	24.1	28.6	20.0
Juliol (+3)	27.5	25.2	29.3	21.7
Agost (+3)	20.4	25.1	29.3	20.6
Setembre (+3)	32.1	25.1	29.3	21.2
Octubre (+3)	33.7	27.1	31.0	23.2
Novembre (+3)	27.7	26.9	31.7	22.4

Taula 5.3. Com en la taula 5.2., però per a l'EOF2.

Mesos	Variabilitat representada pels EOF3 post-volcànics, %	Mitjana de la variabilitat representada pels EOF3 obtinguts a partir de la mostra de 100 casos d'onze anys seleccionats a l'atzar, %	Llindar del 9è decil fixat a partir de la mostra de 100 casos d'onze anys seleccionats a l'atzar, %	Llindar del 1r decil fixat a partir de la mostra de 100 casos d'onze anys seleccionats a l'atzar, %
Novembre (0)	15.6	16.9	20.9	12.7
Desembre (0)	17.0	18.0	22.1	13.8
Gener (+1)	8.4	16.8	22.2	12.1
Febrer (+1)	17.6	15.6	21.5	10.9
Març (+1)	18.9	16.6	21.4	11.7
Abril (+1)	20.9	16.4	20.2	12.2
Maig (+1)	18.8	16.9	20.2	13.6
Juny (+1)	12.0	15.6	18.3	12.7
Juliol (+1)	21.3	15.8	19.2	12.6
Agost (+1)	17.9	15.5	18.8	11.9
Setembre (+1)	16.7	16.6	20.4	13.3
Octubre (+1)	19.2	17.4	21.1	13.6
Novembre (+1)	23.4	16.9	20.9	12.7
Desembre (+1)	20.5	18.0	22.1	13.8
Gener (+2)	21.6	16.8	22.2	12.1
Febrer (+2)	26.4	15.6	21.5	10.9
Març (+2)	14.5	16.6	21.4	11.7
Abril (+2)	13.5	16.4	20.2	12.2
Maig (+2)	15.4	16.9	20.2	13.6
Juny (+2)	20.1	15.6	18.3	12.7
Juliol (+2)	18.5	15.8	19.2	12.6
Agost (+2)	19.6	15.5	18.8	11.9
Setembre (+2)	16.8	16.6	20.4	13.3
Octubre (+2)	16.0	17.4	21.1	13.6
Novembre (+2)	13.9	16.9	20.9	12.7
Desembre (+2)	17.2	18.0	22.1	13.8
Gener (+3)	12.8	16.8	22.2	12.1
Febrer (+3)	10.9	15.6	21.5	10.9
Març (+3)	19.1	16.6	21.4	11.7
Abril (+3)	13.5	16.4	20.2	12.2
Maig (+3)	13.2	16.9	20.2	13.6
Juny (+3)	17.5	15.6	18.3	12.7
Juliol (+3)	16.1	15.8	19.2	12.6
Agost (+3)	17.8	15.5	18.8	11.9
Setembre (+3)	13.2	16.6	20.4	13.3
Octubre (+3)	16.6	17.4	21.1	13.6
Novembre (+3)	17.0	16.9	20.9	12.7

Taula 5.4. Com en la taula 5.2. però per a l'EOF3.

Un cop s'han pogut detectar canvis i fluctuacions en els pesos dels diferents modes de variabilitat, la investigació es centrarà en aquells mesos post-volcànics en els que s'ha detectat un percentatge de la primera component extraordinàriament elevat o, en d'altres paraules, en el que un determinat patró és més persistent. El següent pas serà doncs determinar la morfologia d'aquests patrons espacials mitjançant el mètode de la rotació de les components anteriorment citada (veure apartat 5.2.3.).

5.3.2. Patrons de circulació dominants durant el període post-volcànic

Novembre (0) i desembre (0) són els primers mesos amb un elevat percentatge de variabilitat representat pel primer mode, restant però per sota del llindar del 90è percentil, per tant els patrons que es mostren a les figures 5.3. i 5.4. respectivament, serien els més representatius en aquests dos mesos post-eruptius. En el mes de novembre, s'insinua un fort gradient sobre la mar Negra generat pel dipol configurat per un centre a la Mediterrània Oriental i un altre a l'extrem nord-oriental de la finestra. Tal i com s'aprecia, la fase negativa del patró afavoriria l'entrada de vents continentals, freds i secs, sobre l'Europa occidental, mentre que la fase inversa afavoriria l'entrada de fluxos atlàntics sobre l'Europa continental. Aquest tipus de patró s'assembla al patró identificat per *Barnston & Livezey* [1987] amb l'assignació d'Euràsia-1 (EU-1). En aquest treball de referència, els autors utilitzaren també la tècnica de les components principals rotades per a la identificació d'un conjunt de modes principals de variabilitat inter-anual sobre l'HN, tot descrivint també la seva persistència i estacionalitat. Segons aquesta investigació, la morfologia que es presenta en el mes de novembre (0) es caracteritza per un centre dominant a 60°-70°N / 25°-50°E i un altre de més dèbil fluctuant sobre la Península Ibèrica i la Mediterrània.

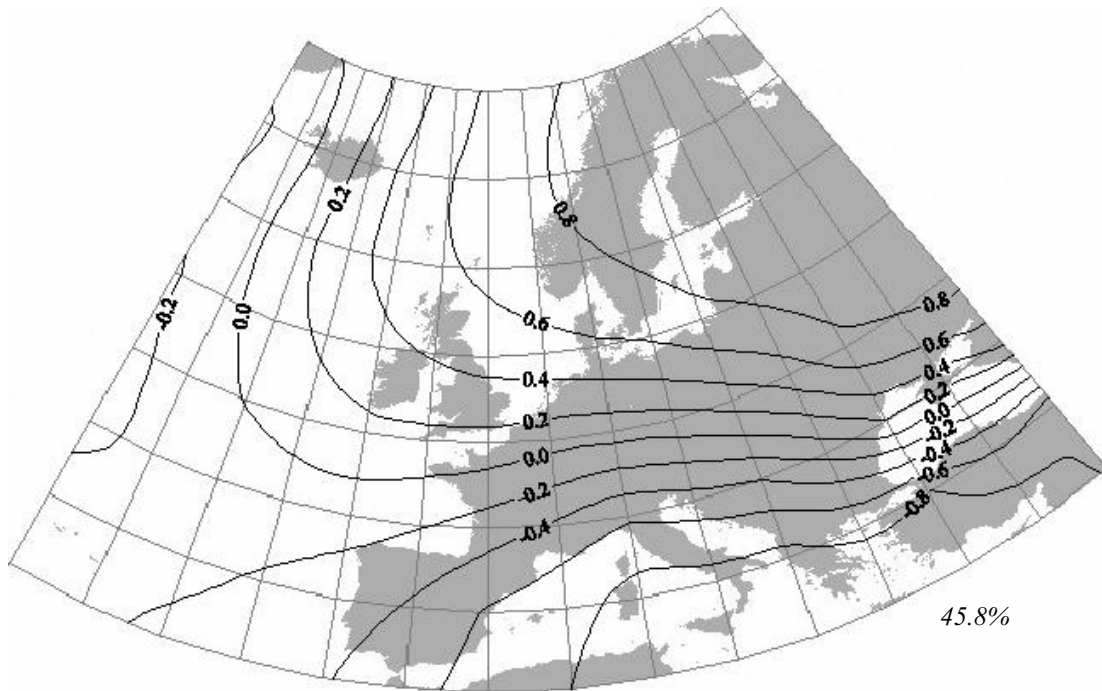


Figura 5.3. Patró espacial de la primera component rotada corresponent al mes de novembre (0). Els contorns representen pesos espacials (les unitats són arbitràries). El percentatge correspon a la variança original (no rotada).

Pel que fa al mes de desembre (0), el patró es podria associar a una situació de bloqueig (positiu) o d'increment de la ciclogènesi (negatiu) sobre el nord-est de l'Oceà Atlàntic (figura 5.4.). Aquest EOF quan és negatiu suggereix una circulació anòmla de l'est sobre el sector de la Mediterrània occidental, mentre que quan és positiu, els vents de l'oest són més freqüents sobre la façana occidental del continent. La morfologia d'aquesta configuració es podria associar al patró Atlàntic Est (EA) definit per *Barnston & Livezey* [1987] i ve definit per un centre localitzat cap a $55^{\circ}\text{N} / 20^{\circ}\text{-}35^{\circ}\text{W}$ que genera un fort gradient nord-oest/sud-est sobre l'Europa Occidental i una àrea de signe oposat a l'anterior que abraçaria el Nord d'Àfrica o la Mediterrània i amb una localització més probable cap a $25^{\circ}\text{-}35^{\circ}\text{N} / 0^{\circ}\text{-}10^{\circ}\text{W}$. Els autors també assenyalen que la línia 0 sempre travessa Anglaterra o França, com és el cas que en ocupa. La seva estructura dipolar pot recordar a la del patró NAO però en aquest cas l'eix del dipol està desplaçat més cap al sud.

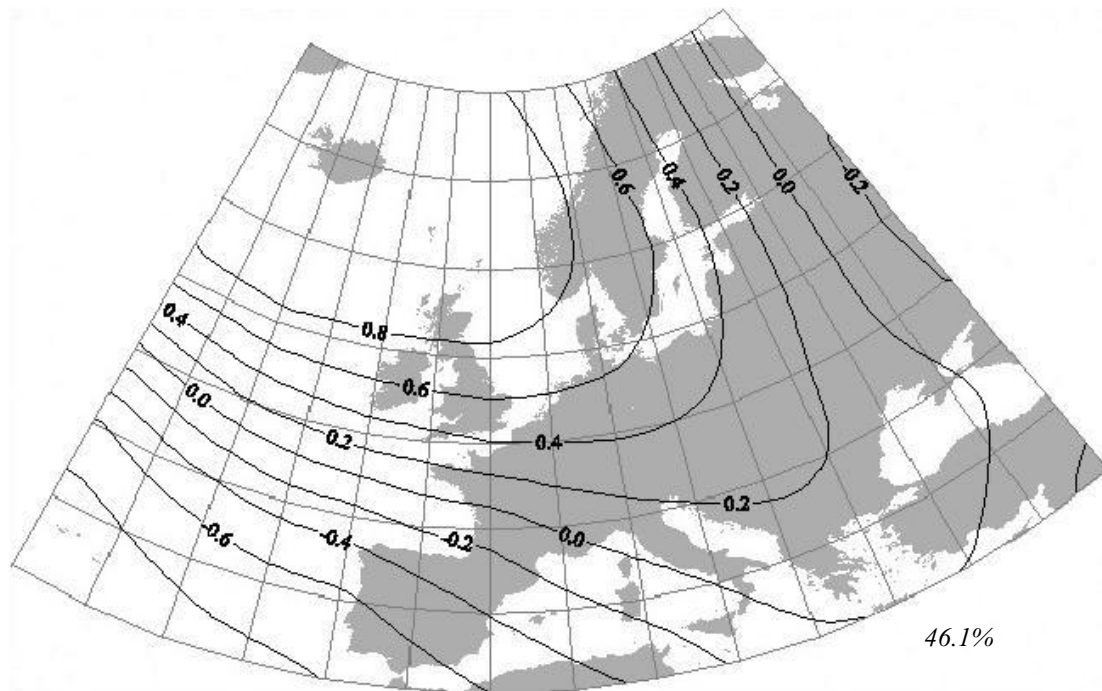


Figura 5.4. Com en la figura 5.3. però per al mes de desembre (0).

El mes de gener del primer hivern posterior a les onze erupcions considerades és el més extraordinari (figura 5.5.). La primera component representa el 59.1% de la variabilitat original en el camp de pressió del domini, i mostra una estructura dipolar amb uns elevats pesos a l'extrem nord, de signe oposat als presents a la meitat sud-oest. El patró positiu d'aquest patró espacial s'associa amb un fort flux de l'oest sobre Europa, mentre que la fase negativa representaria una reducció de la component zonal de la circulació. La fase positiva és la típica de les latituds mitjanes i molt ben establerta a l'hivern, i s'ha associat al patró NAO [Walker & Bliss, 1932; Barnston & Livezey, 1987; Hurrell, 1995; Slonosky *et al.*, 2000] o, més recentment, al patró AO [Thompson & Wallace, 1998]. En el primer gener post-eruptiu aquest patró sembla ser més persistent, i pel que fa a la morfologia mostra un apreciable reforçament de l'anticicló de les Açores, doncs els valors negatius són inexistents cap al sud, i un increment dels vents de l'oest al voltant de la latitud de 60°N. Aquest fet és consistent amb estudis previs i que ja havíem assenyalat un reforçament del vèrtex polar estratosfèric i de les anomalies de l'altura geopotencial de la capa de 500 hPa durant el primer hivern post-volcànic [Graf *et al.*, 1994; Kodera, 1994]. Com a resultat, el patró NAO o AO domina la circulació hivernal, generant l'escalfament observat [Groisman, 1992; Robock & Mao, 1992, 1995; Jones & Kelly, 1996] i modelitzat [Graf *et al.*, 1993; Mao & Robock, 1998] sobre les àrees continentals de l'HN.

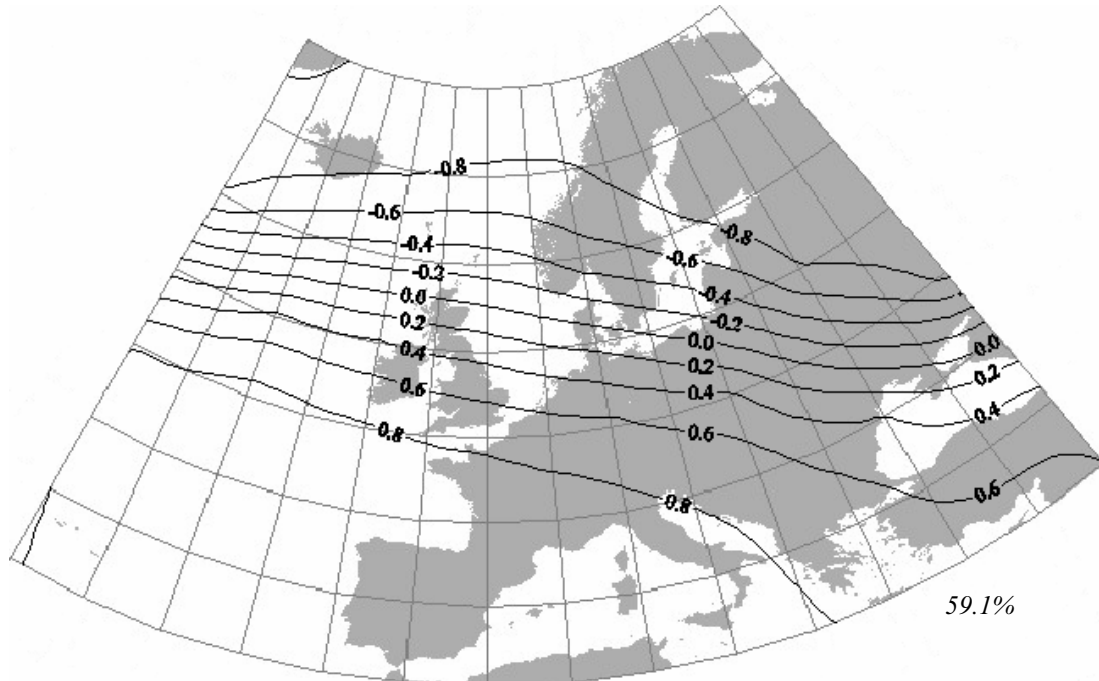


Figura 5.5. Com en la figura 5.3. però per al mes de gener (+1).

Durant el mes següent, febrer (+1) (figura 5.6.), tot i que el percentatge del primer EOF post-volcànic no és tant extremadament elevat (és a dir, no supera el llindar establert pel novè decil), es perpetua un tipus de circulació relativament similar. Així, l'estructura presenta novament un pol a l'extrem septentrional del domini de signe oposat al de l'extrem més meridional que en aquest cas presenta el centre sobre la conca mediterrània. Assumint un patró positiu, la circulació zonal es faria més freqüent sobre el nord d'Europa, fent-se evident de nou el desplaçament cap al nord de l'eix que separaria el domini dels pesos positius al sud, dels pesos negatius al sector nord-oriental de la finestra. Els resultats aportats per l'anàlisi EOF en aquests mesos hivernals coincidirien amb els obtinguts en la recerca realitzada per *Dawson et al.* [1997]. En aquest estudi, els autors constataren que la freqüència de dies de vent fort a la ciutat d'Edinburgh (Escòcia) és molt més elevada en els hiverns (octubre a març) immediatament posteriors a les erupcions dels volcans Tambora, Krakatau i El Chichón. Les fases positives dels patrons extrems de l'anàlisi EOF semblarien confirmar aquest extrem.

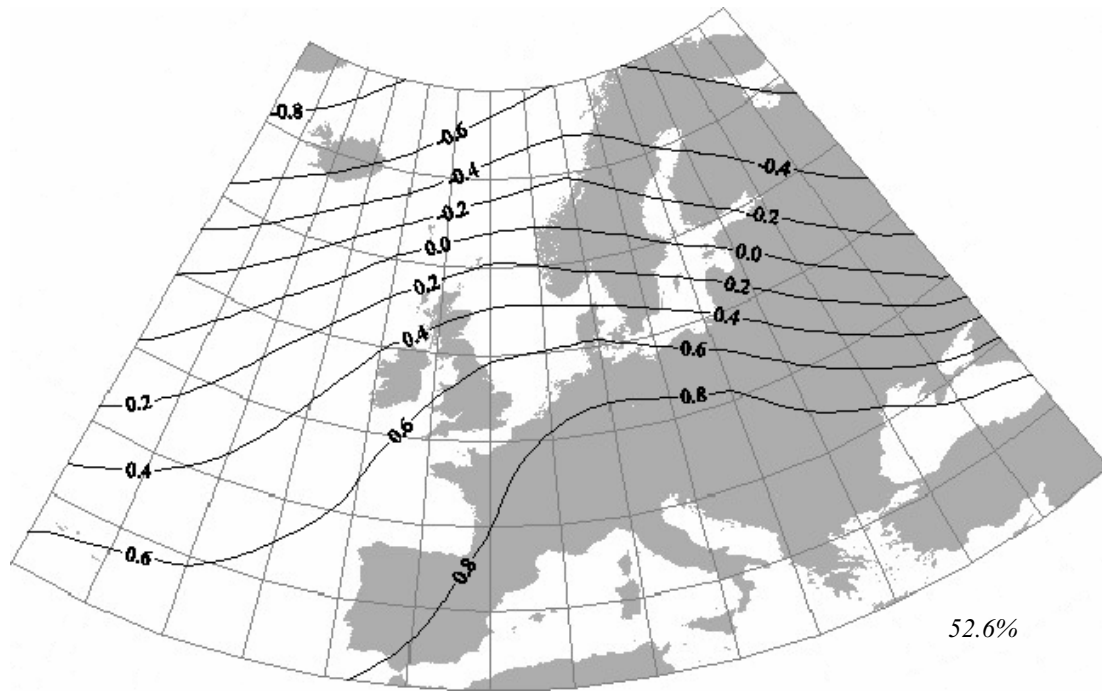


Figura 5.6. Com en la figura 5.3. però per al mes de febrer (+1).

A la figura 5.7. es mostra el patró espacial corresponent al mes de març (+1). Com succeïa amb el mes de gener, l'EOF1 d'aquest mes presenta un percentatge superior al llindar del 9è decil. El patró espacial està protagonitzat en aquest cas per una àmplia àrea a la part central i nord del domini de signe oposat al sector proper a les costes de Portugal. Segons la classificació de *Barnston & Livezey* [1987] es podria associar al patró Atlàntic Est ja definit pel mes de novembre (0). A les estacions equinoccials, el centre dominant es desplaça cap a l'oest i a la primavera apareix un centre de signe oposat sobre les costes de Portugal. La fase positiva d'aquest patró, indicaria una major presència d'adveccions del nord-oest sobre la Península Ibèrica.

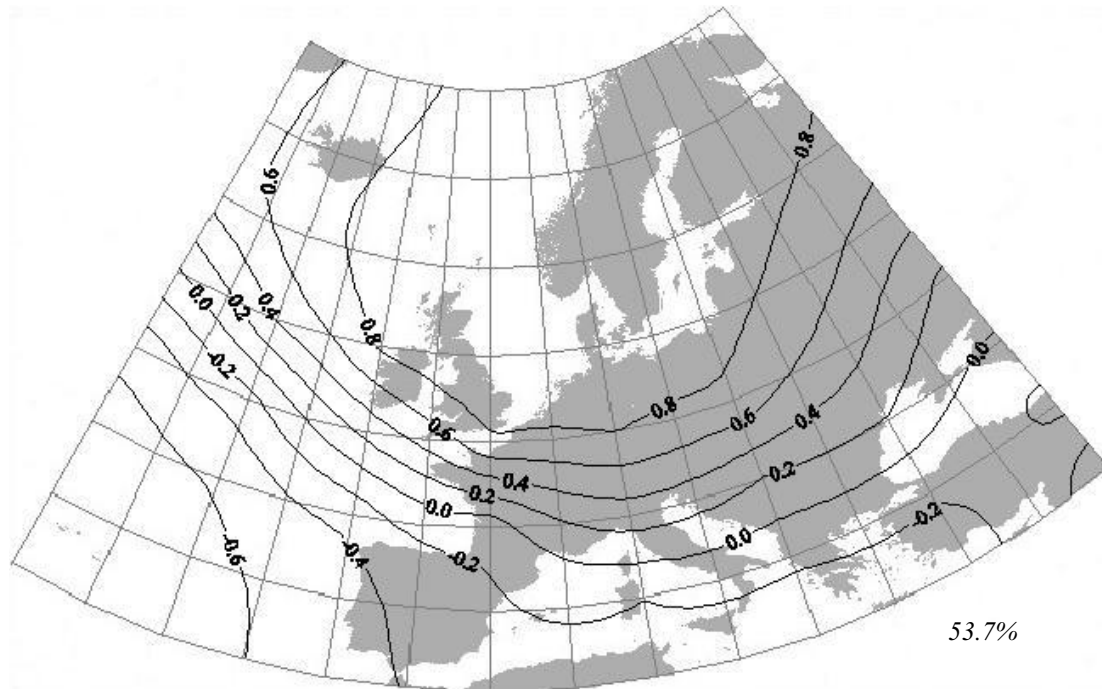


Figura 5.7. Com en la figura 5.3. però per al mes de març (+1).

Un altre dels mesos anòmals des del punt de vista del percentatge de la variabilitat original representada pel primer mode és el mes de juny (+1) (figura 5.8.). En aquest mes, el patró es caracteritza per la presència de dos centres de signe oposat, un a l'oest de les Illes Britàniques i un altre de més ampli cap a l'àrea mediterrània. La fase positiva mostraria una forta circulació del sud-oest sobre l'arxipèlag britànic, circulació que ha estat identificada per *Kelly et al.*, [1997] com al “monsó europeu”. Aquest patró s'estableix a mitjans de juny i consisteix en el desplaçament cap al sud de la circulació de l'oest en capes altes, juntament amb el moviment del vèrtex circumpolar cap al sector de l'Atlàntic. Aquest tipus de circulació assegura freqüents episodis de precipitació sobre l'arxipèlag britànic i, arrel dels resultats, seria més persistent en els períodes post-eruptius.

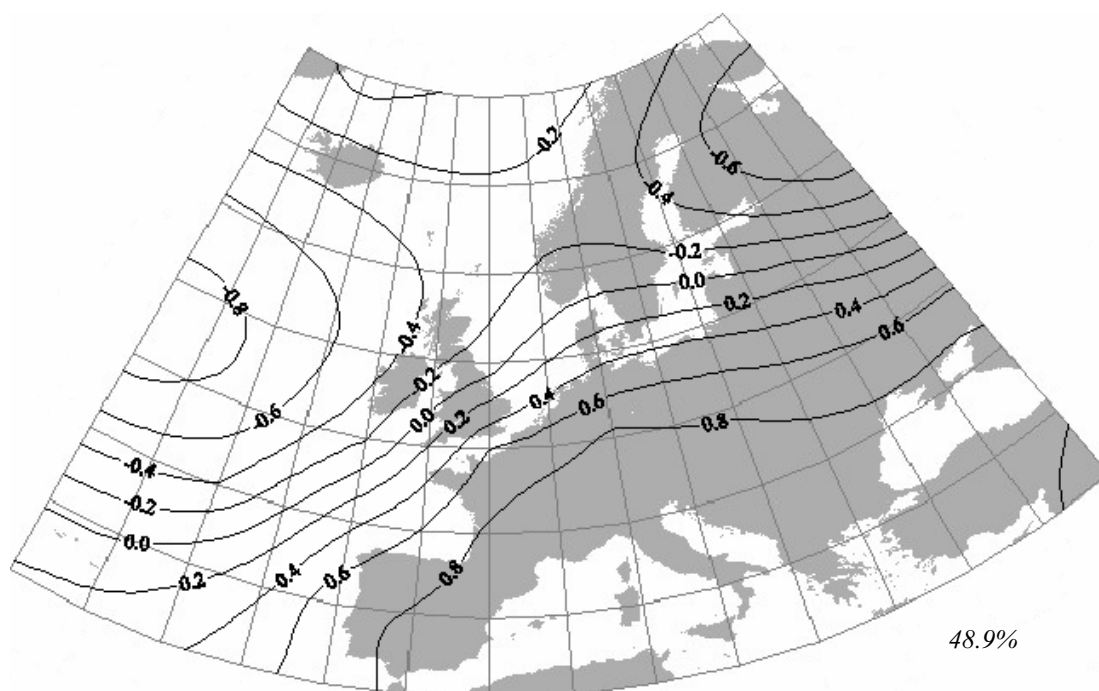


Figura 5.8. Com en la figura 5.3. però per al mes de juny (+1).

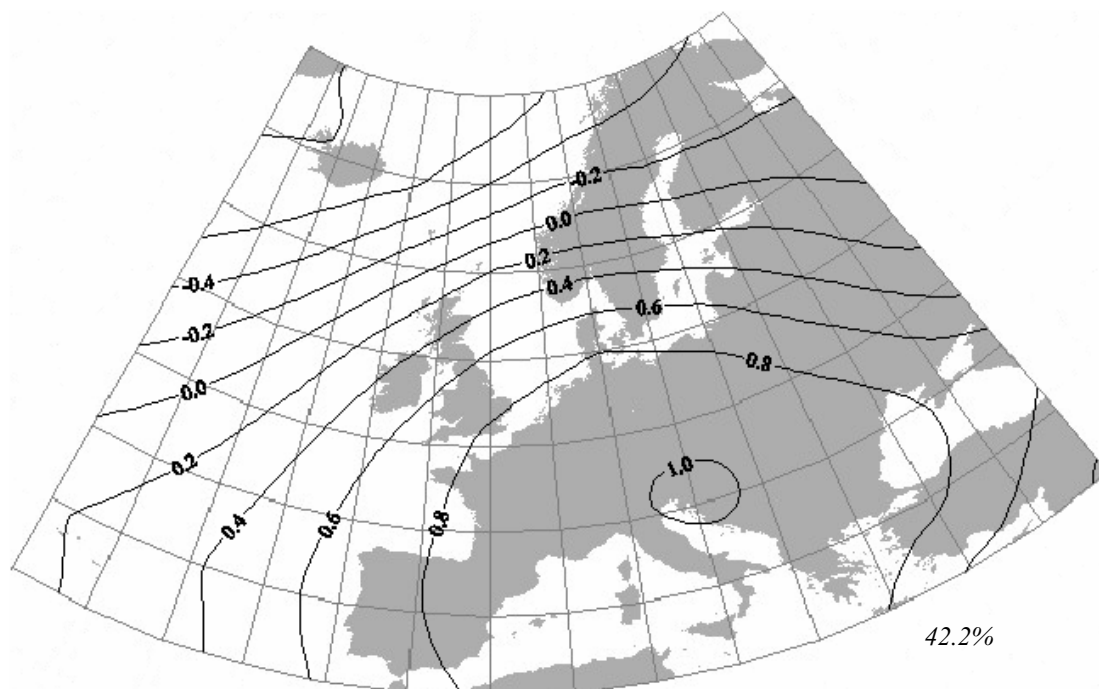


Figura 5.9. Com en la figura 5.3. però per al mes d'octubre (+1).

L'únic mes de tardor anòmal del període post-volcànic és octubre (+1), però sense arribar a ser del tot extrem (figura 5.9.). En aquest mes de nou es dona una estructura dipolar, amb una àmplia regió al sud del domini amb càrregues positives i un altra al voltant d'Islàndia amb pesos de signe oposat, i que té certa similitud amb la mostrada pel juny (+1). Assumint una fase positiva del mode, aquesta disposició afavoriria una circulació de l'oest/sud-oest evident sobre el nord d'Europa mentre que el Mediterrani restaria afectat per anomalies de pressió positives.

En el treball presentat per *Prohom et al.* [2003] apareixen dos mesos més amb elevats valors de la variança del primer mode dins del primer any post-volcànic: juliol i setembre. Cal recordar però que en aquell treball s'utilitzaren vuit erupcions tropicals i en aquest cas el nombre de casos s'ha ampliat a onze. Novament cal alertar sobre les limitacions del mètode EOF i que aquí van associades a la mida de la mostra.

Tal i com s'apreciava a la taula 5.2., en el segon any post-volcànic només apareix un mes amb valors anòmals, però no extrems (desembre, +2, serà analitzat dins del tercer hivern). Aquest és el cas del mes de maig (+2), assolint un percentatge de l'EOF1 molt proper al llindar del novè decil (figura 5.10.). La representació rotada dels resultats per a aquest mes ens indica una disposició molt similar a la de l'octubre (+1) (figura 5.8.) insinuant-se, en una fase positiva, un flux ciclònic sobre l'Atlàntic i una circulació del sud-oest sobre l'Europa occidental i les Illes Britàniques.

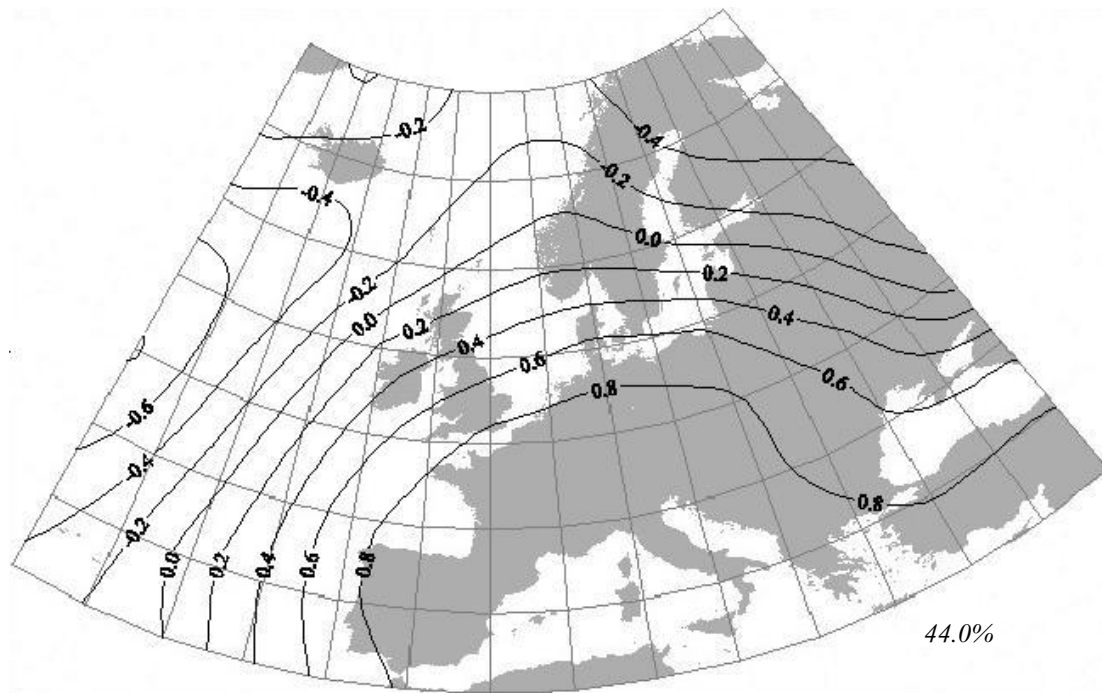


Figura 5.10. Com en la figura 5.3. però per al mes de maig (+2).

En el tercer hivern post-eruptiu tornen a apreciar-se valors elevats de l'EOF1, tal i com succeïa en el primer, però sense superar-se el llindar fixat pel 9è decil. Els mesos de desembre (+2) i gener (+3) presenten una morfologia dipolar força similar amb un dels pols centrat sobre Escandinàvia mentre que l'altre es situaria a l'extrem sud del domini (figures 5.11. i 5.12.). Novament, la fase negativa del patró implicaria un debilitament de la circulació zonal sobre Europa i una major presència de baixes pressions sobre l'Europa meridional. Al gener (+3), l'estructura dipolar pren més cos i un dels centres queda ubicat a l'oest de la Península Ibèrica. Assumint doncs una fase negativa, el patró que es presenta seria similar al d'un patró NAO negatiu i que afavoriria l'arribada de fluxos humits sobre l'oest peninsular. De fet durant el mes de gener (+3) el patró pluviomètric detectat mostrava efectivament anomalies positives de precipitació sobre el nord-oest peninsular (figura 4.6., quadres inferiors), i donaria suport a aquesta teoria.

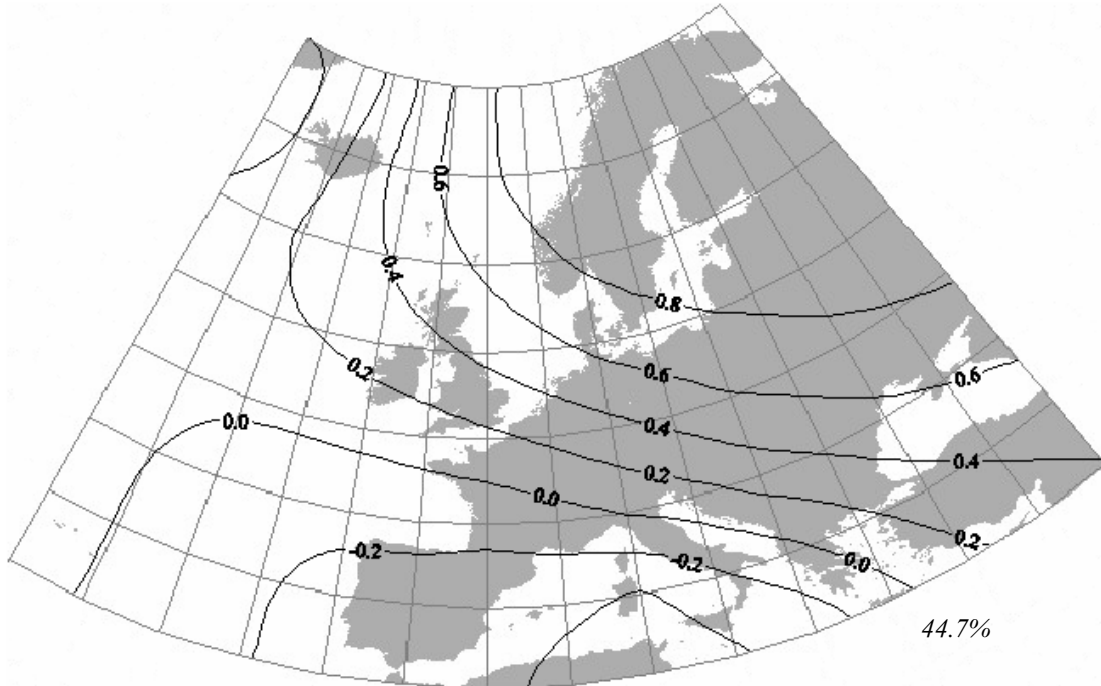


Figura 5.11. Com en la figura 5.3. però per al mes de desembre (+2).

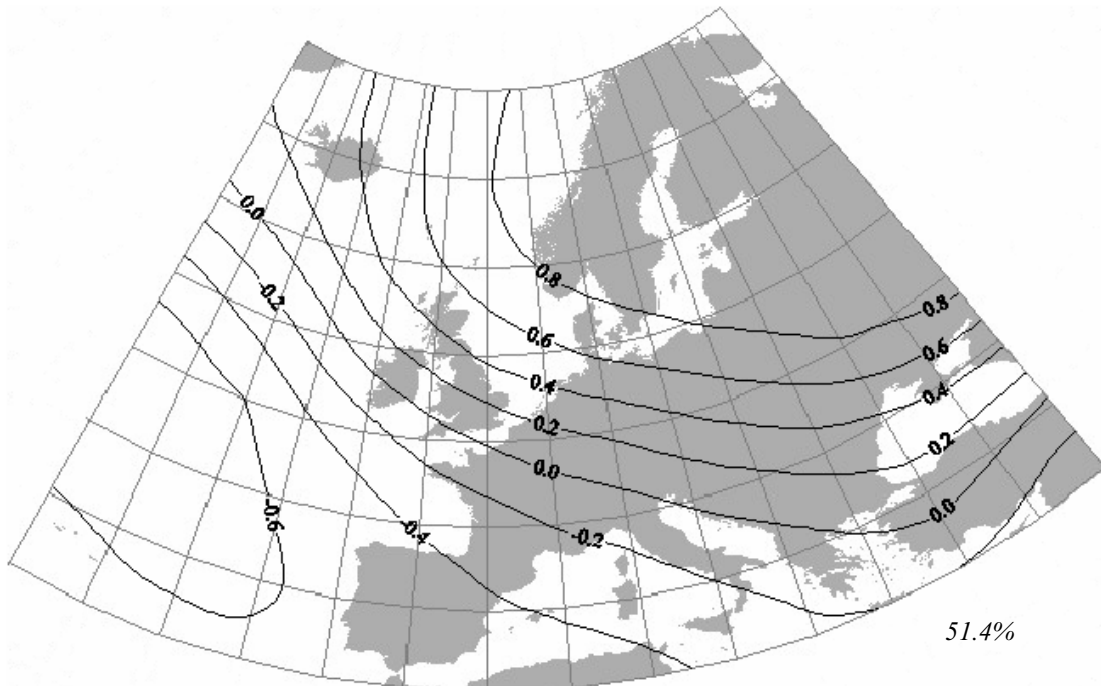


Figura 5.12. Com en la figura 5.3. però per al mes de gener (+3).

En la tercera primavera post-eruptiva apareixen dos mesos anòmals prenent com a criteri el percentatge de variabilitat representada per l'EOF1. Així, abril (+3) presenta un patró protagonitzat per una àmplia àrea sobre el sud-est del domini en la que tots els punts varien a l'uníson, amb petites regions als extrems sud-oest i nord-oest de signe oposat (figura 5.13.). Si s'assumeix una càrrega positiva estariem davant d'una nova situació de bloqueig que afectaria al sud i centre del continent, mentre que la situació oposada marcaria una major presència de les baixes pressions en aquest sector.

L'EOF1 del mes de maig del tercer any post-eruptiu novament presenta uns percentatges de variabilitat excepcionals, superant en aquest cas el llindar del percentil 90 (figura 5.14). El patró espacial té una estructura clarament dipolar, amb un dels centres cap a la península escandinava i un altre de més ampli centrat sobre la conca mediterrània. La fase positiva del patró indicaria un fort flux de l'oest sobre el centre del domini i amb un sector meridional ocupat per una àmplia àrea d'altres pressions. Per contra, en una fase negativa, seríem davant d'una situació de bloqueig sobre Escandinàvia i on les baixes pressions estarien obligades a circular cap a latituds més baixes.

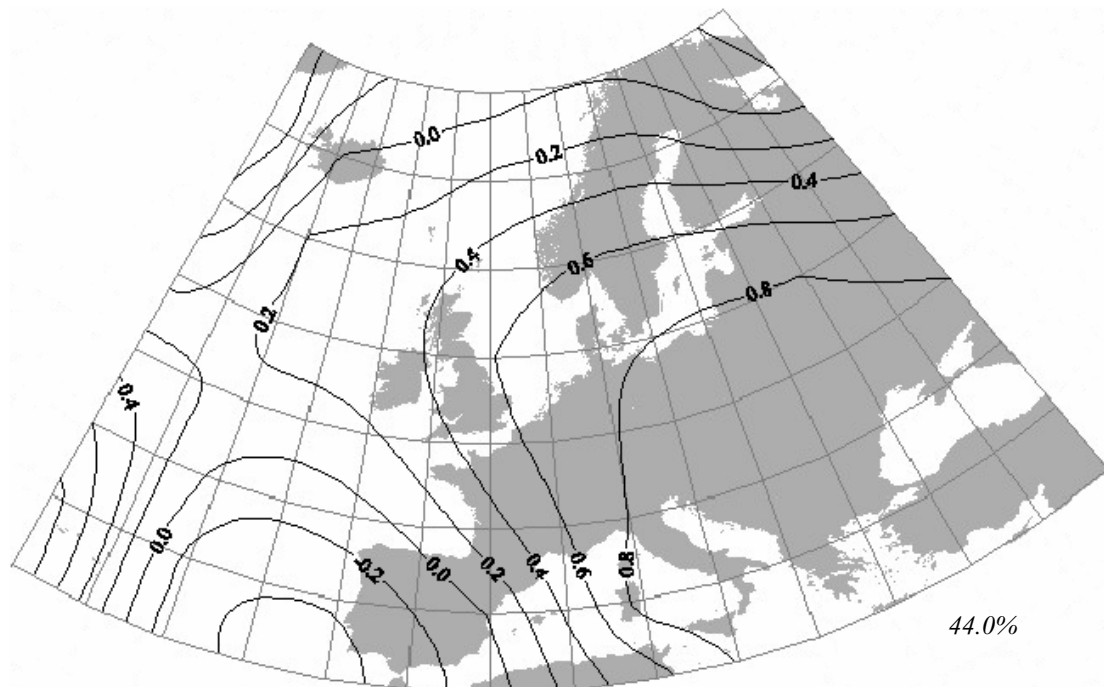


Figura 5.13. Com en la figura 5.3. però per al mes d'abril (+3).

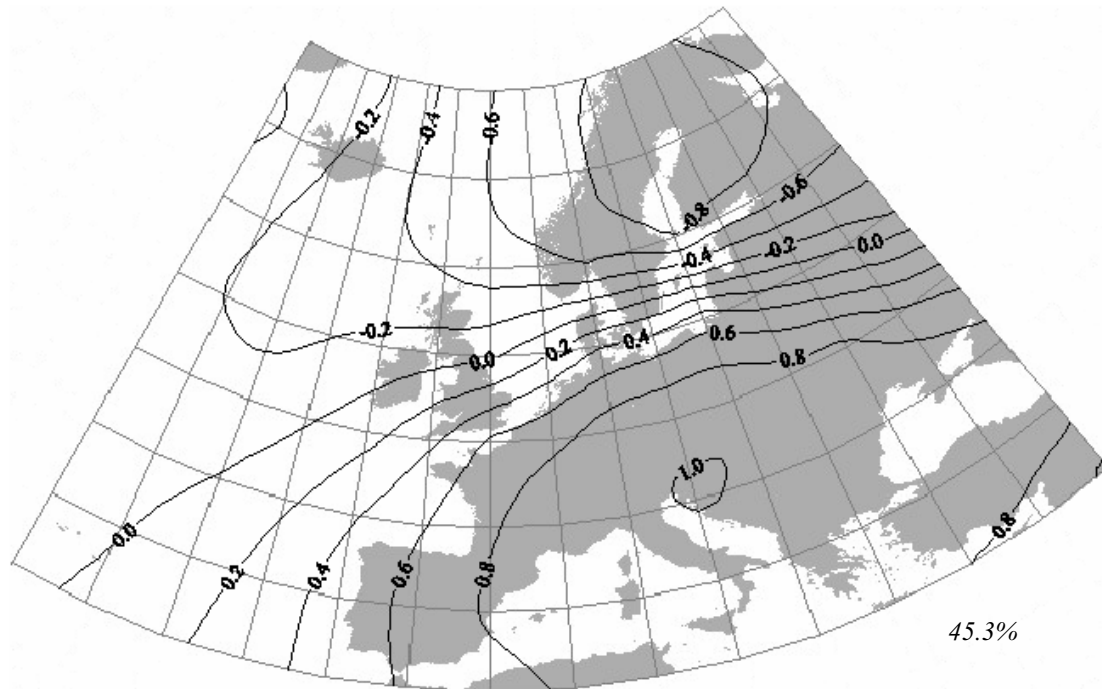


Figura 5.14. Com en la figura 5.3, però per al mes de maig (+3).

Respecte als resultats plantejats, cal alertar de nou sobre les limitacions de la interpretació física dels resultats procedents de l'anàlisi EOF. Així els patrons que s'han presentat no corresponen realment a una situació sinòptica determinada sinó a una representació de la ubicació més freqüent (en tractar-se d'EOFs1) dels diferents centres d'acció, independentment del seu signe. No obstant, aquest anàlisi sí que permet reconèixer aquells mesos en els quals es perpetua una situació concreta, malgrat que s'ha de tenir en compte que s'està treballant a resolució mensual i l'escala temporal podria ser massa grollera.

Vistos els resultats sembla evident que el període post-volcànic més afectat, des del punt de vista estrictament dinàmic, és l'hivernal, doncs dels dotze mesos considerats anòmals, set corresponen a mesos dins d'aquesta estació de l'any. En el següent apartat, s'aprofundirà en aquest aspecte, tot analitzant la resposta de l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO) a aquest forçament.

5.4. EL PATRÓ NAO HIBERNAL I EL FORÇAMENT VOLCÀNIC

Des del punt de vista climàtic, el sector de l'Atlàntic Nord és particularment important per diferents motius. En primer lloc, és l'àrea on els centres d'acció guien una part substancial de la variabilitat climàtica a escales anual i decadal sobre les latituds més septentrionals del planeta, tant a través del patró NAO [Hurrell, 1995; Hurrell *et al.*, 2001], com a través de l'Oscil·lació de l'Àrtic (AO), si s'analitza el comportament de l'alta troposfera i la baixa estratosfera sobre aquest darrer sector [Wallace, 2000; Thompson & Wallace, 1998, 2001]. En segon lloc, es tracta d'un àmbit on la circulació termohalina és especialment modulada i dirigida per les interaccions atmosfera-oceà [Broecker, 1997]. Finalment, i específicament en el context d'aquesta investigació, l'Atlàntic Nord és un dels sectors amb una major amplitud en la resposta climàtica davant del forçament volcànic [Ammann, 2001].

Ja s'ha pogut comprovar que, com a mínim durant el període instrumental i en aquest sector, la resposta climàtica durant l'hivern es veu protagonitzada per un moderat escalfament en superfície especialment detectat al nord d'Europa (veure secció 5.1.). Aquest patró coincideix amb les condicions que es donen en anys d'un índex NAO elevat, és a dir, quan el gradient de pressió entre la baixa d'Islàndia i l'anticicló de les Açores es veu reforçat. L'àrea peninsular mostra significatives correlacions negatives entre l'índex NAO i la precipitació hivernal [Martín-Vide *et al.*, 1999; Martín-Vide & Fernández, 2001; Esteban *et al.*, 2002], pel que qualsevol modificació en aquest índex pot tenir repercussions destacades. L'anàlisi es centrarà doncs en la resposta d'aquest patró durant l'època post-volcànica hivernal.

Per a estudiar la influència d'erupcions explosives sobre l'índex NAO, s'han utilitzat dues fonts de dades. En primer lloc, Jones *et al.* [1997]⁹ varen utilitzar mesures instrumentals de pressió atmosfèrica de Gibraltar i Reykjavik per a estendre l'índex NAO enrere en el temps fins al 1821, mentre que Luterbacher *et al.* [2002]¹⁰ varen calcular-ne un altre pel període 1659-2001 basant-se, en aquest cas, en una combinació de diverses fonts *proxy* documentals i instrumentals. En ambdós casos, la base temporal és la mensual, tot i que Luterbacher *et al.* [2002] també obtingueren un índex estacional iniciant-se l'any 1500. Les erupcions tropicals que s'han tingut en compte són les que es presentaven a la taula 5.1., més la incorporació de la del volcà Fuego, l'any 1974.

⁹ Font: <http://www.cru.uea.ac.uk>

¹⁰ Font: <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/pubs/luterbacher2002b/luterbacher2002b.html>

Igualment, també s’ha considerat oportú realitzar el mateix anàlisi per a les erupcions d’elevades latituds més destacades des de 1821, donat que el seu suposat forçament dinàmic ha estat menys estudiat (taula 5.5.). Amb tot, cal alertar que el nombre d’erupcions d’aquest tipus es limita a cinc casos, i que per aquest motiu els resultats s’han de prendre amb cautela. En aquest sentit, no es va considerar raonable aplicar el mètode de les components principals a aquest conjunt d’erupcions, doncs els resultats serien d’escassa fiabilitat.

	Lat.	Long.	Data (mes, any)	VEI	DVI	IVI*
Erupcions						
Askja, Islàndia	65.0°	16.8°W	3, 1875	5	1000	0.0
Ksudach, Kamxatka-Rússia	51.8°	157.5°E	3, 1907	5	500	0.4
Novarupta (<i>Katmai</i>), Alaska	58.3°	155.2°W	6, 1912	6	500	2.1
Komagatake, Japó	42.1°	140.6°E	6, 1929	> 4	...	0.8
Bezymianny, Kamxatka-Rússia	56.1°	160.7°E	3, 1956	5	30	0.0

Taula 5.5. Erupcions volcàniques de latituds elevades de l’HN incloses en l’anàlisi NAO, indicant la localització, la data i la magnitud basada en tres criteris: VEI, DVI i IVI

* IVI corresponent a l’HN i expressat com a desviacions estàndard [Robock & Free, 1995].

Els resultats de l’encreuament dels referits índexs NAO (NAOi) amb els anys de vulcanisme de gran magnitud es presenten a les taules 5.6. i 5.7., per a erupcions tropicals i de latituds elevades, respectivament. Es pot apreciar l’evolució individualitzada dels índexs pels hiverns (desembre a febrer) des de l’any de l’erupció fins al quart hivern. Observant els resultats s’insinuen unes tendències més o menys comunes. Per a fenòmens tropicals (taula 5.6.), el nombre de NAOi negatius es redueix de manera evident en els dos primers anys i en ambdues fonts. Malgrat tot, és en la reconstrucció de *Jones et al.* on apareixen els valors més elevats, sobretot en el primer hivern, aspecte que és menys evident en la font de *Luterbacher et al.* (també pel fet que inclouen un nombre de casos més elevat). Per la seva part, en el tercer hivern la tendència és la inversa i comencen a aparèixer valors negatius amb més freqüència i escassegen els positius de gran magnitud. En canvi el quart hivern post-eruptiu semblaria retornar a una situació similar a la dels dos primer hiverns, amb índexs clarament positius.

Erupcions Tropicals	Hiverns post- volcànics	NAOi (Jones <i>et al.</i> , 1997)				NAOi Luterbacher <i>et al.</i> , 2002)			
		Des.	Gen.	Feb.	Mitjana hivernal	Des.	Gen.	Feb.	Mitjana hivernal
1808, desconeguda	1808-1809	**	**	**	**	-1.39	-1.57	0.63	-0.78
	1809-1810	**	**	**	**	1.74	-0.83	0.58	0.50
	1810-1811	**	**	**	**	0.28	-0.24	0.91	0.32
	1811-1812	**	**	**	**	0.69	-0.35	1.78	0.71
1815, Tambora	1815-1816	**	**	**	**	0.37	-0.32	0.18	0.08
	1816-1817	**	**	**	**	0.97	0.98	2.17	1.37
	1817-1818	**	**	**	**	-1.26	2.00	1.03	0.59
	1818-1819	**	**	**	**	-0.42	2.00	0.97	0.85
1822, Galunggung	1822-1823	-0.73	-3.39	**	**	-0.53	-2.00	0.83	-0.57
	1823-1824	-0.20	-0.16	0.25	-0.04	0.98	0.70	-0.38	0.43
	1824-1825	-0.01	-0.23	0.21	-0.01	0.58	-0.24	0.00	0.11
	1825-1826	-1.31	-3.05	4.87	0.17	-0.76	-1.90	2.83	0.06
1831, Babuyan Claro	1831-1832	0.36	-0.04	0.83	0.38	1.00	-0.60	0.12	0.17
	1832-1833	3.32	-0.36	2.52	1.83	1.88	-2.00	0.64	0.17
	1833-1834	4.17	3.07	2.66	3.30	2.18	0.66	1.22	1.35
	1834-1835	0.11	0.37	3.37	1.28	-1.79	-0.88	1.97	-0.23
1835, Cosigüina	1835-1836	-1.46	1.47	0.06	0.02	-2.08	1.47	0.30	-0.10
	1836-1837	-1.41	-1.16	4.67	0.70	-0.83	-1.85	2.73	0.02
	1837-1838	1.37	-2.16	-1.81	-0.87	0.54	-1.37	-1.10	-0.64
	1838-1839	2.55	1.24	4.20	2.66	0.42	0.82	2.02	1.09
1862, Makjan	1862-1863	2.92	1.12	3.10	2.38	1.63	1.95	1.47	1.68
	1863-1864	2.17	2.03	-0.27	1.31	0.98	1.09	0.22	0.76
	1864-1865	-0.77	0.15	-0.42	-0.35	-0.11	0.12	-0.45	-0.15
	1865-1866	2.57	2.06	0.70	1.78	0.66	1.66	0.67	1.00
1883, Krakatau	1883-1884	0.91	3.32	1.48	1.90	-0.18	1.55	-0.15	0.41
	1884-1885	1.94	-0.80	0.09	0.41	0.90	-0.56	-0.03	0.10
	1885-1886	-0.03	-1.41	-0.39	-0.61	-1.17	0.93	-0.36	-0.20
	1886-1887	0.12	1.90	2.03	1.35	-0.35	1.16	0.85	0.55
1902, Santa María	1902-1903	1.27	1.28	4.86	2.47	0.03	0.07	1.20	0.43
	1903-1904	-1.09	2.24	1.21	0.79	0.84	1.68	1.14	1.22
	1904-1905	0.88	1.81	2.09	1.59	-1.13	0.08	1.02	-0.01
	1905-1906	1.85	2.64	1.26	1.92	-0.54	1.55	1.72	0.91
1963, Agung	1963-1964	-3.09	0.93	-0.13	-0.76	-3.00	-2.09	-1.60	-2.23
	1964-1965	-1.24	0.01	-3.03	-1.42	-0.67	0.08	-4.15	-1.58
	1965-1966	1.24	-1.01	-0.38	-0.05	1.01	-2.99	-1.39	-1.12
	1966-1967	1.68	0.04	1.70	1.14	1.52	-1.73	1.48	0.42
1974, Fuego	1974-1975	3.06	2.43	0.40	1.96	1.69	1.76	-0.91	0.85
	1975-1976	-1.57	0.75	1.29	0.16	-1.34	0.49	0.90	0.02
	1976-1977	-3.63	-2.36	0.28	-1.90	-1.80	-1.22	-0.36	-1.13
	1977-1978	-0.25	0.46	-1.99	-0.59	-1.61	1.73	-2.40	-0.76
1982, El Chichón	1982-1983	2.64	4.82	-1.25	2.07	2.45	2.48	-1.52	1.14
	1983-1984	0.83	2.53	1.73	1.70	0.20	3.58	1.32	1.70
	1984-1985	1.52	-2.87	-0.24	-0.53	1.11	-2.62	-1.36	-0.96
	1985-1986	-0.43	1.46	-4.02	-1.00	-0.77	2.72	-2.54	-0.20
1991, Pinatubo	1991-1992	1.24	0.64	3.18	1.69	-0.87	-1.67	1.86	-0.23
	1992-1993	0.21	3.91	0.11	1.41	0.97	2.13	-0.13	0.99
	1993-1994	2.17	1.28	0.07	1.17	2.97	2.30	-0.24	1.68
	1994-1995	2.86	2.70	3.13	2.90	1.63	2.02	2.31	1.99
Valors mitjans	Hivern (+1)	0.71	1.26	1.25	1.21	-0.07	0.09	0.20	0.07
	Hivern (+2)	0.30	0.90	0.86	0.68	0.66	0.55	0.50	0.57
	Hivern (+3)	0.69	-0.37	0.21	0.18	0.32	-0.26	-0.11	-0.02
	Hivern (+4)	0.98	0.98	1.53	1.16	-0.13	0.88	1.17	0.64

Taula 5.6. NAOi en els hiverns posteriors a erupcions d'origen tropical, ss. XIX i XX.

** Dada no disponible

Malauradament, encara no és disponible un índex NAO instrumental que avaluï l'impacte de la més gran erupció dels darrers 250 anys, la del volcà Tambora (1815). Amb tot, i basant-se en la reconstrucció de *Luterbacher et al.*, es pot comprovar com aquest sembla ser l'únic cas en el que els valors positius mitjans es perpetuen en els quatre hiverns posteriors a l'erupció.

Per a les erupcions d'elevades latituds es presenta un comportament força similar, tot i que l'escassa mostra considerada podria limitar la fiabilitat dels resultats (taula 5.7.). Així, el primer hivern post-volcànic mostra en gairebé tots els mesos valors francament elevats en ambdues fonts utilitzades, tendència que es manté tot i que de forma més moderada en el segon i tercer hivern. Com a mostra d'aquesta tendència, en el primer hivern els valors del NAOi positius i superiors a 1.0 són pràcticament generals en la reconstrucció realitzada per *Jones et al.* [1997] mentre que en el segon i tercer hivern ja apareixen, per bé que de manera puntual, alguns valors negatius de poca entitat. Així doncs, si bé la resposta de la temperatura davant d'aquest tipus d'erupcions s'ha constatat com de curta durada, els efectes sobre el patró NAO semblarien adquirir una influència temporal més àmplia.

Erupcions de latituds elevades	Hiverns post- volcànics	NAOi (Jones <i>et al.</i> , 1997)				NAOi (Luterbacher <i>et al.</i> , 2002)			
		Des.	Gen.	Feb.	Mitjana hivernal	Des.	Gen.	Feb.	Mitjana hivernal
1875, Askja	1875-1876	0.08	1.10	0.75	0.64	-1.16	-0.09	-0.02	-0.42
	1876-1877	-1.13	2.39	1.96	1.07	-1.12	0.78	0.87	0.18
	1877-1878	2.16	1.18	2.20	1.85	1.41	0.81	0.44	0.89
	1878-1879	-3.31	-0.71	0.85	-1.06	-3.21	-1.63	0.68	-1.39
1907, Ksudach	1907-1908	1.18	0.64	1.98	1.27	0.75	0.58	1.67	1.00
	1908-1909	1.47	1.82	-0.54	0.92	1.46	0.97	-0.49	0.65
	1909-1910	-0.48	2.57	3.85	1.98	-2.12	1.85	3.24	0.99
	1910-1911	-0.10	0.82	2.05	0.92	-0.24	0.36	0.48	0.20
1912, Novarup.-Katmai	1912-1913	3.00	1.83	1.19	2.01	2.21	0.93	-0.11	1.01
	1913-1914	1.23	0.58	2.45	1.42	0.02	-0.68	2.08	0.47
	1914-1915	2.23	0.08	1.82	1.38	1.33	1.10	1.32	1.25
	1915-1916	-0.65	3.82	2.03	1.73	-1.87	1.81	2.11	0.68
1929, Komagatake	1929-1930	3.80	1.51	-0.60	1.57	2.46	2.12	-0.76	1.27
	1930-1931	1.21	-0.09	1.29	0.80	1.98	0.01	1.64	1.21
	1931-1932	0.77	3.47	-3.31	0.31	-0.45	0.91	-8.92	-2.82
	1932-1934	1.22	1.41	-1.81	0.27	-0.02	0.86	-1.92	-0.36
1956, Bezymianny	1956-1957	2.57	2.53	1.08	2.06	1.60	1.50	-0.10	1.00
	1957-1958	-0.12	0.37	-0.03	0.07	1.30	-0.16	-1.89	-0.25
	1958-1959	-1.70	-1.15	2.46	-0.13	-0.23	-2.49	0.75	-0.66
	1959-1960	1.98	-0.70	-1.00	0.09	2.41	-2.00	-2.27	-0.62
Valors mitjans	Hivern (+1)	2.13	1.52	0.88	1.51	1.17	1.01	0.14	0.77
	Hivern (+2)	0.53	1.01	1.03	0.86	0.73	0.18	0.44	0.45
	Hivern (+3)	0.60	1.23	1.40	1.08	-0.01	0.44	-0.63	-0.07
	Hivern (+4)	-0.17	0.93	0.42	0.39	-0.59	-0.12	-0.18	-0.30

Taula 5.7. NAOi en els hiverns posteriors a erupcions de latituds elevades de l'HN, ss. XIX i XX.

Els resultats aportats per aquest senzill estudi semblarien doncs confirmar les troballes del previ anàlisi EOF per a les erupcions tropicals. Així, la fase positiva que es desprenia del patró espacial associat als EOF1 dels mesos de gener (+1) i febrer (+1), coincideix plenament amb els elevats índexs NAO positius mostrats en aquest apartat i reforçat pels valors excepcionals de persistència indicats pel percentatge de variabilitat representada pels EOF1. Igualment, en el tercer hivern, el gener (+3) tornava a aparèixer com a anòmal des del punt de vista del percentatge del primer mode de variabilitat. La seva representació espacial es podia associar a un patró NAO negatiu, fet també confirmat per l'anàlisi dut a terme en aquest apartat. Els mecanismes que explicarien aquesta permanència d'índexs NAO positius en els dos primers hiverns posteriors a erupcions tropicals i que, per tant, indicarien un reforçament dels vents de l'oest sobre les latituds més elevades d'Atlàntic Nord, ja han estat explicats anteriorment (apartat 5.1).

Menys coneguts són els mecanismes que podrien explicar els elevats valors del NAOi posteriors a erupcions de latituds elevades. Respecte a aquest fet, *Lamb* [1970, pàg. 488] va detectar un reforçament de la circulació sobre el sector de l'Atlàntic Nord amb un apreciable component meridional, contraposant el seu índex DVI i les incipients dades de pressió atmosfèrica disponibles des del segle XVIII en aquest sector. En el mateix sentit són les conclusions d'*Ammann* [2001, pàg. 246] fent especial atenció a la durada del senyal volcànic sobre la circulació atmosfèrica, molt més àmplia del que es podria esperar del temps de residència dels aerosols a l'atmosfera. Així, suggereix que les erupcions volcàniques podrien provocar no només un senyal espacial sobre les àrees influenciades per modes similars al del patró NAO, sinó que també podrien generar un cert efecte de reajustament en la seva oscil·lació, i influenciar el clima més enllà de la perturbació inicial. Ambdues teories topen amb l'escàs nombre de casos i les dificultats de la modelització d'aquest tipus de forçament.

En l'apartat de discussió i conclusions (capítol sisè) es tractarà la relació entre els resultats aportats en aquest apartat i els assenyalats en els dos previs, la resposta tèrmica i la precipitació.

CONCLUSIONS CAPÍTOL 5

El forçament sobre la radiació és la principal incidència climàtica que provoquen erupcions volcàniques de gran magnitud. Paral·lelament però es desencadenen d'altres processos de naturalesa dinàmica que generen modificacions en la circulació atmosfèrica sobre l'Hemisferi Nord i especialment durant els hiverns posteriors a erupcions tropicals. En aquest capítol, s'han analitzat amb detall en què consisteixen aquestes alteracions.

- Mitjançant l'ús de l'Anàlisi per Components Principals, s'han pogut detectar canvis en la persistència de determinats patrons en superfície sobre l'àrea del continent europeu. En aquest sentit, els mesos de gener, març i juny dins del primer any post-eruptiu presenten elevats valors de variances de la primera component.
- Dels referits mesos, el mes de gener és el més excepcional de tots, amb un elevat valor de variances de la primera component. El patró espacial associat mostra un fort flux de l'oest sobre l'Europa continental, amb un reforçament evident de l'anticicló subtropical. Aquesta morfologia és consistent amb treballs previs que detectaven un escalfament hivernal en els períodes post-volcànics.
- Els mesos estiuencs, a diferència dels hivernals, tendeixen a mostrar una més gran variabilitat. Així, els patrons principals perden pes en favor dels patrons secundaris. L'única excepció és el mes de juny dins del primer any post-eruptiu on s'insinua una major persistència dels fluxos del sud-oest sobre la façana occidental del continent europeu.
- Tenint en compte que les principals modificacions de circulació es donen a l'hivern, s'ha dut a terme un estudi de la resposta del patró NAO en els períodes afectats per vulcanisme. Així, s'ha pogut constatar que els dos primers hiverns presenten una major freqüència d'índexs NAO positius, per després passar a un tercer any amb una major profusió d'índexs negatius. Per a erupcions de latituds elevades tendeix a repetir-se el mateix patró.

