



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 3 – EL FORÇAMENT VOLCÀNIC I LA TEMPERATURA

3.1. L'ESTAT DE LA QÜESTIÓ

La temperatura de l'aire superficial és, juntament amb la pressió atmosfèrica, un dels paràmetres més agraïts per a la realització d'estudis climàtics. La seva naturalesa i propietats el fan una component fàcilment regionalitzable, permetent que els resultats de qualsevol investigació sobre els canvis en la seva evolució temporal adquireixin un abast espacial ampli.

En les darreres dècades, els registres de temperatura de cobertura global i/o hemisfèrica han millorat ostensiblement [Jones, 1994; Jones et al., 1986, 1999a]. S'han pogut recuperar sèries d'àrees geogràfiques inicialment sense cobertura, d'altres s'han sotmès a rigorosos anàlisis d'homogeneïtat i d'altres han assolit una major cobertura temporal. Paral·lelament, les observacions fetes sobre els oceans han estat progressivament incorporades als registres sobre terra ferma [Parker et al., 1995], fent que la fiabilitat dels estudis sobre el canvi climàtic a escala global hagi augmentat clarament.

Els suposats efectes del vulcanisme sobre la temperatura superficial del planeta fou un aspecte que rebé l'atenció de la comunitat científica cap a finals de la dècada de 1960 i inicis de la dècada següent, coincidint amb el període de la Guerra Freda [Budyko, 1969; Yamamoto et al., 1975; Oliver, 1976; Taylor et al., 1980; Self et al., 1981]. Aquesta coincidència no és pas gratuïta, doncs es creia que els efectes d'una guerra nuclear, el conegut hivern nuclear, eren similars als provocats per erupcions volcàniques de gran magnitud [Sagan & Turco, 1990]. Malauradament, tots aquests estudis havien d'afrontar el problema de l'escassa cobertura de les dades i els problemes d'homogeneïtat lligats a ells, fent que els resultats obtinguts tinguessin una fiabilitat relativa. Kelly & Sear [1984] varen ser els primers en utilitzar una xarxa d'observacions prou àmplia, però cobrint només les àrees continentals i amb evidents problemes d'homogeneïtat. Posteriorment, Bradley [1988] utilitzà una nova font de dades de temperatura homogènia per a l'HN dissenyada per Jones et al. [1986], i detectà un descens tèrmic significatiu a l'estiu i a la tardor posteriors a grans erupcions. També va poder concloure que les latituds mitjanes eren les zones més sensibles, doncs responien tant per a erupcions de baixes latituds com per a les d'elevades latituds del seu corresponent hemisferi. Resultats similars obtingueren Sear et al. [1987], incloent en

aquest cas dades d'àrees oceàniques, mentre que *Mass & Portman* [1989] examinaren els efectes sobre la temperatura global, un cop extret l'efecte destorbador d'una coneguda font de variabilitat inter-anual: *El Niño / Southern Oscillation (ENSO)*. Respecte a aquest fenomen, s'ha discutit si la coincidència de El Niños i vulcanisme explosiu era un aspecte purament aleatori o ambdós estaven relacionats d'alguna manera. En aquest sentit, *Handler* [1986], *Parker* [1988] i *Handler & Andsager* [1990] suggeriren que com a mínim des de l'any 1860, erupcions volcàniques tropicals havien estat seguides per fenòmens El Niño, tot indicant una possible relació de causa i efecte. Sorprenentment, *Nicholls* [1988] suggerí una teoria inversa, és a dir, que els fenòmens ENSO precedien erupcions a la franja equatorial. Ambdues possibilitats foren refusades per estudis posteriors, donant suport a la teoria de la coincidència per atzar, ja que es tracta de dos mecanismes que tenen una recurrència temporal similar [*Robock et al.*, 1995; *Self et al.*, 1997; *Ammann*, 2001] i també a l'escassa mostra de casos. Deixant aquesta teoria de banda, sí que és cert que el refredament a escala global induït pel vulcanisme pot quedar esmorteït per la coincidència d'un fenomen ENSO, fet que va quedar palès després de les erupcions de El Chichón i Pinatubo [*Wigley*, 2000].

L'erupció del volcà filipí Pinatubo, el juny de 1991, generà un veritable allau d'estudis sobre les conseqüències del vulcanisme sobre la temperatura global, tant des del punt de vista de la magnitud del senyal, com des del punt de vista de la seva distribució espacial [*Hansen et al.*, 1992; *Kelly et al.*, 1994; *McCormick et al.*, 1995; *Robock & Mao*, 1995; *Jones & Kelly*, 1996; *Parker et al.*, 1996; *Jia & Kelly*, 1996]. Les conclusions d'aquests estudis indicaren que la temperatura mitjana global del planeta es reduí en aproximadament 0.5°C a la superfície i 0.6°C a la troposfera, en alguns mesos de mitjans de 1992. Malgrat tot, a escala regional es detectaren respostes de diferent magnitud i fins i tot de signe oposat. Així, *Groisman* [1992] i *Robock & Mao* [1992] detectaren anomalies positives significatives de temperatura a bona part del centre d'Europa i del nord-est dels EEUU durant els dos hiverns posteriors a les erupcions dels volcans El Chichón i Pinatubo. També *Kelly et al.* [1996] identificaren la resposta espacial de la temperatura i dels camps de pressió en superfície davant d'erupcions històriques, localitzant un major refredament sobre les àrees continentals i sobre el nord-est de Nord Amèrica i el nord i el centre d'Àsia durant la meitat càlida de l'any (figura 3.1.). Mecanismes dinàmics desencadenats per erupcions tropicals explicarien aquesta distribució i l'escalfament hivernal, i seran tractats amb detall en el tema cinquè.

A nivell de la Península Ibèrica, són molt escassos els estudis referents a les possibles conseqüències tèrmiques del vulcanisme explosiu. *Barriandos & Gómez* [1997] analitzaren la incidència de sis grans erupcions sobre la sèrie de temperatura de Barcelona, pel període 1780-1994. Les conclusions del treball foren que el senyal volcànic era difícilment detectat, tot i que la presència de problemes d'homogeneïtat i de continuïtat en la sèrie podrien posar en dubte els resultats obtinguts. En un estudi posterior, *Prohom* [2001] va detectar el senyal del vulcanisme explosiu sobre la temperatura mitjana de la Península Ibèrica pel període 1856-1998, establint-lo amb una durada d'uns dos a tres anys. Malgrat tot, en aquest article les erupcions considerades varen ser agrupades en funció de la seva localització en erupcions de l'HN i de l'HS, és a dir, barrejant erupcions de latituds elevades i tropicals. Aquest criteri podria limitar la fiabilitat dels resultats o, si més no, fer que aquests no siguin del tot interpretables.

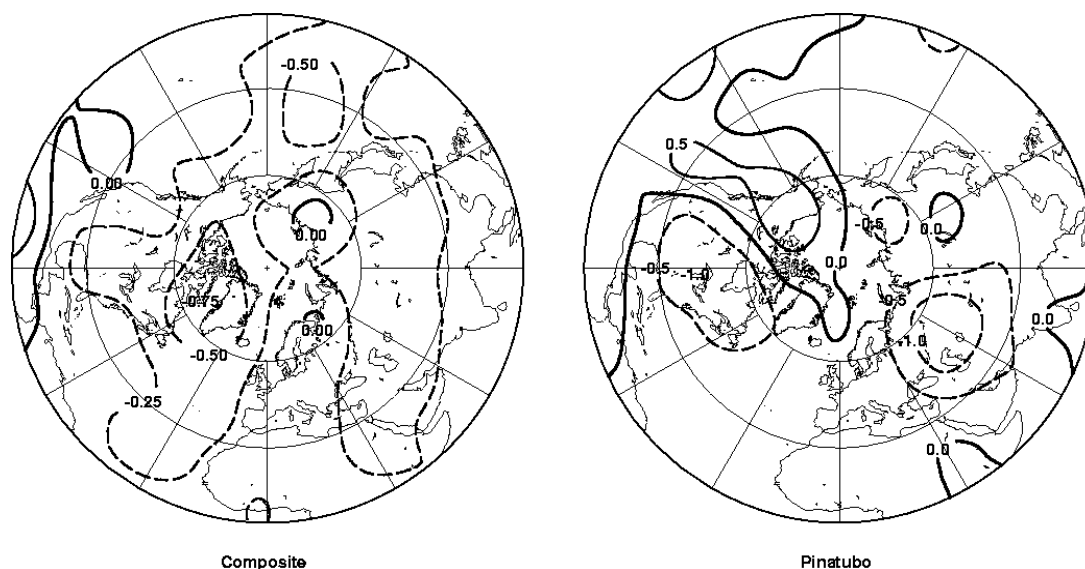


Figura 3.1. Distribució de les anomalies de temperatura mitjana estival (març-octubre) sobre l'HN en els primers dos anys després de quatre grans erupcions tropicals (esquerra) i l'erupció del Pinatubo (dreta). Font: *Kelly et al.*, [1996]

A manera de resum, la taula 3.1. suposa un ampli recull dels estudis més rellevants que s'han dut a terme a les dècades de 1980 i 1990 i sempre a escales global i/o hemisfèrica. Tot i la diversitat dels treballs exposats, es poden assenyalar unes conclusions comunes:

- Després d'una erupció de gran magnitud, el descens tèrmic global oscil·la entre 0.2 i 0.4°C, essent l'estiu i la tardor les estacions més sensibles.

- La localització de l'erupció determinarà l'extensió del refredament i la velocitat de la seva resposta. Així, les erupcions tropicals tenen una incidència global, mentre que les localitzades a latituds elevades deixen un senyal només perceptible a l'hemisferi d'origen, essent el senyal immediat, molt pronunciat però de curta durada.
- La magnitud, i fins i tot, el signe de la resposta tèrmica varia en funció de l'àrea geogràfica i l'estació de l'any. Així, durant els dos primers hiverns posteriors a una gran erupció tropical, es percep un escalfament sobre les àrees continentals del nord-est dels EEUU i Euràsia⁴, mentre que un refredament és evident a la mateixa època al Nord d'Àfrica i sud-oest d'Àsia (veure figura 3.2).

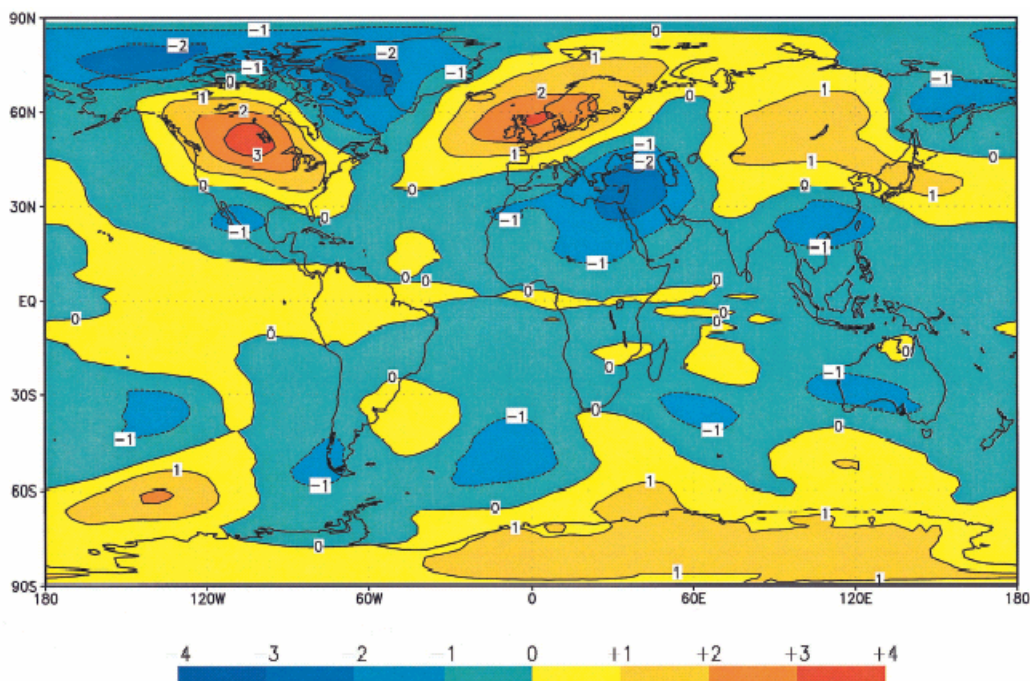


Figura. 3.2. Anomalies de temperatura a la baixa troposfera (període de referència 1984-1990), durant l'hivern boreal (Desembre-Gener-Febrer) de 1991-1992, és a dir, el primer posterior a l'erupció del Pinatubo. El patró espacial és molt semblant al detectat prèviament en d'altres grans erupcions tropicals, escalfament sobre Nord Amèrica, Europa septentrional i Sibèria, i refredament sobre Alaska, Grenlàndia, l'Orient Mitjà i la Xina. Font: *Robock* [2000]

La varietat en la magnitud i en el patró espacial i temporal de la resposta tèrmica, justifiquen doncs els estudis a escala regional. En els següents apartats l'objectiu serà determinar com respon globalment la temperatura mitjana de la Península Ibèrica al forçament volcànic, esbrinar si es detecta un determinat patró espacial i/o temporal, i si les temperatures màximes i mínimes experimenten un comportament diferenciat.

⁴ Per Euràsia s'entén la regió geogràfica formada per l'Europa més oriental i l'Àsia central més occidental.

Referència	Paràmetre	Període	Àrea geogràfica	Erupcions incloses	Metodologia	Conclusions
Self <i>et al.</i> [1981]	Temp. mitjana anual superficial (2384 estacions)	1755-1978 (pre-1870 poc fiable)	Àrees continentals d'ambdós hemisferis	5 erupcions tropicals i 4 extra-tropicals (VEI=5)	Anomalies de temperatura	- Després d'erupcions tropicals, el descens tèrmic és d'entre 0.2 i 0.5°C en funció de la franja latitudinal. - La durada de l'efecte oscil·la entre 1 i 5 anys.
Sear & Kelly [1982]	Temp. mitjana mensual superficial	1881-1980	Àrees continentals de l'HN	El Chichón (4, 1982)	Anàlisi d'Èpoques Superposades	- Es detecta un refredament màxim en el segon mes després de l'erupció (~0.2°C), recuperant-se les temperatures a finals de l'any 1982.
Kelly & Sear [1984]	Temp. mitjana mensual superficial (malla, 10°long. x 5°lat.)	1881-1980	Àrees continentals de l'HN	9 erupcions de VEI ≥ 4 separades, 5 HN i 4 HS	Anàlisi d'Èpoques Superposades	- Per a erupcions de l'HN, el descens és immediat i marcat, recuperant-se progressivament (~0.4°C). - Per a erupcions de l'HS, el descens és més retardat, essent més evident en el segon any (~0.2°C).
Parker [1985]	Temp. mitjana mensual superficial	1881-1980	Àrees continentals i oceàniques de l'HN	9 erupcions de VEI ≥ 4 separades, 5 HN i 4 HS	Anàlisi d'Èpoques Superposades	- No hi ha evidències clares d'un descens tèrmic després de grans erupcions.
Sear <i>et al.</i> , [1987]	Temp. mitjana mensual superficial (malla, 10°long. x 5°lat.) (?)	1881-1980	Àrees continentals i oceàniques d'ambdós hemisferis	9 erupcions de VEI ≥ 4 separades, 5 HN i 4 HS	Anàlisi d'Èpoques Superposades	- Erupcions de l'HN tenen un efecte immediat sobre la temperatura d'aquest mateix hemisferi, però cap efecte sobre l'HS. - Erupcions de l'HS afecten als dos hemisferis, amb un decalatge de 6 a 12 mesos.
Bradley [1988]	Temp mitjana mensual superficial (malla, 10°long. x 5°lat.)	1851-1981	Àrees continentals de l'HN	55 erupcions de VEI ≥ 4 localitzades entre la latitud 8°S i 90°N	Anàlisi d'Èpoques Superposades	- Grans erupcions (VEI 5 o 6) provoquen un descens tèrmic en els 2-3 anys posteriors, de ~0.4°C. - L'estiu i la tardor són les estacions més sensibles i l'hivern no mostra senyal. - La latitud de l'erupció determina l'extensió del descens tèrmic.

Taula 3.1. Recull d'estudis sobre la incidència del vulcanisme sobre la temperatura.

Referència	Paràmetre	Període	Àrea geogràfica	Erupcions incloses	Metodologia	Conclusions
Mass & Portman [1989]	Temp. mitjana mensual superficial (àrees oceàniques de 2°long. x 2°lat.)	1873-1985	Àrees continentals i oceàniques d'ambdós hemisferis	6 erupcions tropicals i 3 extra-tropicals de VEI ≥ 4	Anàlisi d'Èpoques Superposades	<ul style="list-style-type: none"> - Hi ha un descens tèrmic global post-volcànic de ~0.3°C, més evident extraient l'efecte ENSO. - No hi ha una relació clara magnitud de l'erupció i magnitud del descens. - El descens tèrmic és immediat, fins i tot, anterior a l'erupció. - No relació ENSO-vulcanisme.
Cress & Schönwiese [1992]	Temp. mitjana mensual superficial i a l'estratosfera	1880-1984 1958-1984	Àrees continentals i oceàniques d'ambdós hemisferis	3 erupcions tropicals i 3 extra-tropicals	Anàlisi de correlació i model de regressió múltiple	<ul style="list-style-type: none"> - El màxim senyal es detecta a l'estiu i a les latituds mitjanes i elevades, mentre que és menys evident a l'hivern i a les baixes latituds. - L'HS no mostra un refredament massa pronunciat.
Groisman [1992]	Temperatura mitjana mensual superficial (30 estacions)	1880-1992 (aprox)	Europa i nord-est dels EEUU	3 erupcions: Krakatau, El Chichón i Pinatubo	Anomalies de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> - La resposta tèrmica presenta un patró espacial i estacional similar. - Es detecten anomalies negatives en els dos o tres anys post-eruptius al NE dels EEUU i a l'est d'Europa. - Anomalies positives significatives es detecten en els dos o tres hiverns post-eruptius al centre de Rússia.
Robock & Mao [1992]	Temp. mitjana mensual hivernal superficial (5°long x 5°lat.)	1866-1992	Àrees continentals i oceàniques de l'HN	6 erupcions tropicals i 6 extra-tropicals amb VEI ≥ 5 o DVI ≥ 250	Anomalies de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> - Per a erupcions tropicals, el patró durant el primer hivern post-eruptiu assenyala un escalfament sobre Euràsia i Nord Amèrica, i un refredament sobre l'Orient Mitjà, en ambdós casos estadísticament significatius. - El mateix patró es presenta en el segon hivern posterior a erupcions d'elevada latitud.

Taula 3.1. (continua)

Referència	Paràmetre	Període	Àrea geogràfica	Erupcions incloses	Metodologia	Conclusions
Robock & Mao [1995]	Temp. mitjana mensual superficial (5°long x 5°lat.)	1854-1993	Àrees continentals i oceàniques d'ambdós hemisferis	5 erupcions tropicals i 1 d'extra-tropical amb VEI ≥ 6 o DVI ≥ 600	Anàlisi d'Èpoques Superposades	<ul style="list-style-type: none"> - Un cop estret l'efecte de l'ENSO, s'aprecia un refredament global de 0.1°-0.2°C, essent de 0.3°C durant l'estiu a la franja 30°-60°N. - Durant el primer hivern després d'erupcions tropicals es detecta un escalfament a Nord Amèrica i Euràsia i un refredament de més de 0.5°C al nord d'Àfrica i al sud-oest d'Àsia. - L'ENSO es confirma com a un element que emmascara el senyal volcànic.
Jones & Kelly [1996]	Temp. mitjana mensual superficial (5°long x 5°lat.)	1854-1993	Àrees continentals i oceàniques d'ambdós hemisferis	4 erupcions tropicals + Pinatubo	Anàlisi d'Èpoques Superposades	<ul style="list-style-type: none"> - Es detecta un descens tèrmic global de ~0.2°C en els 1-2 anys posteriors a les erupcions. - El patró espacial mostra àrees especialment sensibles: est de Nord-Amèrica, el centre i est d'Àsia, l'Orient Mitjà, l'est d'Àfrica i l'Atlàntic més oriental - La magnitud i el patró espacial indicat, es mantenen per l'erupció del Pinatubo.
Jia & Kelly [1996]	Temp. mitjana mensual superficial (5°long x 5°lat.)	1854-1993	Àrees continentals i oceàniques d'ambdós hemisferis	5 erupcions tropicals i 3 extra-tropicals amb VEI ≥ 5 o DVI ≥ 500	Anàlisi de Components Principals i Anàlisi d'Èpoques Superposades	<ul style="list-style-type: none"> - La temperatura global és sensible a l'impacte volcànic però essent aquest de magnitud modesta. - Comparat amb l'ENSO, el senyal del vulcanisme és molt més feble - La cobertura espacial de les dades no és suficient abans de 1954.

Taula 3.1. (continua)

Referència	Paràmetre	Període	Àrea geogràfica	Erupcions incloses	Metodologia	Conclusions
Parker <i>et al.</i> , [1996]	Temp. mitjana mensual superficial (5°long x 5°lat.)	1990-1994	Àrees continentals i oceàniques d'ambdós hemisferis	Pinatubo (6, 1991)	Anomalies de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> - S'observa un descens de 0.5°C en la temperatura global superficial durant els mesos estivals de 1992, i molt més modest l'estiu de 1993 - Els hiverns de 1991-92 i 1992-93 foren relativament càlids en superfície. - Al conjunt de la troposfera, el descens màxim és de 0.6°C durant l'estiu de 1992.

Taula 3.1. (continua)

Font: Elaboració pròpia a partir de diferents fonts.

3.2. METODOLOGIA: L'ANÀLISI D'ÈPOQUES SUPERPOSADES (AES)

En aquest apartat, es valorarà la incidència del vulcanisme de gran magnitud sobre la temperatura de la Península Ibèrica i les Illes Balears. Per a dur a terme aquest objectiu, s'utilitzarà un mateix mètode però dues fonts de dades diferents. La primera d'elles permetrà establir la resposta de la temperatura mitjana en el conjunt de l'àrea peninsular pel període 1856-1998, mentre que l'altre s'utilitzarà per a detectar possibles comportaments espacials, així com la resposta de les temperatures màximes i mínimes per separat, en ambdós casos pel període 1901-1995.

Donada la complexitat dels mecanismes que regeixen el sistema climàtic és extremadament difícil establir relacions de causa i efecte sense que aquestes plantegin dubtes. Establir una clara relació entre erupcions volcàniques i la resposta climàtica és doncs un aspecte estadísticament problemàtic.

L'Anàlisi d'Èpoques Superposades (AES) és un mètode dissenyat per a reduir el soroll en una sèrie temporal que és afectada per diversos factors de forçament i per a indicar-ne la resposta mitjana [*Panofsky & Brier*, 1965]. Aquesta metodologia ha estat àmpliament utilitzada per a detectar la resposta mitjana de la temperatura al forçament volcànic (veure taula 3.1.) i també serà emprada en aquest estudi. Utilitzar la mateixa metodologia permetrà comparar amb més fiabilitat els resultats obtinguts a escala peninsular amb els obtinguts a escales global o hemisfèrica. Molt sovint, l'ús d'aquest mètode és preferible a d'altres, com per exemple l'anàlisi espectral, donada la naturalesa més o menys periòdica del fenomen i el petit senyal que genera comparat amb el soroll de fons [*Hartmann*, 2003, pàg. 29]. L'AES consisteix, bàsicament, en la selecció d'un nombre determinat de dates clau, corresponents cadascuna d'elles a una erupció volcànica, i posteriorment es comparen els períodes posterior i anterior a aquestes. En aquest anàlisi, i en treballar a resolució mensual, s'ha escollit una finestra de seixanta mesos (cinc anys) abans i després de la data clau o mes zero. Aquest procediment permetrà obtenir una estimació del canvi en la temperatura després de la data clau respecte a les condicions precedents. La data clau pot estar localitzada en un període que presenti una clara tendència tèrmica ascendent (per exemple a les dècades de 1980 i 1990) o bé descendent (darreres dècades de la Petita Edat del Gel), per això és convenient l'estandardització prèvia de les dades respecte a un període de referència. Referent a la selecció de la data clau, és possible seguir dos procediments; escollir el mes exacte de l'erupció (quan això és possible) o bé el mes de gener de l'any de

l'erupció. El primer criteri permet observar amb més claredat la velocitat de resposta, mentre que el segon pot detectar possibles comportaments estacionals. La figura 3.3. mostra esquemàticament el funcionament del mètode AES:

- (a) Es parteix d'una finestra de 120 mesos, compostos per seixanta mesos previs a la data clau i seixanta de posteriors.
- (b) Per al càlcul de l'anomalia del mes 0, es selecciona el valor estandarditzat respecte al període 1961-90 corresponent a l'esmentat mes i se li resta la mitjana dels valors estandarditzats corresponents als mateixos mesos dels cinc anys anteriors. En d'altres paraules, si es selecciona com a data clau el mes de gener de l'any d'una erupció, la mitjana s'obté a partir dels cinc mesos de gener precedents a aquell mes de gener en qüestió.
- (c) El mateix procediment s'aplicarà per a la resta de mesos, així com en aquells casos en els que es seleccionin més d'una data clau.

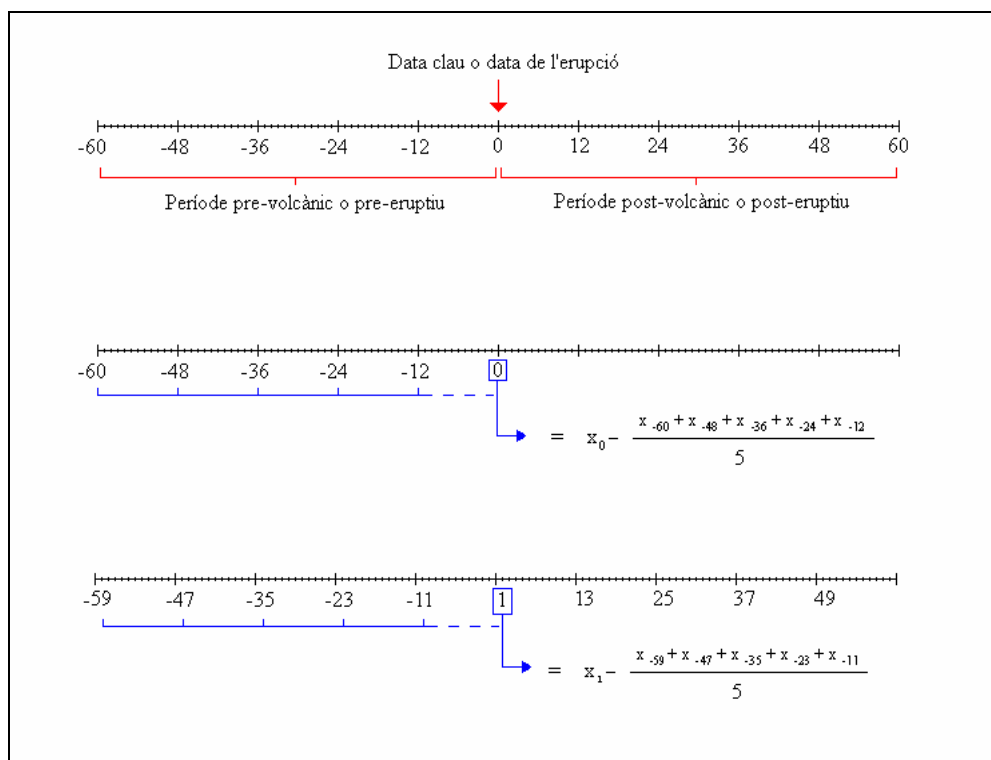


Figura 3.3. Funcionament del mètode de l'Anàlisi d'Èpoques Superposades (veure text per a més informació).

Malgrat la utilitat del mètode cal alertar d'un aspecte problemàtic lligat a la seva formulació. Quan dues erupcions estan properes en el temps, existeix el risc que la

incidència d'una d'elles es vegi afectada per la incidència de la precedent, és a dir, que els senyals es sobreposin, afavorint l'increment del soroll.

Per a la validació dels resultats obtinguts i l'estimació del nivell de significació estadística dels mateixos, s'aplica una simulació Monte Carlo [*Gentle*, 1982; *von Storch & Zwiers*, 1999], tècnica molt utilitzada en estudis climàtics per a establir les propietats de les distribucions de variables aleatòries. Aquest mètode genera una funció de probabilitat, dependent del nombre de casos a tenir en compte, a partir de la qual es pot fixar el nivell de significació. En aquest estudi, s'utilitzen 10.000 dates seleccionades a l'atzar i es fixa el nivell de significació del 5 per cent, a partir del qual les anomalies es consideren estadísticament significatives. S'ha utilitzat un test de significació d'una sola cua, doncs s'accepta que el refredament superficial és l'efecte climàtic més probable [*Newell & Deepack*, 1982].

Tot i l'àmplia acceptació, hi ha certs aspectes d'aquesta metodologia que s'han de tenir en compte a l'hora d'analitzar el resultat. Per exemple, si el que es vol és detectar la resposta d'una sèrie climàtica davant d'un conjunt d'erupcions, és possible que el resultat estigui falsejat pel pes que exerceixen una o dues associacions ben establertes. Per tant, és del tot aconsellable aplicar el mètode a cadascuna de les erupcions a analitzar i comprovar la resposta individual. Amb tot, la sensibilitat del sistema climàtic davant del forçament volcànic únicament pot ser estimat, essent la quantificació no del tot precisa.

3.3. RESPOSTA GLOBAL DE LA TEMPERATURA MITJANA MENSUAL PENINSULAR I BALEAR (1856-1998)

3.3.1. Objectiu

L'objectiu bàsic és el d'identificar la incidència de grans erupcions volcàniques sobre la temperatura mitjana peninsular, entenent a la Península Ibèrica i les Balears com a una regió geogràfica ben definida. Els resultats obtinguts es podran comparar així amb estudis ja realitzats a escales globals i hemisfèriques. Com s'ha indicat anteriorment, la data clau o data de l'erupció pot correspondre al mes de l'erupció o bé al mes de gener de l'any de l'erupció. En aquest anàlisi s'utilitzaran els dos criteris.

3.3.2. Fonts de dades

La base de dades utilitzada comprèn temperatura mitjana mensual resultat d'una combinació de sèries de temperatura sobre regions continentals i oceàniques, que es presenten en àrees (o *grid-box*) de 5° de longitud per 5° de latitud, i cobrint el període temporal 1856-1998 (per a més detalls consultar *Jones et al.* [1999a]). En aquest anàlisi, s'han escollit les dades que cobreixen l'àrea compresa entre 350°-5°E i 35°-45°N, és a dir, el sector peninsular i balear. La cobertura espacial durant tot l'interval seleccionat es pot qualificar com a òptima, tot i la presència de petits buits que en cap cas són inferiors al 75% (figura 3.4.). Els valors mensuals absoluts es varen transformar a anomalies estandarditzades (*z*) respecte al període 1961-90, per tal de disminuir el soroll de fons i es mostren a la taula 3.2.

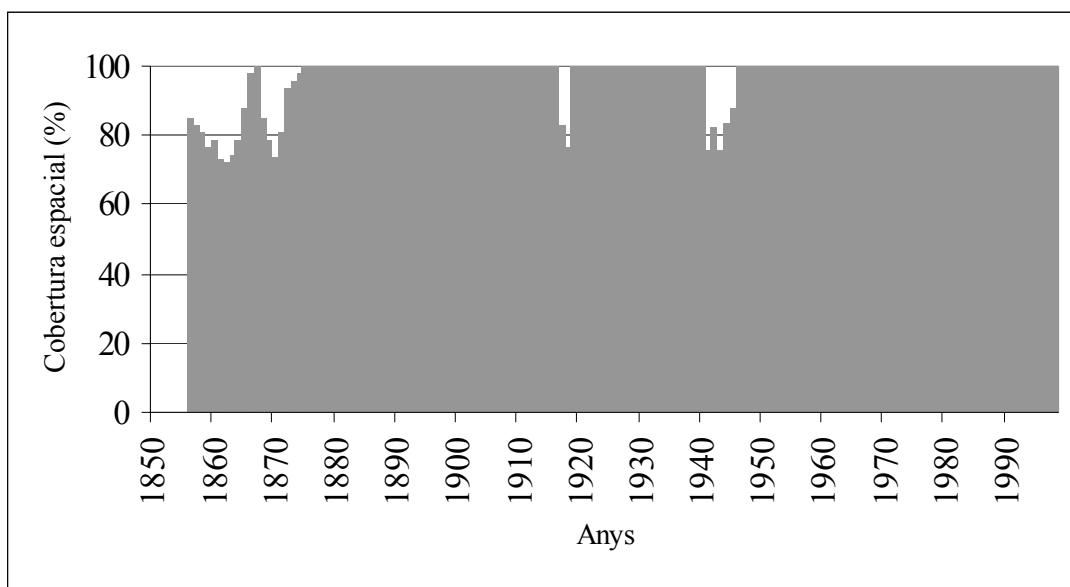


Figura 3.4. Índex anual de cobertura espacial per a l'àrea d'estudi (350°-5°E / 35°-45°N).

	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
σ	1.03	1.23	1.22	1.07	1.44	1.21	1.11	1.03	1.53	1.38	1.28	1.29

Taula 3.2. Desviacions estàndard de les anomalies mensuals de la temperatura mitjana peninsular prenent com a període de referència el trenteni 1961-90. L'àrea d'estudi està compresa entre 350°-5°E i 35°-45°N.

3.3.3. Erupcions o dates claus escollides

A la taula 2.5. (capítol 2) apareixien les erupcions volcàniques més significatives dels darrers 250 anys, però en el cas que ens ocupa i donada la cobertura temporal de la base de dades, les erupcions que s'utilitzaran es limiten a les que es mostren a la taula 3.3. Les tres erupcions de 1902, és a dir, Mt. Pelée, Soufrière i Santa María, s'han agrupat en una de sola, seleccionant com a data clau el mes d'octubre de l'esmentat any, doncs l'erupció del Santa María fou la de més magnitud. Dins de les erupcions tropicals, també s'ha inclòs l'erupció del volcà guatemalenc Fuego (1974) doncs va quedar demostrada la injecció d' SO_2 a l'estratosfera a partir de mesures instrumentals i per les nombroses evidències de postes de sol rogenques a diferents punts de l'HN [Meinel & Meinel, 1975; Volz, 1975b; Cadle et al., 1976; Gras & Laby, 1979]. En el mateix sentit, s'han inclòs dues erupcions de latituds elevades, Komagatake (1929) i Bezymianny (1956). La primera d'elles, tot i no aparèixer en la cronologia proposada pel DVI, sí que presenta un destacat pic d'acidesa en diferents registres glaciològics de Grenlàndia [Robock & Free, 1995] i s'estima que la injecció estratosfèrica d' SO_2 fou superior als 4 Tg [Ammann, 2001]. El volcà Bezymianny, tot i no emetre una quantitat excessiva de gasos rics en sofre, sí que va tenir una magnitud considerable (VEI=5).

S'ha considerat oportú agrupar les erupcions volcàniques en funció de la seva localització latitudinal, és a dir, en erupcions tropicals (entre 20°N-20°S) i extra-tropicals. Aquest criteri respon al fet que en d'altres estudis s'ha comprovat que la resposta presenta una magnitud i durada diferents. Les erupcions extra-tropicals s'han limitat a erupcions localitzades a les latituds elevades de l'HN, excloent-ne les de l'HS, doncs ha quedat demostrat en estudis previs que una erupció que té lloc a les latituds elevades d'un dels hemisferis, té únicament efectes climàtics sobre l'esmentat hemisferi, restant l'altre fora de la seva influència. Així doncs, les dates claus són sis erupcions tropicals i cinc erupcions d'elevades latituds de l'HN. Com s'ha indicat anteriorment, la data clau a escollir serà el mes de l'erupció i el gener de l'any de l'erupció.

	Lat.	Long.	Data (mes, any)	VEI	DVI	IVI*
Erupcions tropicals						
Krakatau, Indonèsia	-6.1°	105.4°E	8, 1883	6	1000	1.8
Santa Maria, Guatemala	14.8°	91.5°W	10, 1902	6	600	1.3
Agung, Indonèsia	-8.3°	115.5°E	3, 1963	4	800	0.6
Fuego, Guatemala	14.5°	90.9°W	10, 1974	4	250	0.0
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	...
Erupcions extra-tropicals						
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 3.3. Erupcions volcàniques incloses en el primer anàlisi 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].

3.3.4. Erupcions tropicals i temperatura mitjana. Resultats

A la figures 3.5. i 3.6. es mostren els resultats de l'aplicació del mètode AES per al conjunt de les sis erupcions tropicals. Pel cas de la figura 3.5., les dates claus corresponen als mesos en que es produí l'erupció, mentre que per a l'elaboració de la figura 3.6. s'han escollit els mesos de gener dels anys en què tingueren lloc les erupcions.

La figura 3.5. mostra la presència d'anomalies negatives de temperatura en els dos/tres anys posteriors a les erupcions incloses en l'anàlisi, recuperant-se a partir del mes +36. Amb tot, és possible observar dos mínims; un de molt proper a la data clau, i l'altre entre els mesos +24 i +32, aproximadament, superant-se el llindar del 5% fixat per Monte Carlo en diversos moments. Aquests resultats són molt similars als obtinguts a escales global i hemisfèrica, tant per la magnitud de les anomalies com per l'extensió temporal de l'impacte [Kelly & Sear, 1984; Sear et al., 1987; Mass & Portman, 1989; Robock & Mao, 1995; Jones & Kelly, 1996], fins i tot es repeteixen petits detalls, com ara l'escalfament experimentat entre els mesos +18 i +22 [Bradley, 1988] o el refredament previ a la data clau [Robock & Mao, 1995]. Referent a aquest darrer aspecte, els motius poden ser diversos: la petita mostra de casos considerada o bé la possible incidència d'altres fenòmens a més de l'estrictament volcànic o, fins i tot, a la sobreposició temporal d'altres erupcions de menor magnitud [Jones & Kelly, 1988; Mass & Portman, 1989].

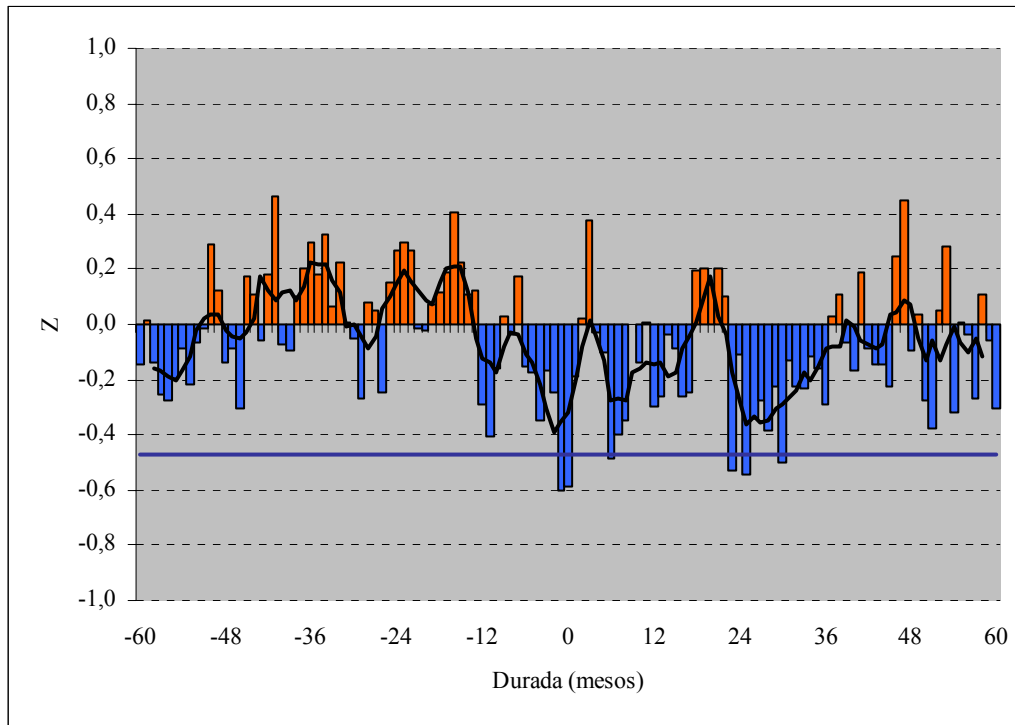


Figura 3.5. Aplicació del mètode AES a les temperatures mitjanes mensuals de la Península Ibèrica per al conjunt de les sis erupcions tropicals indicades a la taula 3.3., prenent el mes de l'erupció com a data clau. La línia horitzontal indica el nivell de significació (0.05) després de l'aplicació d'una simulació Monte Carlo (-0.47), i la corba la mitjana mòbil de període 5.

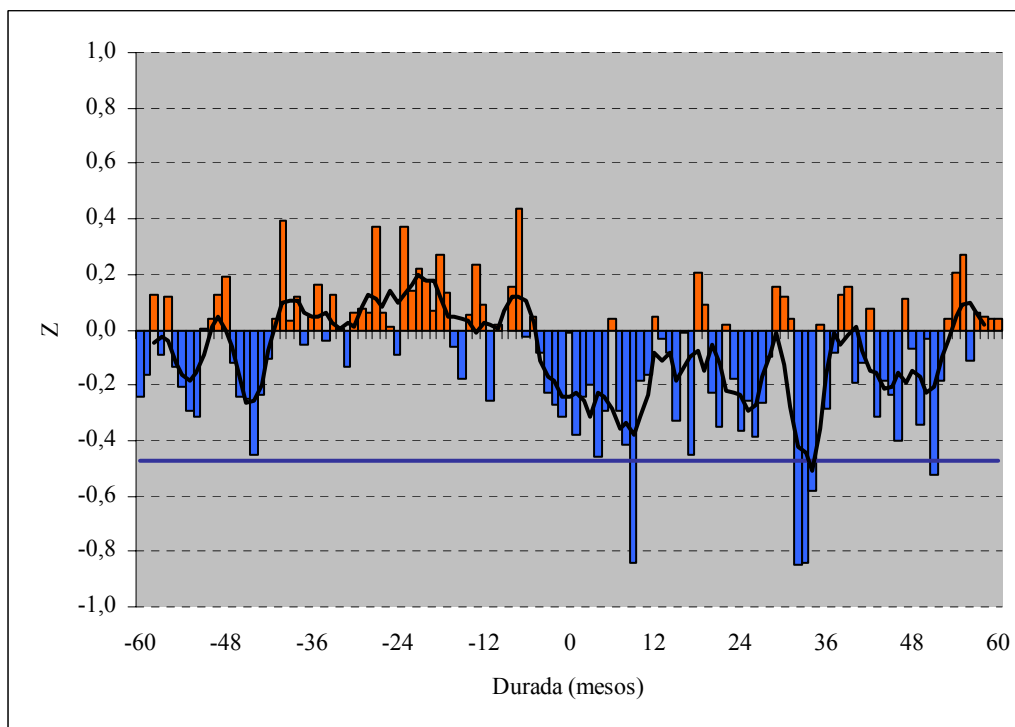


Figura 3.6. Aplicació del mètode AES a les temperatures mitjanes mensuals de la Península Ibèrica per al conjunt de les sis erupcions tropicals indicades a la taula 3.3., prenent el mes de gener de l'erupció com a data clau. La línia horitzontal indica el nivell de significació (0.05) després de l'aplicació d'una simulació Monte Carlo (-0.65), i la corba la mitjana mòbil de període 5.

La selecció del mes de gener de l'any de l'erupció permet detectar possibles comportaments estacionals en la resposta tèrmica, i amb aquest objectiu es mostra la figura 3.6. A grans trets es repeteix el mateix patró indicat a la figura anterior, tot i que pren més importància el refredament experimentat en el segon dels períodes indicats prèviament (mesos +32 a +34). Hi ha però un aspecte interessant en els resultats al voltant del mes +12, és a dir, en el primer hivern posterior a l'erupció. Després d'un mínim al mes +9 (tardor), les anomalies negatives perden consistència i fins i tot són substituïdes per positives en el mes +13, tot i que són lluny de ser estadísticament significatives. Aquest fet és present, per bé que amb major magnitud, en estudis realitzats a escala hemisfèrica (HN) i s'associen al forçament dinàmic induït per les erupcions tropicals, del qual es parlarà més endavant.

Tal i com s'ha indicat, en la formulació del mètode AES existeixen diversos aspectes que s'han de tenir en compte, doncs poden afectar als resultats finals. Així, obtenint el senyal volcànic a partir d'un conjunt d'erupcions, hi ha el perill que el pes del senyal d'una o dues erupcions emmascari o falsegi els resultats globals. Per aquest motiu és convenient aplicar el mètode AES a cadascuna de les erupcions considerades, per separat. Les figures 3.7. i 3.8. mostren precisament aquest aspecte aplicant, novament, el doble criteri en la selecció de la data clau.

Del conjunt de les sis erupcions, les del Krakatau, Santa Maria i Pinatubo són les que mostren un senyal més destacat, amb anomalies negatives mantenint-se en els mesos +12 a +36 (figures 3.7-a, 3.7-b i 3.7-f). Per contra, la resta d'erupcions tropicals no mostren un senyal clar o aquest és de durada molt breu. Aquest és el cas de l'erupció de l'Agung (figura 3.7-c) on només es detecta un descens tèrmic durant alguns mesos del segon i tercer any, envoltat de mesos amb anomalies positives apreciables. Un aspecte similar succeeix en els períodes posteriors a les erupcions dels volcans Fuego i El Chichón (figures 3.7-d i 3.7-e), on es fa difícil detectar un senyal clar, doncs la successió de períodes amb anomalies positives i negatives és constant. Potser en el cas del Fuego, hi ha una cert descens tèrmic més consistent (estadísticament significatiu) i concentrat cap als mesos +24 i +32, mentre que per a El Chichón, aquests períodes alternats són temporalment més amplis. Poden existir diversos motius que expliquin aquests resultats. La magnitud de l'erupció i la quantitat de materials gasosos rics en sofre són dos elements a tenir en compte, i en aquest sentit les úniques erupcions que assoleixen el VEI de 6 són, precisament les erupcions que provoquen una resposta tèrmica més evident. La resta d'erupcions

presenten característiques problemàtiques. Així, l'erupció de l'Agung, a part de presentar un índex VEI més modest, es localitzà a l'HS i per aquest motiu la pertorbació òptica en aquest hemisferi fou d'una magnitud clarament superior a la provocada en l'HN (τ de 0.3 enfront 0.03) [Volz, 1970; Rampino & Self, 1982; Stothers, 2001]. En conseqüència, els efectes sobre la temperatura foren molt més visibles a l'hemisferi austral i, tot i que l'HN també enregistrà l'empremta de l'erupció, aquesta fou menys important a les latituds elevades i mitjanes en comparació amb les tropicals (0°-30°N) [Robock & Mao, 1995]. De fet, Robock & Mao [1995] detectaren que a la franja de 30°-90°N, la màxima resposta es donava en el primer any, idèntic comportament al que es dona a la Península Ibèrica.

La incidència del volcà Fuego sobre la temperatura peninsular es pot considerar minsa i únicament apreciable en el tercer any. Es tracta també de l'erupció menys important de les sis i la que menys quantitat d'aerosols rics en SO₂ i H₂SO₄ va emetre. Per la seva part, l'erupció de El Chichón va comportar també un descens tèrmic d'escassa entitat. La coincidència temporal amb l'extraordinari fenomen d'El Niño de 1982/83 ha estat assenyalat com al responsable per a l'escassa o nul·la resposta apreciada en la temperatura global i de l'HN [Sear & Kelly, 1982; Mass & Portman, 1989; Robock & Mao, 1995; Jones & Kelly, 1996]. És probable doncs, que la Península Ibèrica també sigui afectada per aquest fenomen coetani, esmorteint l'efecte del vulcanisme.

La figura 3.8. permet detectar si l'efecte del vulcanisme presenta un mateix comportament temporal. En aquest sentit cal destacar que en tots els casos és possible apreciar un breu i modest episodi càlid al voltant dels mesos hivernals del primer any posterior a les erupcions (+12 i +13), mentre que hi ha una certa tendència que els darrers mesos d'estiu i de tardor de l'any de l'erupció (de +7 a +10) presentin desviacions negatives de certa entitat, aspecte ja apreciat anteriorment per Bradley [1988] (veure taula 3.1.). El cas de l'erupció del volcà Santa María seria un bon exemple de l'efecte que pot provocar la presència d'altres erupcions coetànies en els resultats. Així, l'evident refredament previ a la data clau podria atribuir-se a l'efecte de les erupcions del Mt. Pelée i Soufrière el mes de maig d'aquell mateix any, així com la prolongació del refredament dins del quart any.

Un cop vista la incidència de grans erupcions tropicals sobre la temperatura mitjana peninsular, el següent apartat avaluarà la resposta d'aquest mateix paràmetre davant d'erupcions d'elevades latituds.

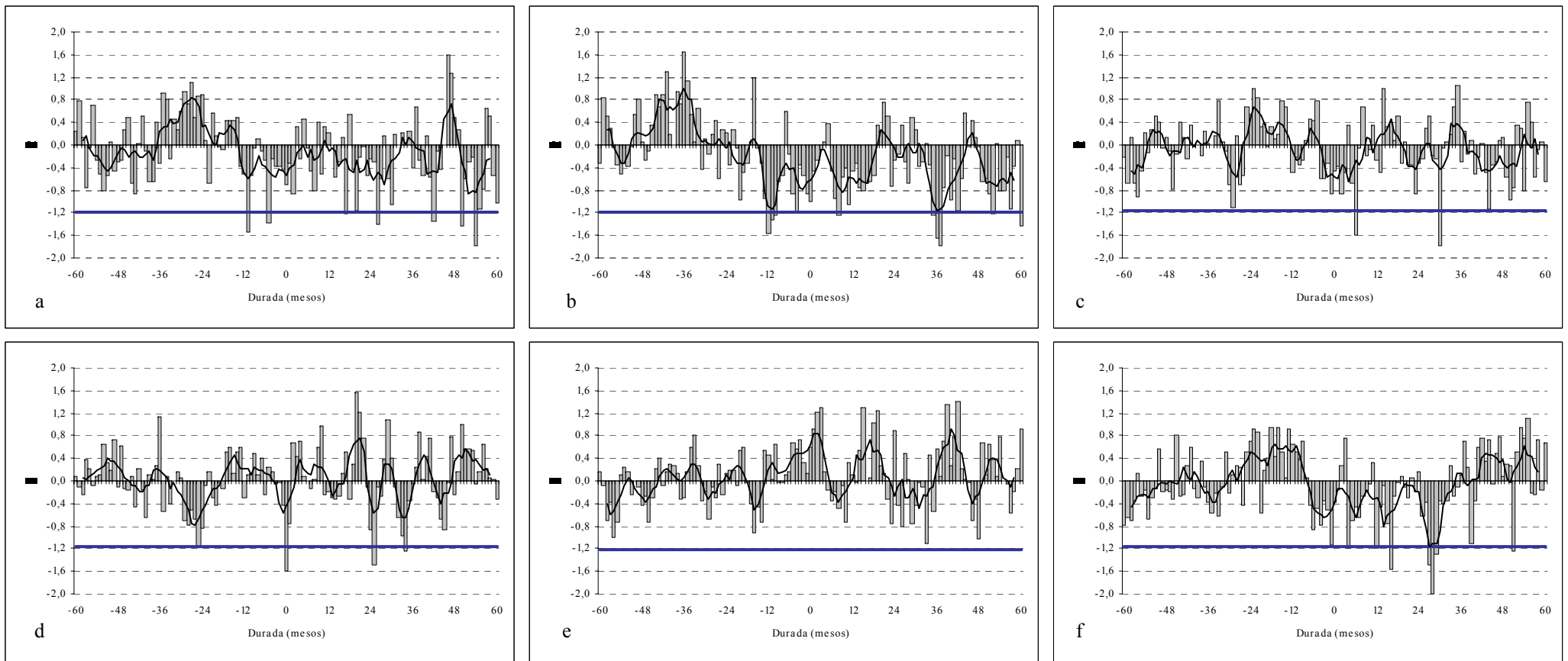


Figura 3.7. Aplicació del mètode AES a les temperatures mitjanes mensuals de la Península Ibèrica per a les sis erupcions tropicals indicades a la taula 3.3., prenent el mes de l'erupció com a data clau. Krakatau (a), Santa María (b), Agung (c), Fuego (d), El Chichón (e) i Pinatubo (f). La línia horitzontal indica el nivell de significació (0.05) després de l'aplicació d'una simulació Monte Carlo, i la corba la mitjana mòbil de període 5.

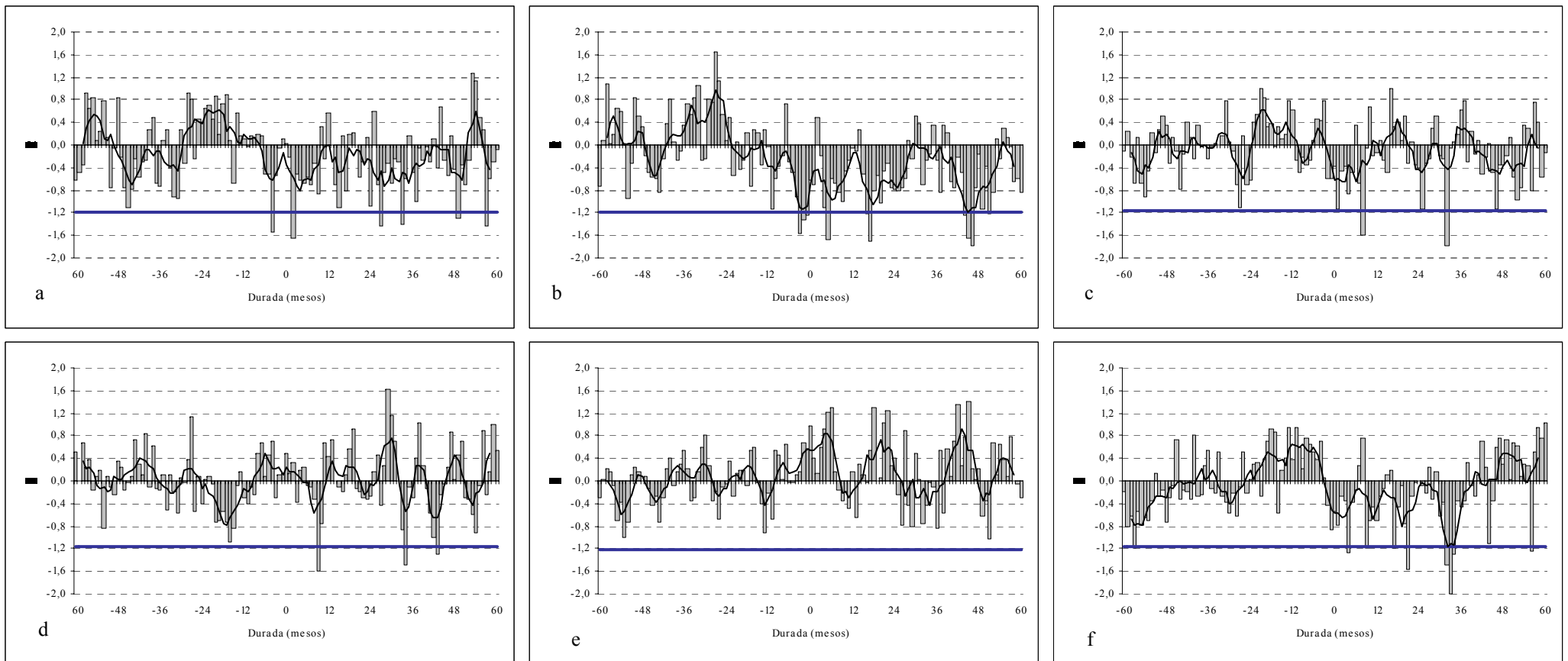


Figura 3.8. Aplicació del mètode AES a les temperatures mitjanes mensuals de la Península Ibèrica per a les sis erupcions tropicals indicades a la taula 3.3., prenent el mes de gener de l'erupció com a data clau. Krakatau (a), Santa María (b), Agung (c), Fuego (d), El Chichón (e) i Pinatubo (f). La línia horitzontal indica el nivell de significació (0.05) després de l'aplicació d'una simulació Monte Carlo, i la corba la mitjana mòbil de període 5.

3.3.5. Erupcions d'elevades latituds de l'HN i temperatura mitjana. Resultats

S'ha seguit el mateix procediment anterior per a les cinc erupcions de latituds elevades de l'HN considerades (figures 3.9. i 3.10.). Com es pot comprovar, les diferències entre ambdues figures són molt escasses, donat que les cinc erupcions es localitzen a la primera meitat de l'any. A grans trets es pot detectar que la resposta tèrmica és força immediata i la màxima anomalia es presenta en el mes +4, superant-se el nivell de significació del 5%. Amb tot, la principal diferència en relació a la incidència d'erupcions tropicals es troba en la durada del senyal. En aquest cas no va més enllà d'un any i mig, mentre que en l'anterior el període oscil·lava entre els dos i els tres anys. Pel que fa al possible comportament estacional, es fa francament difícil de detectar per la localització temporal tant propera dels cinc casos (de març a juny). Malgrat tot, sembla que l'estiu de l'any de l'erupció és l'estació més afectada, i amb menys mesura la primera primavera posterior. Aquest aspecte fou apreciat també per *Bradley* [1988], qui aplicant la mateixa tècnica i seleccionant les mateixes erupcions (però exclouent la de l'Askja), va detectar un descens tèrmic de 0.5°C a les latituds mitjanes de l'HN (20°-45°N) entre maig i setembre del mateix any de l'erupció. Com en el cas de les erupcions tropicals, el primer hivern post-eruptiu sembla mostra un breu i modest període càlid, en aquest cas en els mesos de gener, febrer i març. Les causes d'aquest fet es podrien atribuir a modificacions de naturalesa dinàmica, similars potser als processos desencadenats per erupcions tropicals. Ambdós aspectes seran tractats en més detall en el cinquè capítol.

Donades les limitacions del mètode AES, s'ha considerat oportú aplicar el procediment a cadascuna de les erupcions per tal de detectar conductes comunes.

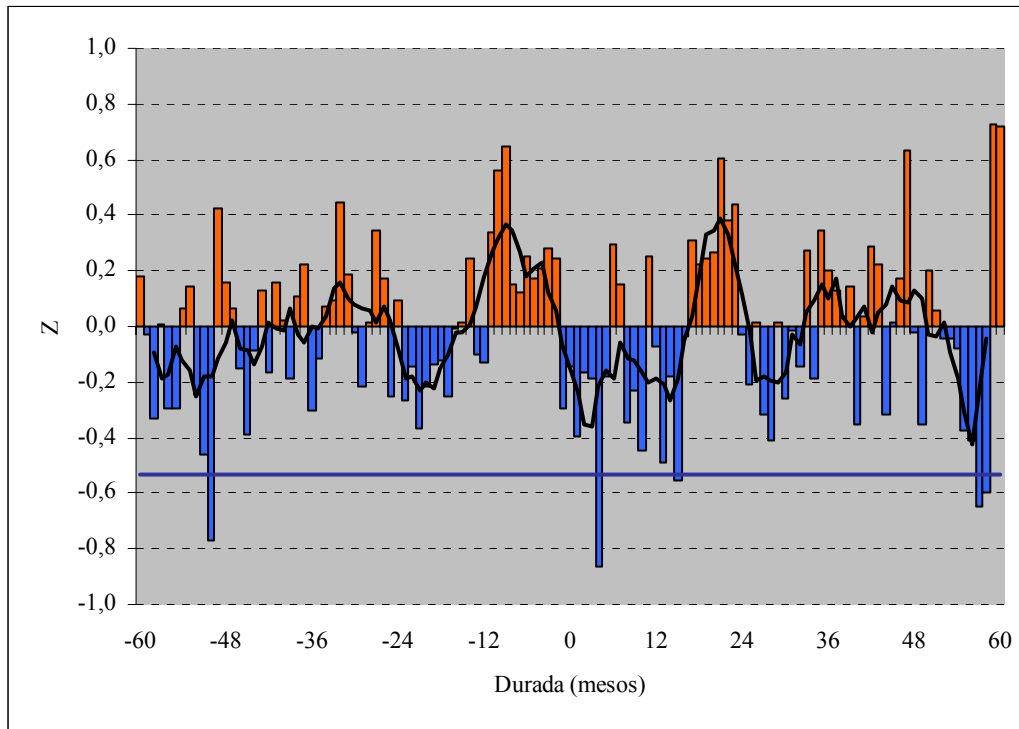


Figura 3.9. Aplicació del mètode AES a les temperatures mitjanes mensuals de la Península Ibèrica per al conjunt de les cinc erupcions d'elevades latituds indicades a la taula 3.3., prenent el mes de l'erupció com a data clau. La línia horitzontal indica el nivell de significació (0.05) després de l'aplicació d'una simulació Monte Carlo (-0.53), i la corba la mitjana mòbil de període 5.

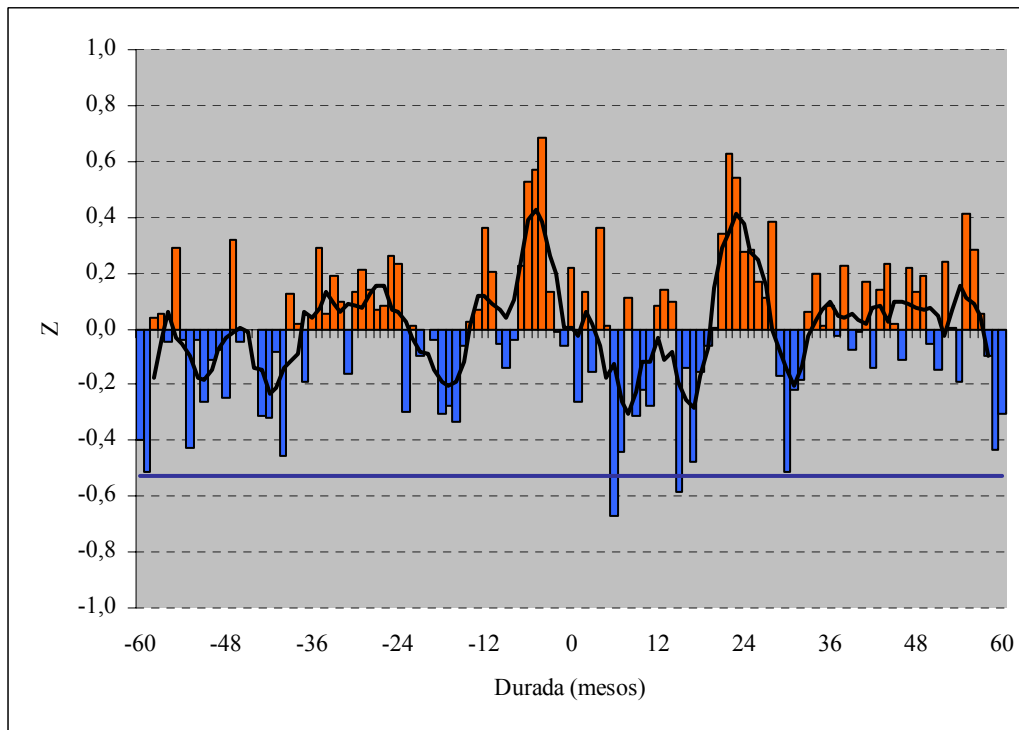


Figura 3.10. Aplicació del mètode AES a les temperatures mitjanes mensuals de la Península Ibèrica per al conjunt de les cinc erupcions d'elevades latituds indicades a la taula 3.3., prenent el mes de gener de l'erupció com a data clau. La línia horitzontal indica el nivell de significació (0.05) després de l'aplicació d'una simulació Monte Carlo (-0.58), i la corba la mitjana mòbil de període 5.

Com era d'esperar, el canvi en la selecció de la data clau no introdueix grans diferències en els resultats obtinguts (figures 3.11. i 3.12.). En general, en els cinc casos es pot constatar una resposta força immediata però de curta durada (un any i mig), i en tots ells s'aprecia com a mínim un mes superant o fregant el llinar determinat per Monte Carlo. També és evident que les erupcions dels volcans Katmai i Bezymianny són les que comporten anomalies negatives més contundents (figura 3.11c i 3.11e). A destacar el fort descens experimentat després de l'erupció de 1912 i que té lloc només un mes després, un extrem que també fou apreciat per *Kelly & Sear* [1984] i *Parker* [1985] per a les temperatures mitjanes de l'HN i per *Robock & Mao* [1995] en el mateix paràmetre però per a la franja latitudinal d'entre 30°N i 90°N. Pel que fa a la distribució estacional, no és possible apreciar una conducta comuna, doncs si bé sembla que l'estiu immediatament posterior a les erupcions és el més afectat, això podria ser atribuïble a la pròpia localització temporal de les erupcions (de març a juny). Novament, s'aprecia la presència, en gairebé tots els cinc casos, d'alguns mesos amb anomalies positives al voltant del mes +12, és a dir el primer hivern post-eruptiu. En tot cas, el que sembla evident és que les erupcions de les latituds més elevades de l'HN tenen una repercussió sobre la temperatura d'una durada clarament inferior a l'experimentada per les tropicals.

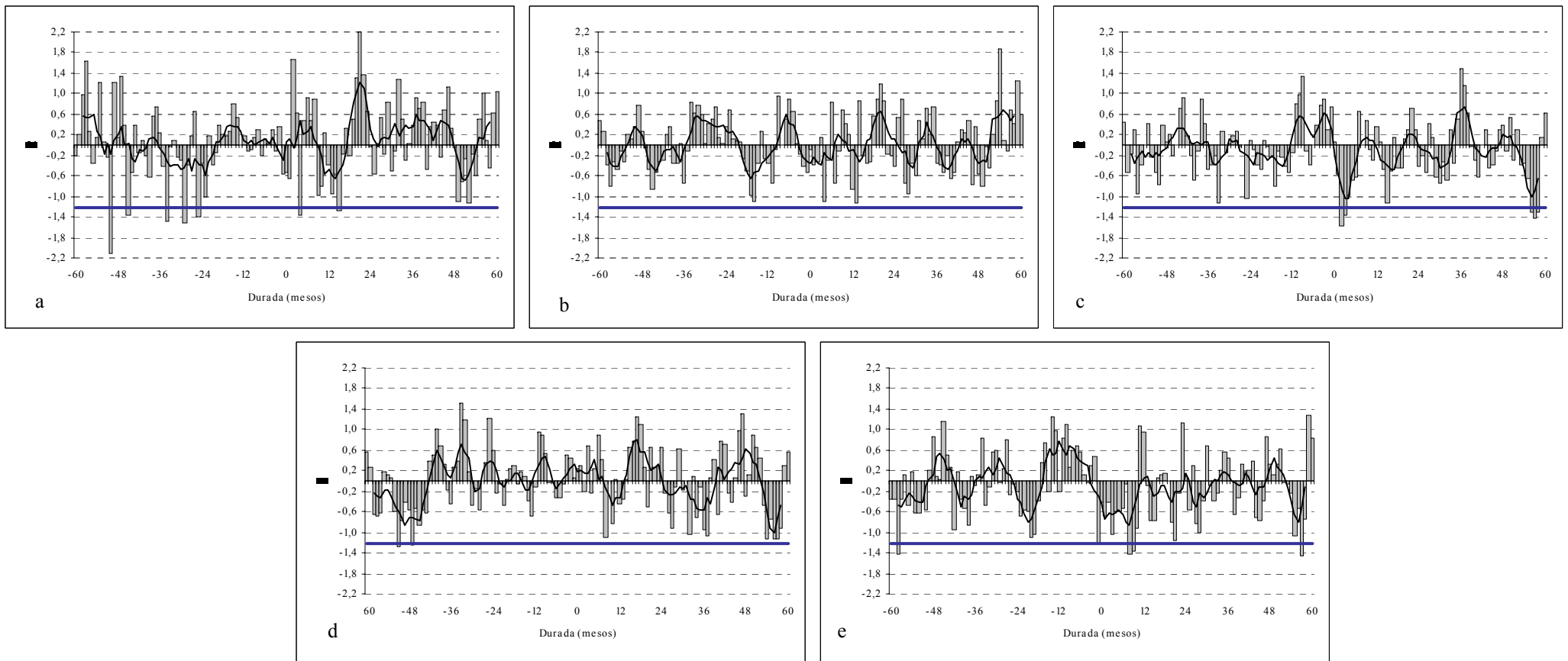


Figura 3.11. Aplicació del mètode AES a les temperatures mitjanes mensuals de la Península Ibèrica per a les cinc erupcions d'elevades latituds indicades a la taula 3.3., prenent el mes de l'erupció com a data clau. Askja (a), Ksudach (b), Katmai (c), Komagatake (d) i Bezymianny (e). La línia horitzontal indica el nivell de significació (0.05) després de l'aplicació d'una simulació Monte Carlo, i la corba la mitjana mòbil de període 5.

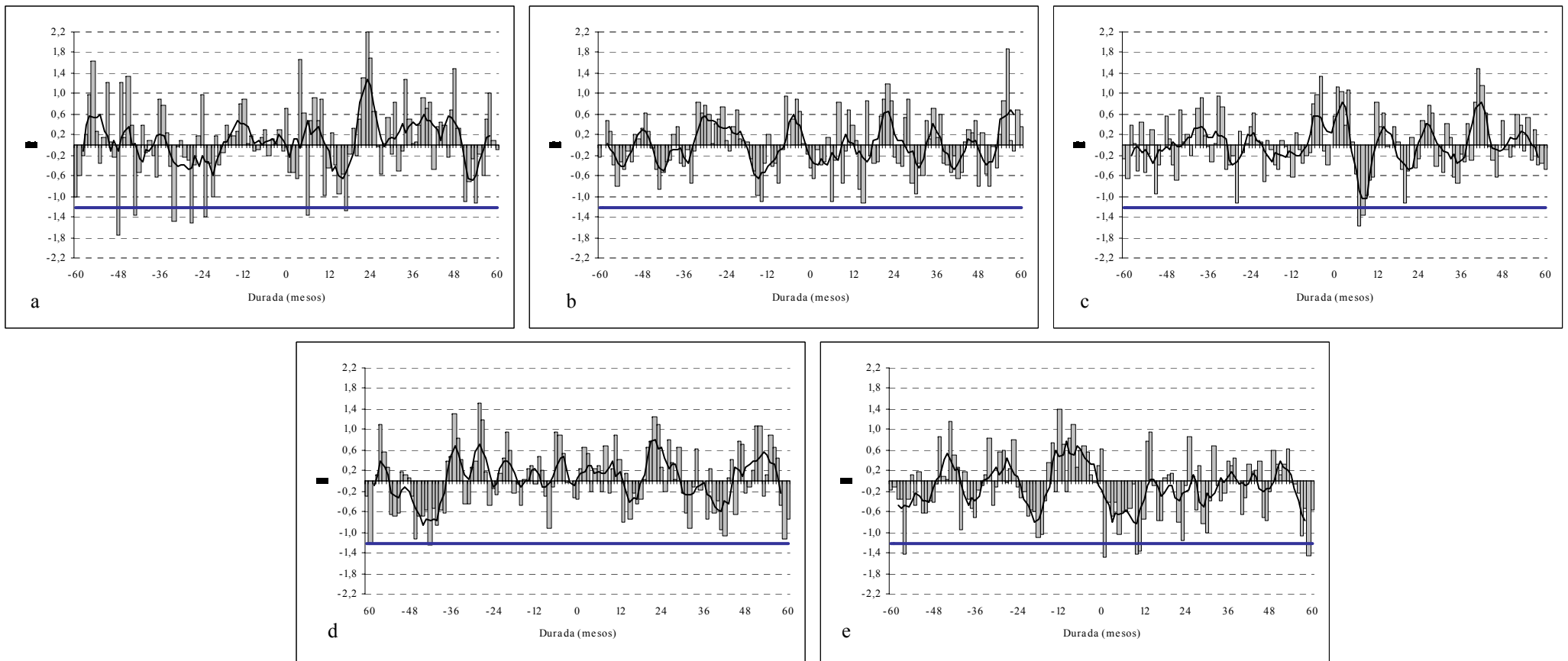


Figura 3.12. Aplicació del mètode AES a les temperatures mitjanes mensuals de la Península Ibèrica per a les cinc erupcions d'elevades latituds indicades a la taula 3.3., prenent el mes de gener de l'any de l'erupció com a data clau. Askja (a), Ksudach (b), Katmai (c), Komagatake (d) i Bezymianny (e). La línia horitzontal indica el nivell de significació (0.05) després de l'aplicació d'una simulació Monte Carlo, i la corba la mitjana mòbil de període 5.

3.4. RESPOSTA ESPACIAL DE LA TEMPERATURA MITJANA MENSUAL PENINSULAR I BALEAR (1901-1996)

En l'apartat anterior, s'ha pogut comprovar que la temperatura mitjana de la Península Ibèrica és afectada pel forçament volcànic, experimentant-se un descens de durada i magnitud variable en funció de les característiques de cada erupció. El següent pas consisteix en esbrinar el patró espacial d'aquest senyal en l'àrea peninsular i balear, detectant, si és possible, sectors amb més o menys sensibilitat.

3.4.1. Fonts de dades

Per a detectar el possible patró espacial del senyal volcànic, és necessari treballar amb una base de dades de resolució espacial el més fina possible. Per aquest motiu, s'ha escollit una malla de punts amb una resolució espacial de 0.5° de latitud per 0.5° de longitud, en base mensual i per al període 1901-1996 [New *et al.*, 2000]. El conjunt de dades inclou set elements climàtics diferents: precipitació, temperatura mitjana, amplitud tèrmica diària, freqüència de dies de precipitació (wet-days), pressió de vapor, cobertura nuvolosa i freqüència de gelada al terra. Espacialment, cobreix totes les àrees de terra emergida, incloent àrees insulars, però excloent l'Antàrtida. Les variables primàries, precipitació, temperatura mitjana i amplitud tèrmica diària, s'han interpolat directament de les observacions preses a les estacions meteorològiques, mentre que la resta s'han obtingut utilitzant tècniques de derivació més indirectes [New *et al.*, 2000].

Per al present anàlisi, la finestra espacial escollida comprèn un total de 324 punts de malla inclosos dins de l'espai $35.75^\circ\text{N} - 43.75^\circ\text{N} / 9.75^\circ\text{W} - 3.25^\circ\text{E}$ (figura 3.13.). Aquesta finestra engloba la Península Ibèrica, l'extrem africà més proper a l'estret de Gibraltar, les illes Balears i el sector més meridional de França. El paràmetre escollit serà el de la temperatura mitjana i, com en l'apartat anterior, els valors han estat transformats en z respecte al període 1961-90.

Malgrat la gran resolució espacial d'aquesta base de dades, la cobertura temporal és sensiblement inferior a l'utilitzada en l'apartat anterior. Això comportarà una selecció dels casos de vulcanisme que s'haurà d'ajustar a aquesta circumstància.

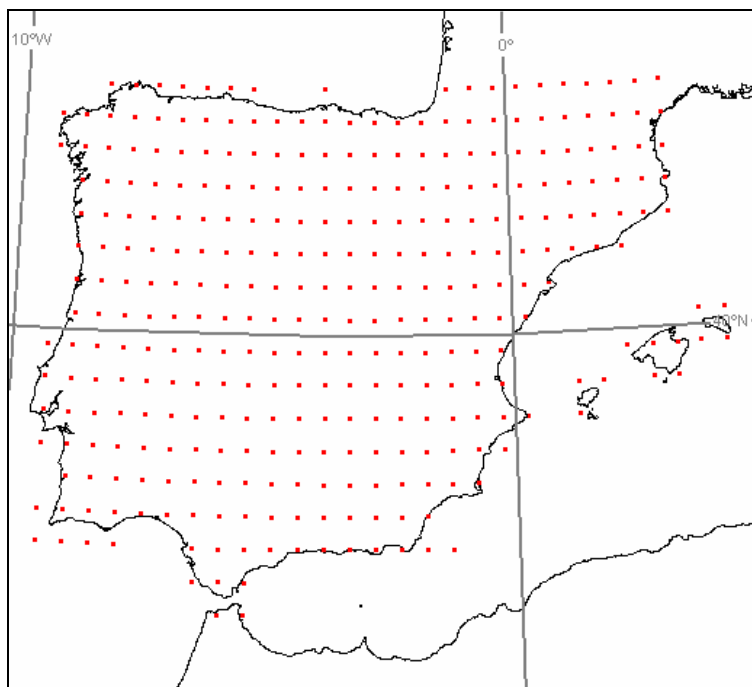


Figura 3.13. Cobertura espacial de la font de dades [New et al., 2000].

3.4.2. Erupcions o dates claus seleccionades

Donada la cobertura temporal de la font de dades, les erupcions considerades s'han de limitar a les del segle XX i que es mostren a la taula 3.4. Per a les erupcions tropicals, i motivat per la metodologia de l'AES, no ha estat possible incloure la triple erupció de 1902 ja que són necessaris un mínim de cinc anys previs a la data clau. Per aquest motiu s'ha decidit incloure l'erupció del Paluweh, Indonèsia (1928), una erupció de magnitud modesta però que es creu que va emetre 3 Tg d' SO_2 . Hoyt [1978], basant-se en mesures de pertorbació atmosfèrica, afirmà “... els climatòlegs han desestimat l'erupció del Paluweh de l'any 1928, tot i que fou probablement una de les més importants entre les del Katmai, l'any 1912 i la de l'Agung, l'any 1963” [Hoyt, 1978, p. 630].

Pel que fa a les erupcions de latituds elevades de l'HN, novament s'ha d'excloure una erupció respecte a l'estudi previ, la de l'Askja, i per tant els resultats s'han obtingut a partir de quatre casos.

	Lat.	Long.	Data (mes, any)	VEI	DVI	IVI*
Erupcions tropicals						
Paluweh, Indonèsia	-8.3°	121.7°E	8, 1928	4 (?)	...	0.3
Agung, Indonèsia	-8.3°	115.5°E	3, 1963	4	800	0.6
Fuego, Guatemala	14.5°	90.9°W	10, 1974	4	250	0.0
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	...
Erupcions extra-tropicals						
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 3.4. Erupcions volcàniques incloses en el segon anàlisi 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].

3.4.3. Erupcions tropicals i temperatura mitjana. Resultats espacials.

Novament s'han dividit els resultats en funció del criteri a l'hora d'escollir les dates clau. Així, de les figures 3.14. a 3.19 es mostren la distribució de les anomalies estandarditzades de temperatura sobre el sector d'estudi, escollint el mes de l'erupció com a data clau i un cop aplicat el mètode AES. El període és el limitat entre el mesos 0 i el +35, és a dir, els tres primers anys posteriors a les cinc dates clau que apareixen a la taula 3.4. No s'ha considerat necessari obtenir els mapes pels mesos posteriors al +35, doncs el senyal queda força diluït.

Hi ha diversos aspectes a destacar:

- En primer lloc es pot fixar en aproximadament quatre mesos el temps de resposta de la temperatura peninsular al forçament volcànic d'origen equatorial. Efectivament, en el mes +4 (figura 3.14-e), pràcticament la totalitat de la península queda afectada per anomalies negatives de temperatura i, en el mes posterior, aquestes són més contundents i estadísticament significatives. Aquest període d'aproximadament quatre mesos coincideix exactament amb el temps que triga el núvol d'aerosols volcànic en assolir les latituds mitjanes de l'HN. Així, per a les erupcions de El Chichón i Pinatubo, el núvol va envoltar la Terra en 3 o 4 setmanes, cenyint-se inicialment només a les latituds tropicals i uns quatre mesos després de la data de l'erupció, assolia ja les latituds més elevades de l'HN [Mitchell, 1982; Rosen et al., 1992; Trepte et al., 1993].
- Com s'havia apreciat anteriorment, el refredament induït pel vulcanisme no és continu en el temps, sinó que es presenta en períodes de durada variable. El primer d'ells, entre els mesos +4 i +7, es podria dir que es tracta del més intens, probablement

per la proximitat temporal a la data de l'erupció. Posteriorment, els mesos +12 i +13 tornen a enregistrar desviacions negatives a pràcticament tota l'àrea peninsular i Balears, fins i tot superant-se el llindar de significació en alguns sectors. El tercer període amb anomalies negatives afectaria als mesos +21, +22 i +23, per seguir amb un quart de durada més àmplia i que es concentraria en els mesos +28, +29, +30, +32 i +33. Els mesos intermedis als indicats, no mostren un patró clar i sovintegen les anomalies negatives o positives de poca entitat, essent pràcticament inexistents els mesos amb anomalies positives destacades (només s'aprecia aquest fet en els mesos +17 i +27).

➤ Pel que fa a la distribució espacial del senyal volcànic, tot i la dificultat d'identificar un patró definit, hi ha una certa tendència a que sigui l'àmbit central i meridional peninsular el més sensible. En el període més intens, és a dir, en els mesos +4 i +5, el centre de la Península és clarament el més afectat i progressivament passen a ser el sud i sud-est, els sectors que tenen una major tendència a concentrar les anomalies negatives. En tot cas, el que sembla evident és que la meitat nord és la menys afectada pel refredament. Per exemple, si prenem el valor de les z de temperatura sobre l'àrea propera a Almeria, comprovarem que de trenta-dos mesos (els que hi ha entre els mesos +4 i +35), en vint-i-dues ocasions s'enregistren anomalies negatives, mentre que realitzant el mateix procediment per a l'àrea propera a A Coruña o Barcelona aquest valor és de divuit i disset, respectivament. En el mateix sentit, si seleccionem únicament els mesos amb anomalies negatives i en aquests mateixos punts i per al mateix període, comprovarem que mentre al sud-est el refredament mitjà és de -0.42 , al nord-est i nord-oest és sensiblement inferior, -0.31 en ambdós casos. En un estudi realitzat a escala global, *Jones & Kelly* [1996] cartografiaren les anomalies de temperatura en els mesos 13 a 24 després de quatre grans erupcions equatorials, i en diferents franges latitudinals. Els resultats detectaven dues àmplies àrees amb anomalies negatives sobre el continent africà, una sobre la part més oriental i una altra a l'extrem nord-occidental i més proper a la Península, mentre que al centre d'Europa i a l'Àsia Occidental, les anomalies positives eren dominants. Aquest patró doncs coincideix plenament amb els resultats obtinguts a escala peninsular, on l'extrem meridional és més sensible al refredament que l'extrem septentrional. Així doncs, es podria afirmar que la Península Ibèrica és una àrea de transició entre dues regions que experimenten respostes oposades davant del forçament volcànic tropical.

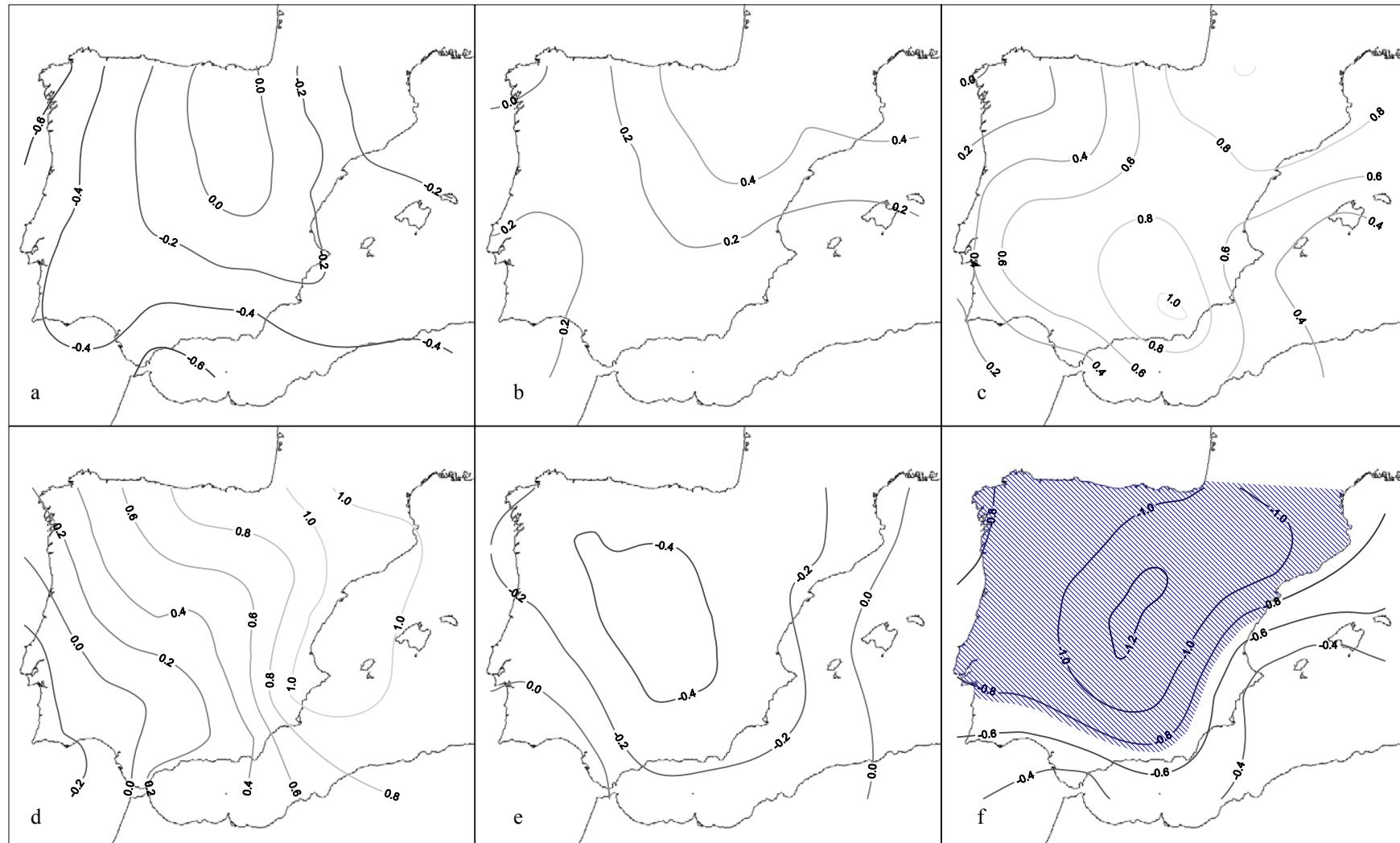


Figura 3.14. Distribució espacial de les anomalies estandarditzades de la temperatura mitjana després de l'aplicació del mètode AES per al conjunt de les cinc erupcions tropicals considerades, prenent el mes de l'erupció com a la data clau. Mes 0 (a), mes +1 (b), mes +2 (c), mes +3 (d), mes +4 (e) i mes +5 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

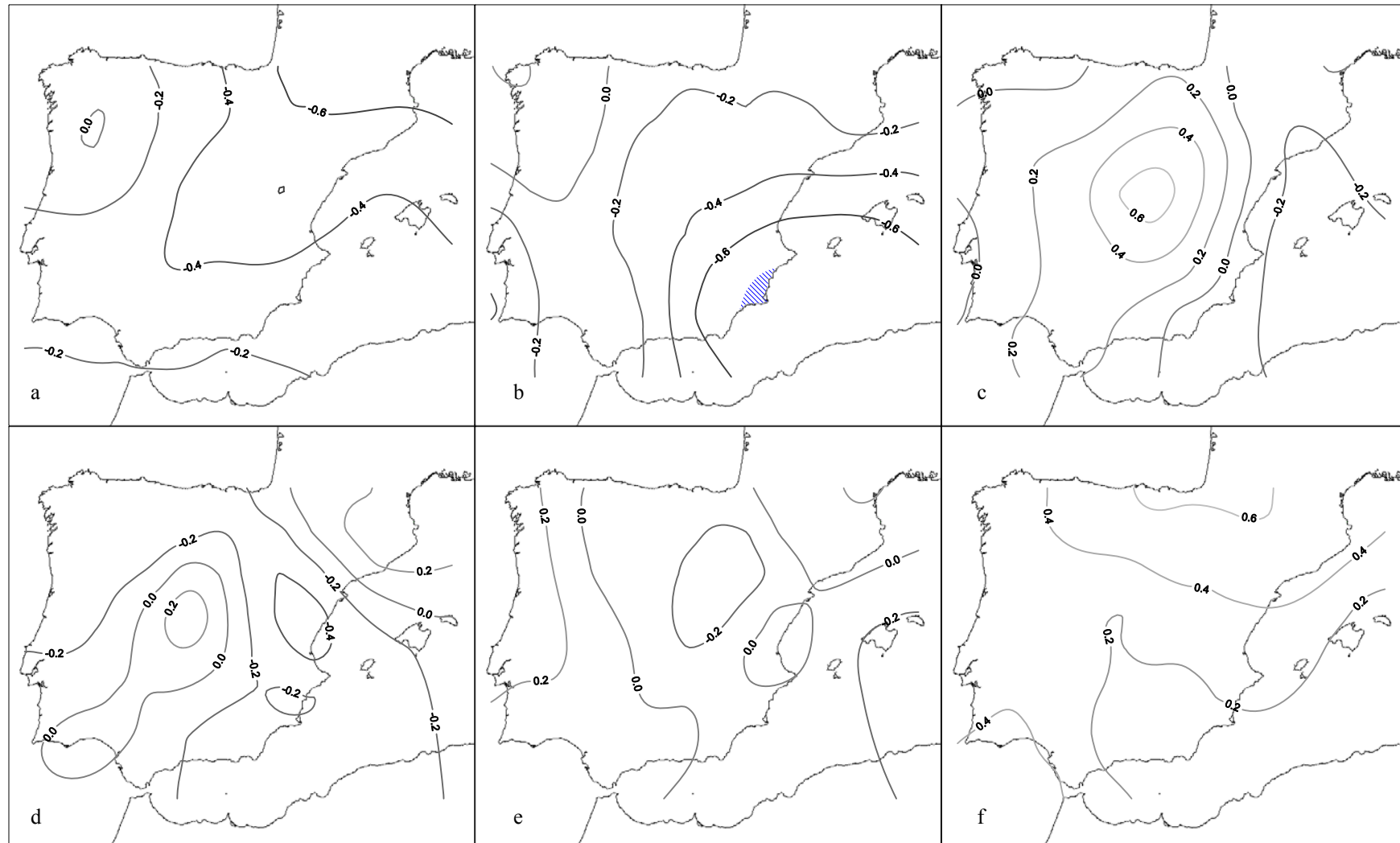


Figura 3.15. Com en la figura 3.14. però per als mesos +6 (a), +7 (b), +8 (c), +9 (d), +10 (e) i +11 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

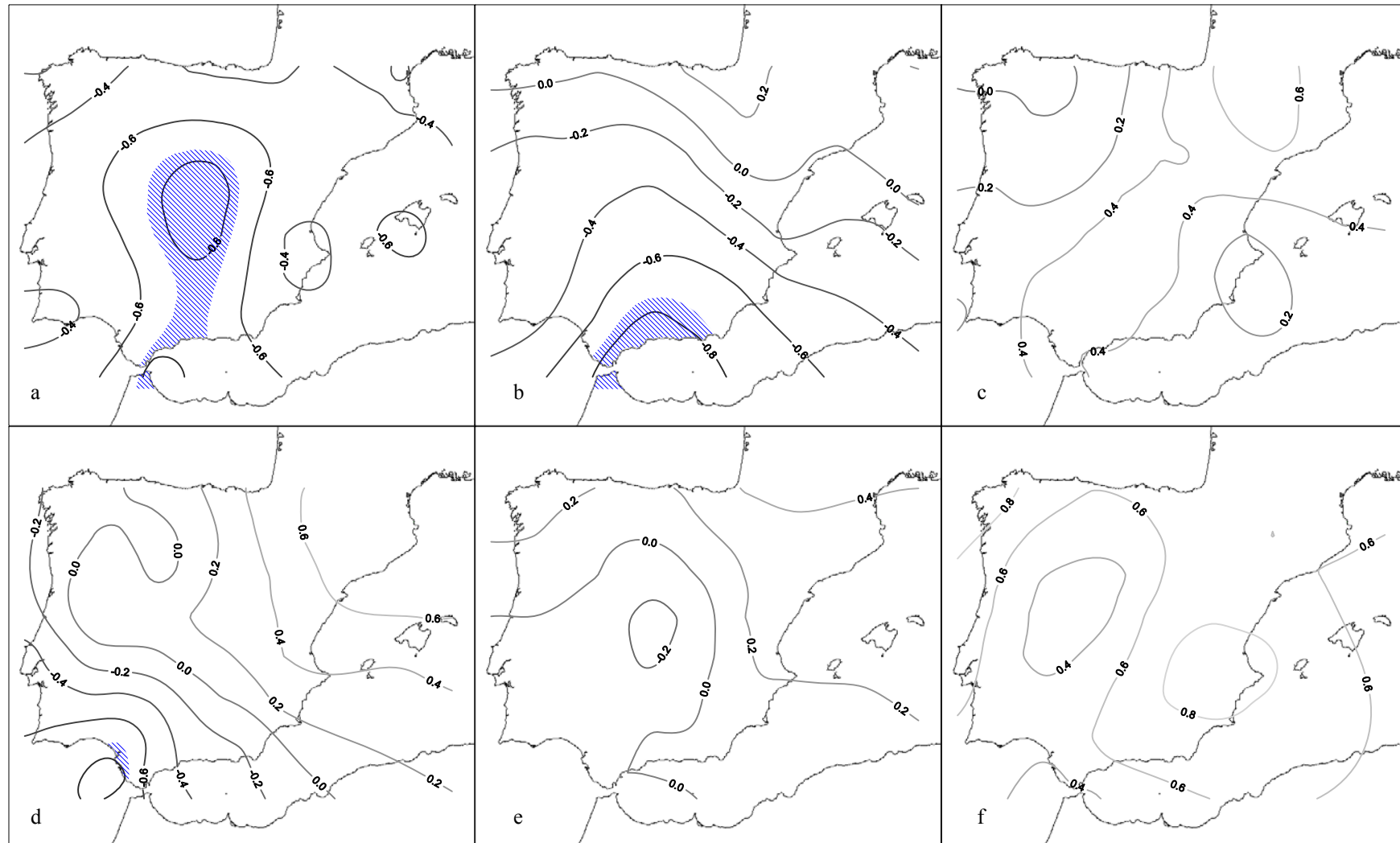


Figura 3.16. Com en la figura 3.14, però per als mesos +12 (a), +13 (b), +14 (c), +15 (d), +16 (e) i +17 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

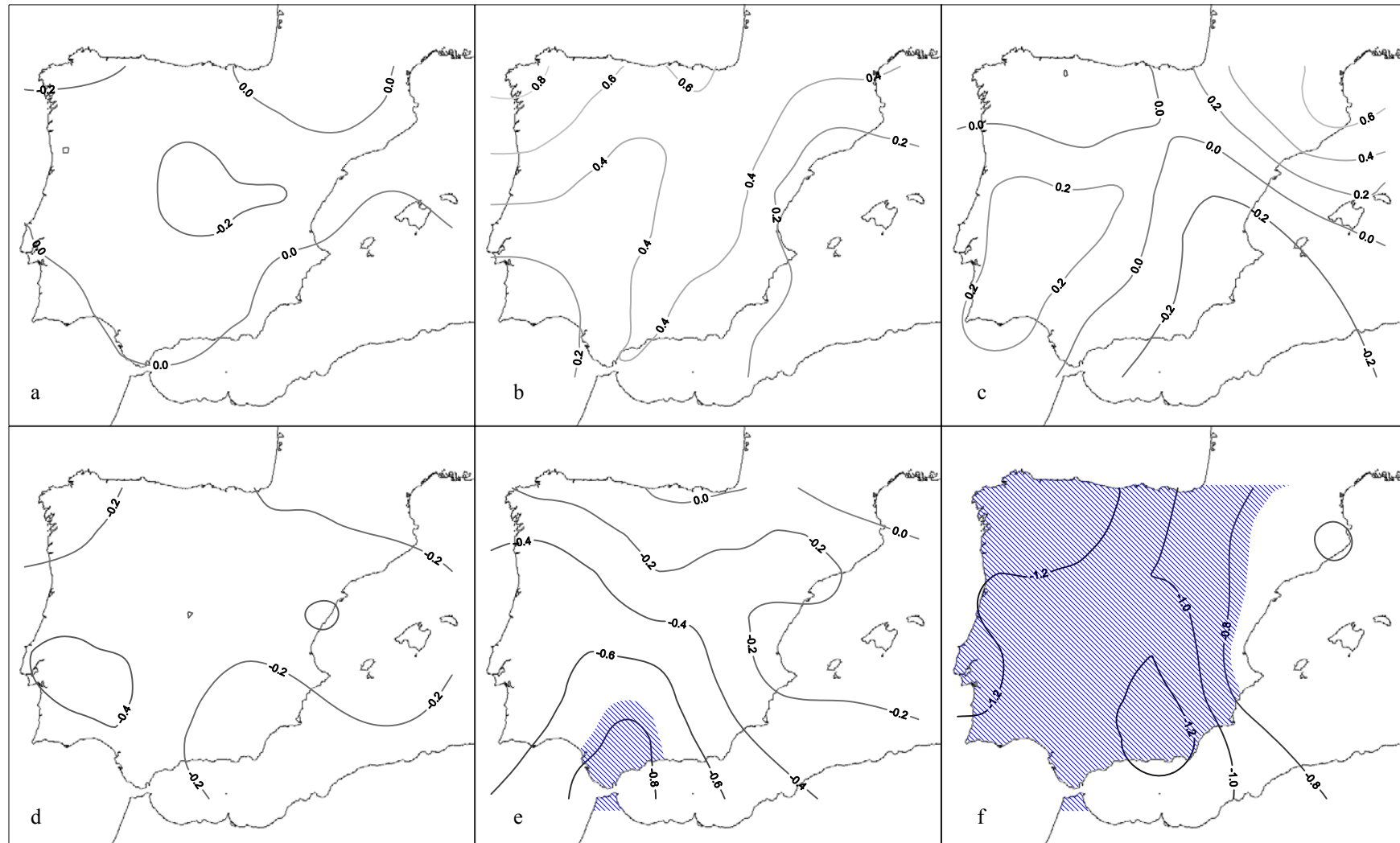


Figura 3.17. Com en la figura 3.14, però per als mesos +18 (a), +19 (b), +20 (c), +21 (d), +22 (e) i +23 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

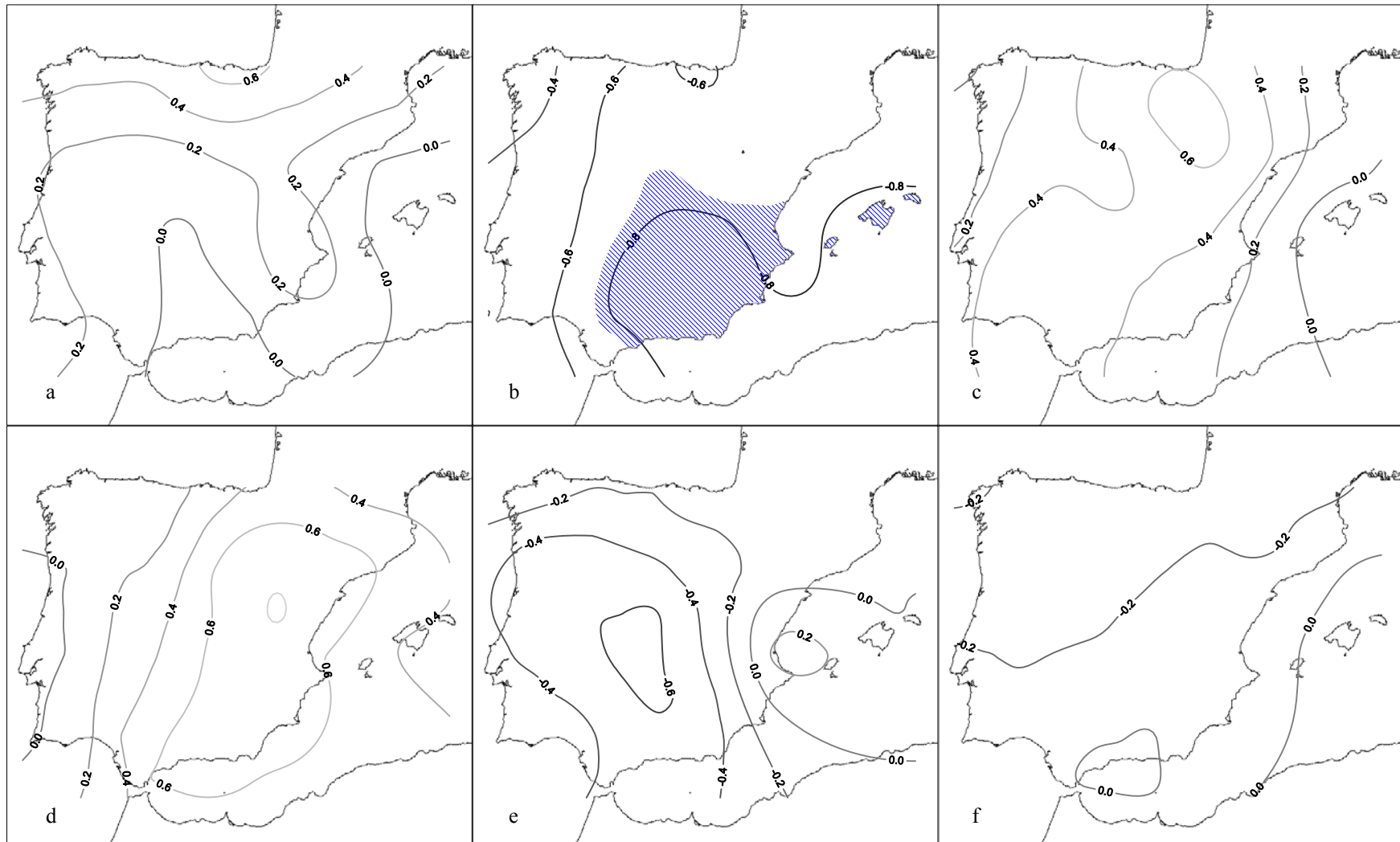


Figura 3.18. Com en la figura 3.14, però per als mesos +24 (a), +25 (b), +26 (c), +27 (d), +28 (e) i +29 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

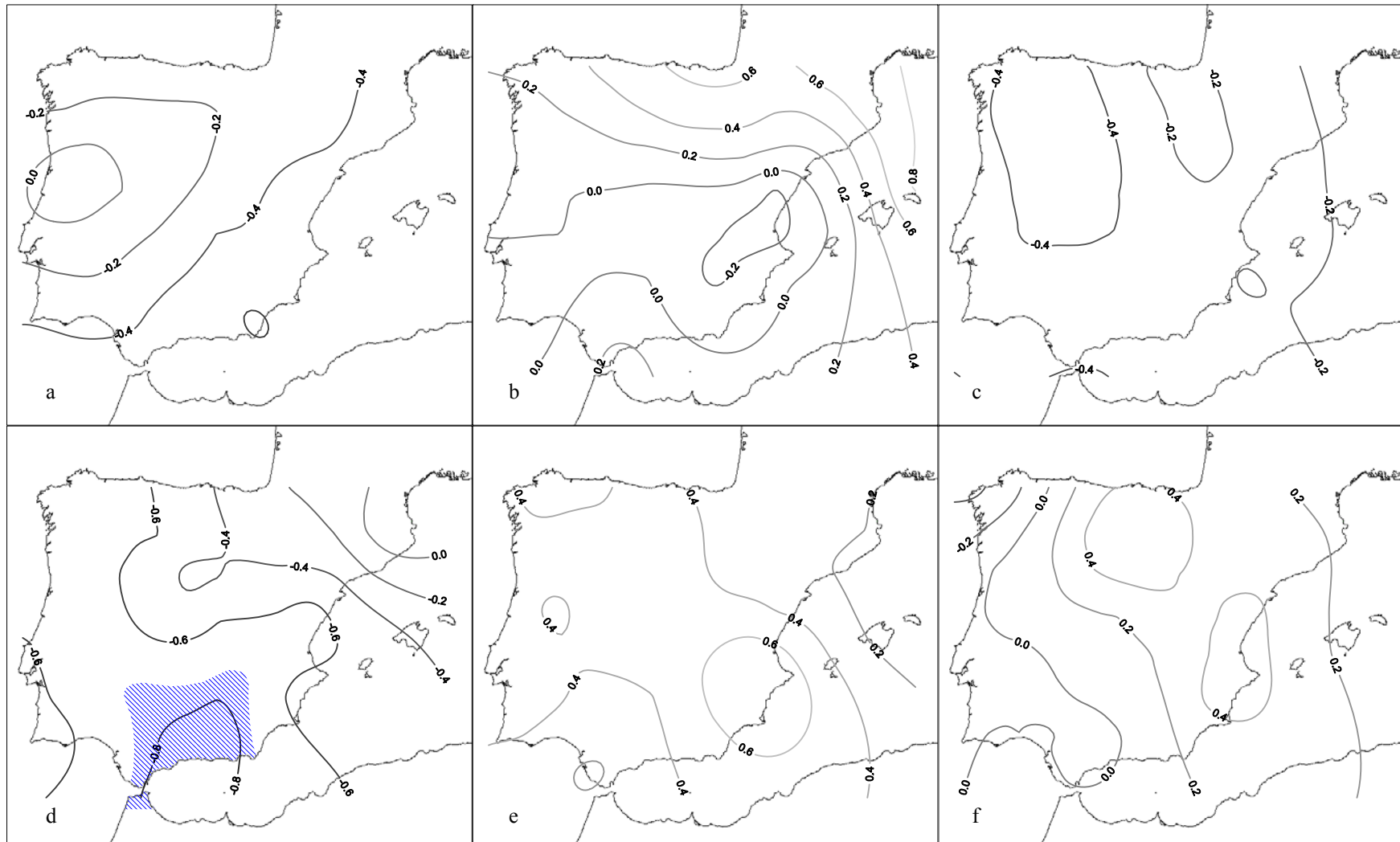


Figura 3.19. Com en la figura 3.14, però per als mesos +30 (a), +31 (b), +32 (c), +33 (d), +34 (e) i +35 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

Tot seguit, a la figura 3.20. es repeteix el mateix anàlisi però escollint en aquest cas el mes de gener de l'any de l'erupció com a data clau. D'aquesta manera es podrà comprovar si es pot apreciar un cert comportament estacional. Donada la localització temporal de les erupcions, l'anàlisi s'inicia a la tardor de l'any de l'erupció.

- Els mesos de setembre i octubre de l'any en que es produeixen les erupcions enregistren anomalies negatives de temperatura sobre la pràctica totalitat de la Península i Balears (figures 3.20-a i 3.20-b). Aquestes són especialment contundents a l'octubre amb valors que superen el llindar de significació del 5% i assoleixen z inferiors a -1.0 .
- El primer hivern post-volcànic tendeix també a experimentar temperatures per sota de la mitjana. Això és especialment evident al mes de gener (+1)⁵ essent el sector proper a la vall de l'Ebre el més afectat (figura 3.20-e), però també és vàlid per al desembre (0) i febrer (+1). Com s'havia apuntat anteriorment, el quadrant nord-est té tendència a ser menys sensible al refredament.
- La primera primavera posterior a les dates claus (o erupcions) no mostra desviacions negatives de la temperatura mitjana evidents. De fet, fins i tot el mes d'abril (figura 3.21-b) presenta anomalies clarament positives. La mateixa tendència s'aprecia durant els primers mesos d'estiu, sobretot al juliol (+1) (figura 3.21-e). Malgrat tot, ja es torna a configurar el mateix patró anteriorment assenyalat, és a dir, l'extrem meridional tendeix a concentrar les anomalies negatives, o com a mínim les positives de menys entitat. Aquest extrem queda palès en el mes d'agost (+1) (figura 3.21-f).
- Com succeïa en l'any anterior, el mes d'octubre (+1) torna a presenta anomalies negatives en tota l'àrea, i de nou en un mes hivernal, en aquest cas febrer (+2). En el mateix sentit, els mesos primaverals i els de la primera meitat d'estiu tornen a no mostrar una resposta clara, per tornar el mes d'agost (+2) a enregistrar anomalies negatives més o menys generals. A grans trets, es manté el patró que indica un major refredament al sud que al nord peninsular, sobretot en contraposició amb el nord-est.
- El tercer any analitzat, torna a presentar a la tardor com a l'estació més sensible, i així, setembre (+2) i octubre (+2) il·lustren refredaments per sota del llindar de significació. Contràriament al que succeïa en els hiverns anteriors, en el tercer queda

⁵ A cadascun dels mesos se'ls assigna el valor 0, +1 o +2, referint-se a l'any de l'erupció i als anys posteriors.

completament diluït el descens tèrmic (figura 3.24.), mentre que l'agost (+3) torna a mostrar desviacions negatives d'entitat (figura 3.25-f).

➤ La quarta tardor analitzada, tot i quedar temporalment força allunyada de les dates de les erupcions torna a indicar un patró espacial similar al de les estacions de tardor anteriors, amb predomini d'anomalies negatives en la totalitat del domini i especialment al sud (figura 3.16, quadres superiors).

En conseqüència, i a manera de conclusió, hom podria afirmar que els mesos de tardor, sobretot els mesos de setembre i octubre, són especialment sensibles al forçament volcànic, doncs enregistren anomalies negatives en els tres anys posteriors a les erupcions equatorials. En el mateix sentit, els dos primers hiverns tendeixen també a experimentar temperatures inferiors a la mitjana, mentre que els mesos primaverals i bona part dels estiuencs (a excepció d'agost) no mostren un refredament evident. Si es recorda i en referència a la resposta global del primer hivern post-volcànic, s'havia assenyalat que la Península Ibèrica com a conjunt experimentava un descens molt modest o, fins i tot, de signe contrari. Els resultats que aquí es mostren aplicant la mateixa tècnica, semblarien contradir les anteriors troballes. Malgrat tot, l'ús de dues fonts de dades diferents podrien justificar aquesta circumstància, doncs en aquest cas només es treballa amb dades de temperatura sobre la massa continental, mentre que en l'anterior s'inclouïen dades sobre masses oceàniques. En el mateix sentit, el diferent nombre d'erupcions seleccionades, les lleugeres diferències en la cobertura espacial i la diferent longitud dels registres serien altres aspectes a considerar, i reforçarien la idea que el forçament volcànic no es pot quantificar, sinó estimar.

Pel que fa a la distribució espacial de les anomalies, s'intueix el mateix patró prèviament apuntat on l'extrem més meridional de la Península Ibèrica és el més sensible al refredament, mentre que al nord, i sobretot a l'àmbit més proper al continent, la resposta és insignificant o, fins i tot, de signe contrari. Aquest darrer aspecte coincidiria amb els resultats de l'estudi dut a terme per *Barriendos & Gómez* [1997], on ja s'indicava que la temperatura mitjana de Barcelona (de 1780-1995) no responia de manera evident al forçament volcànic.

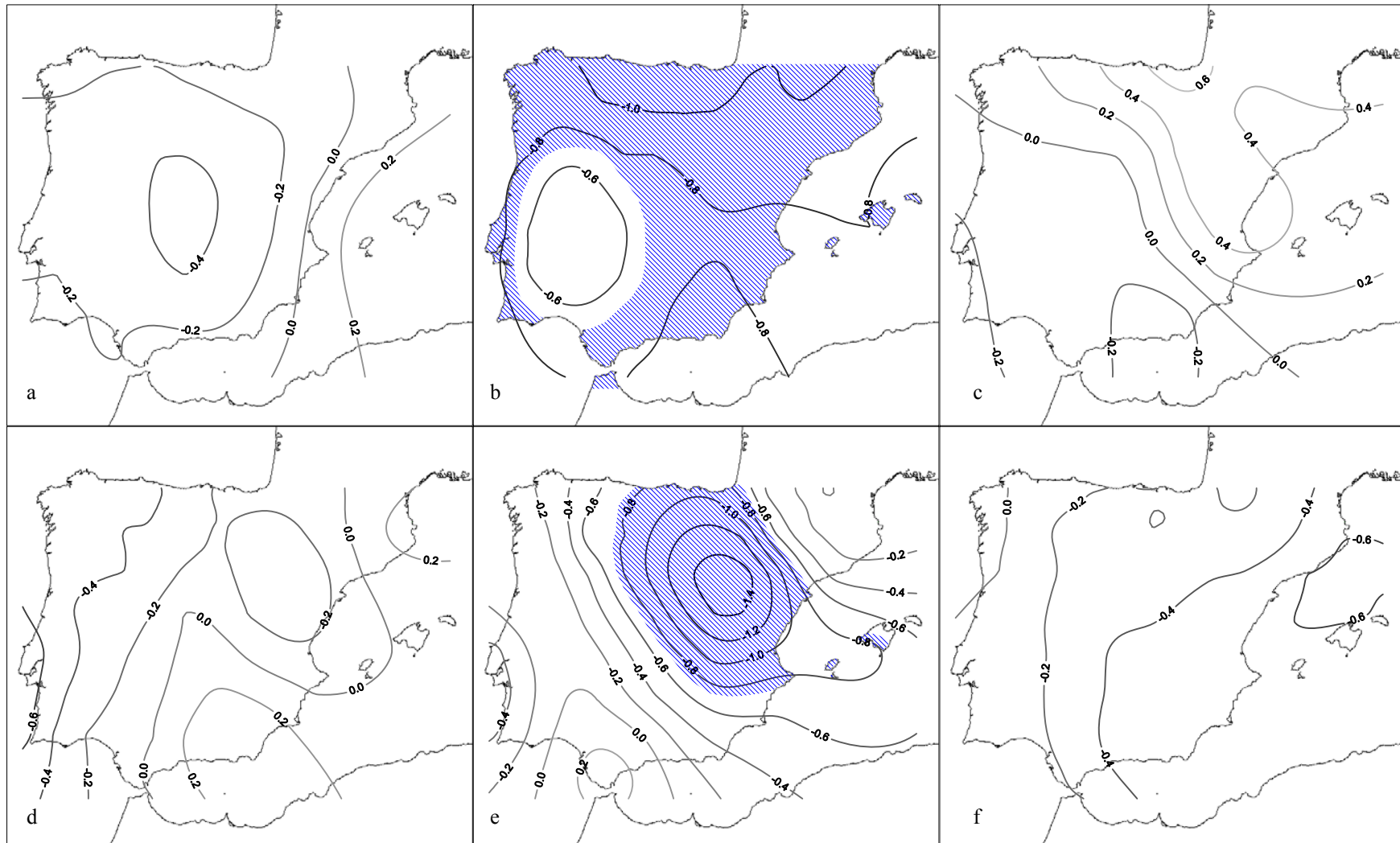


Figura 3.20. Distribució espacial de les anomalies estandarditzades de la temperatura mitjana després de l'aplicació del mètode AES per al conjunt de les cinc erupcions tropicals considerades, prenent el mes de gener de l'any de l'erupció com a la data clau. Mes Set., 0 (a), Oct. 0 (b), Nov. 0 (c), Des. 0 (d), Gen. +1 (e) i Feb. +1 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

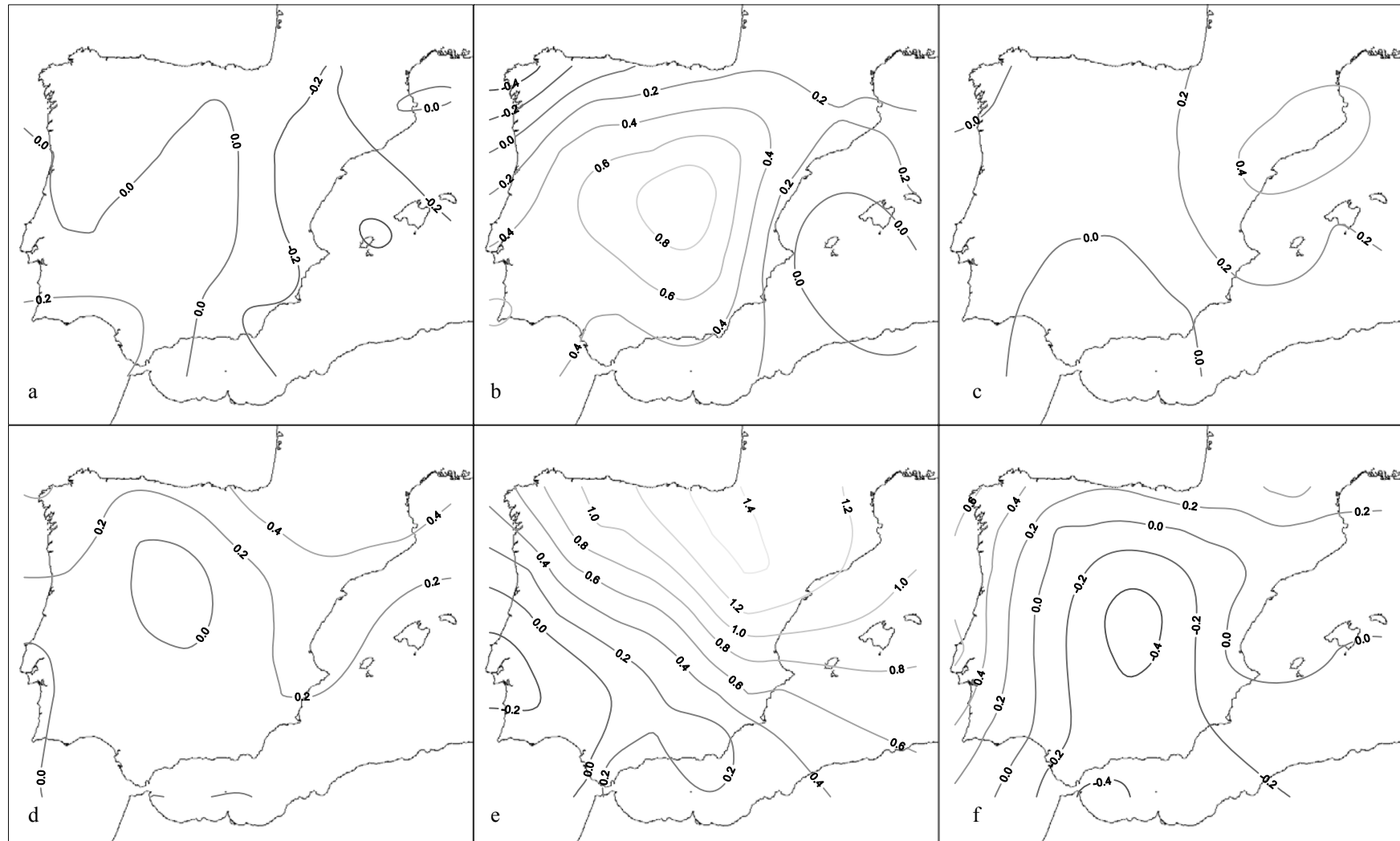


Figura 3.21. Com en la figura 3.20. però per als mesos Mar. +1 (a), Abr. +1 (b), Mai. +1 (c), Jun. +1 (d), Jul. +1 (e) i Ago. +1 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

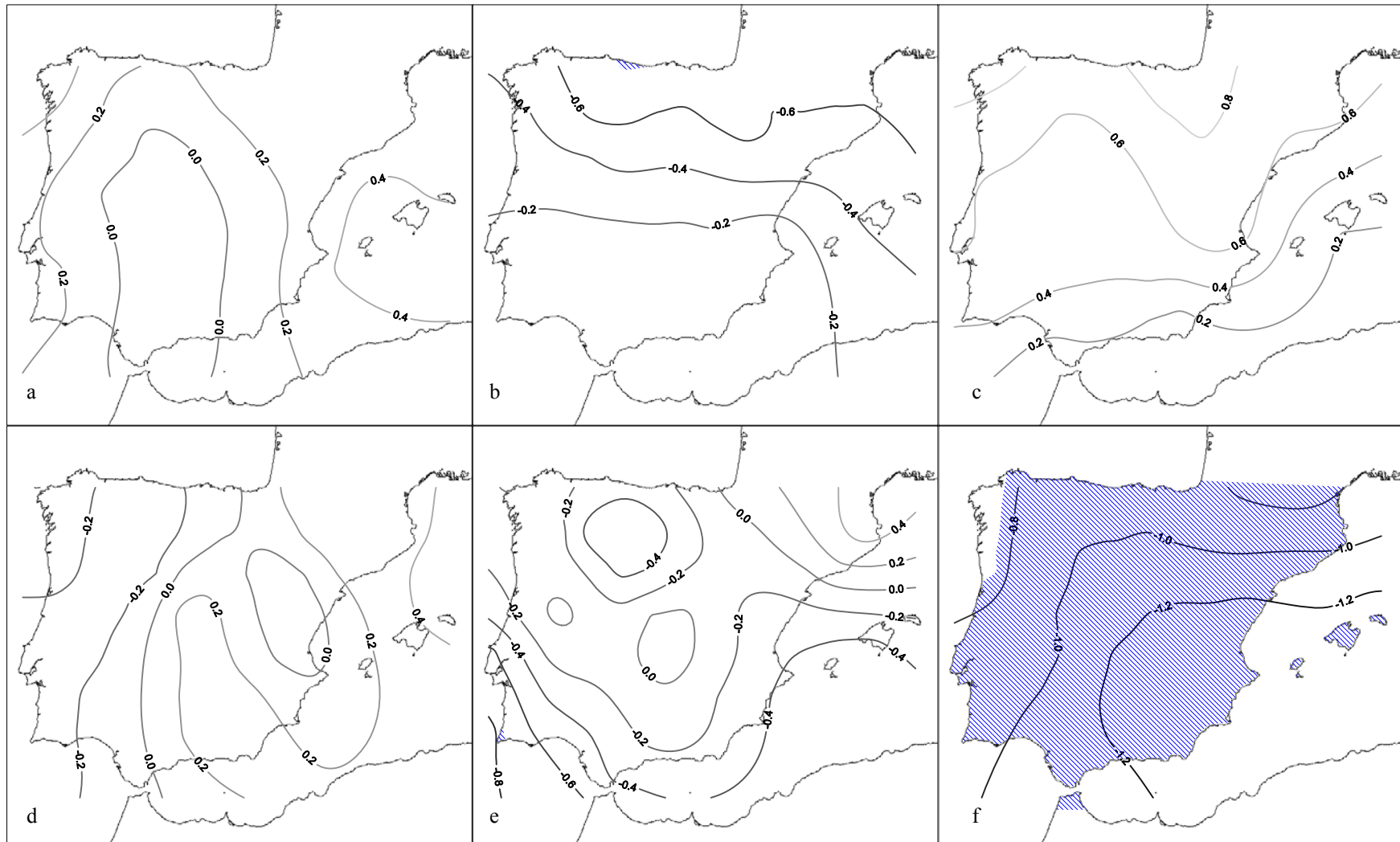


Figura 3.22. Com en la figura 3.20. però per als mesos Set. +1 (a), Oct. +1 (b), Nov. +1 (c), Des. +1 (d), Gen. +2 (e) i Feb. +2 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

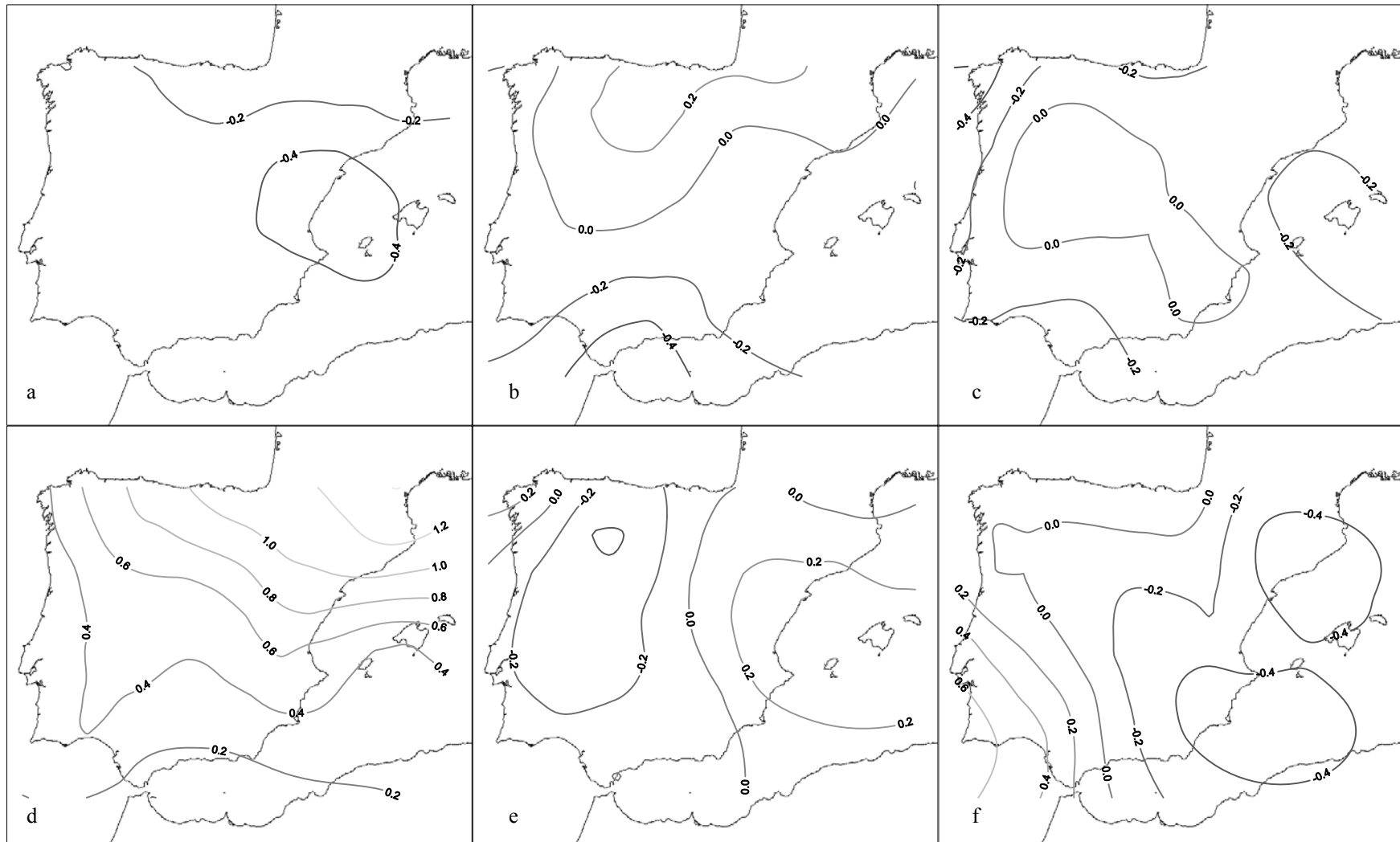


Figura 3.23. Com en la figura 3.20. però per als mesos de Mar. +2 (a), Abr. +2 (b), Mai. +2 (c), Jun. +2 (d), Jul. +2 (e) i Ago. +2 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

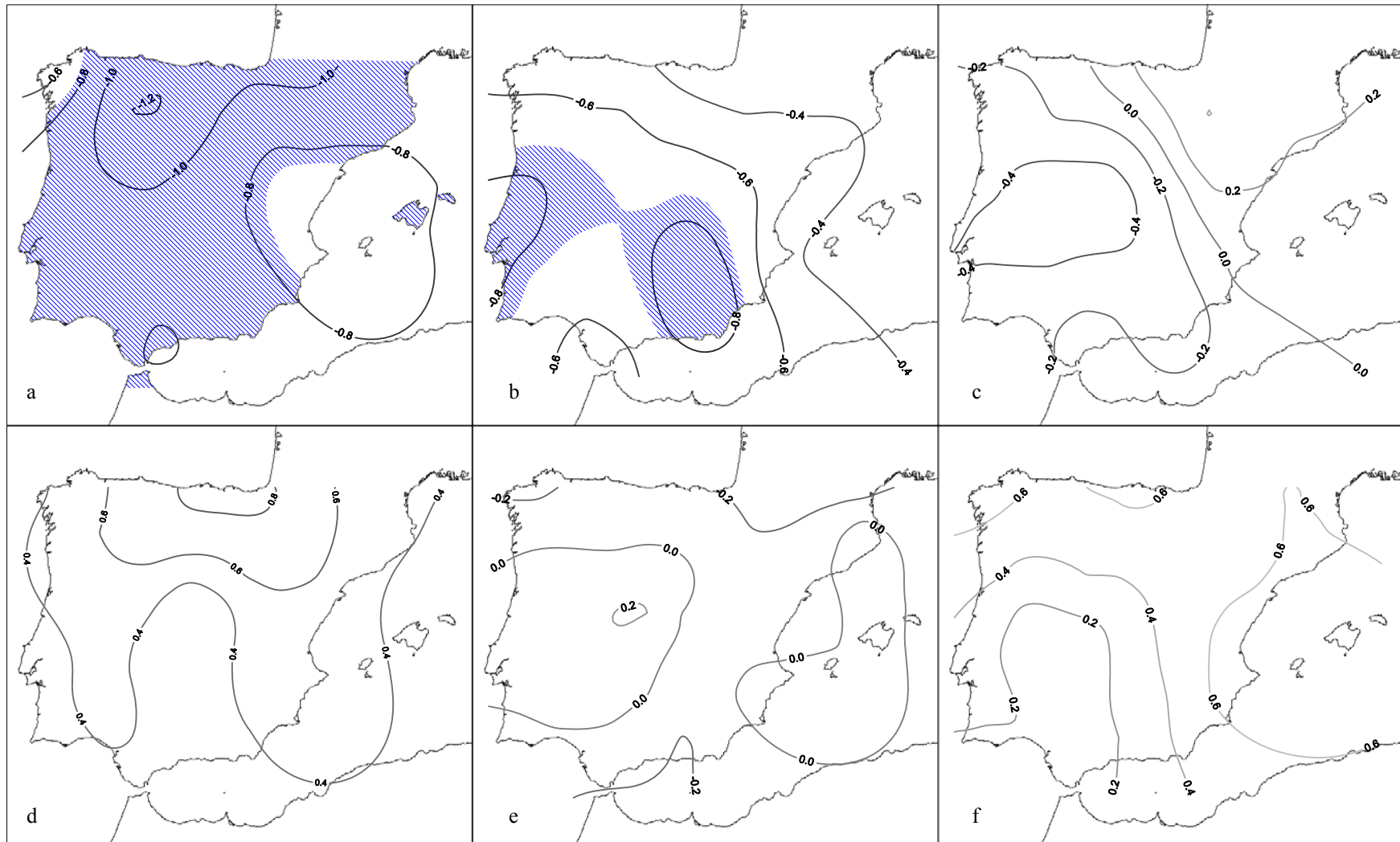


Figura 3.24. Com en la figura 3.20. però per als mesos de Set. +2 (a), Oct. +2 (b), Nov. +2 (c), Des. +2 (d), Gen. +3 (e) i Feb. +3 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

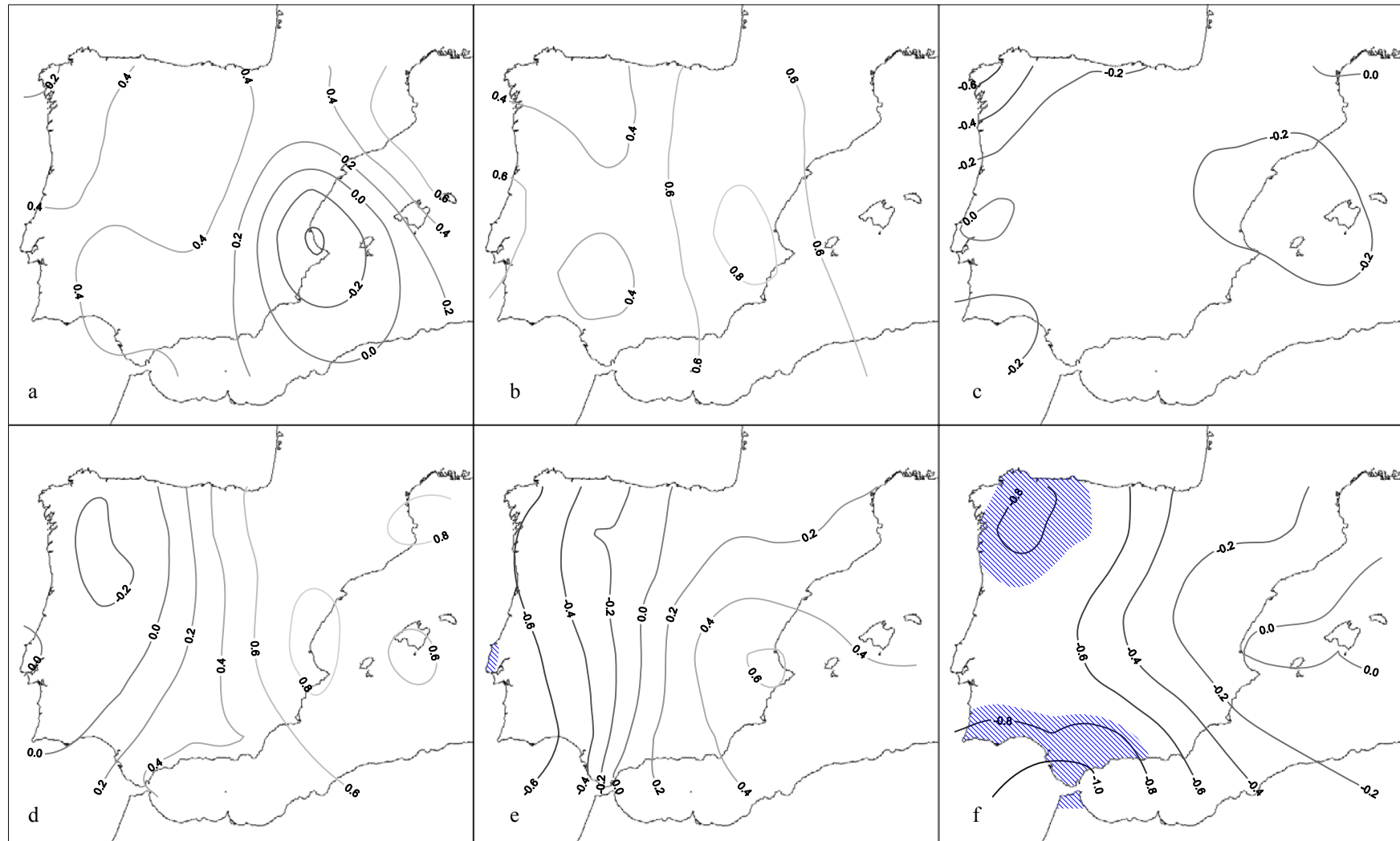


Figura 3.25. Com en la figura 3.20. però per als mesos de Mar. +3 (a), Abr. +3 (b), Mai. +3 (c), Jun. +3 (d), Jul. +3 (e) i Ago. +3 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

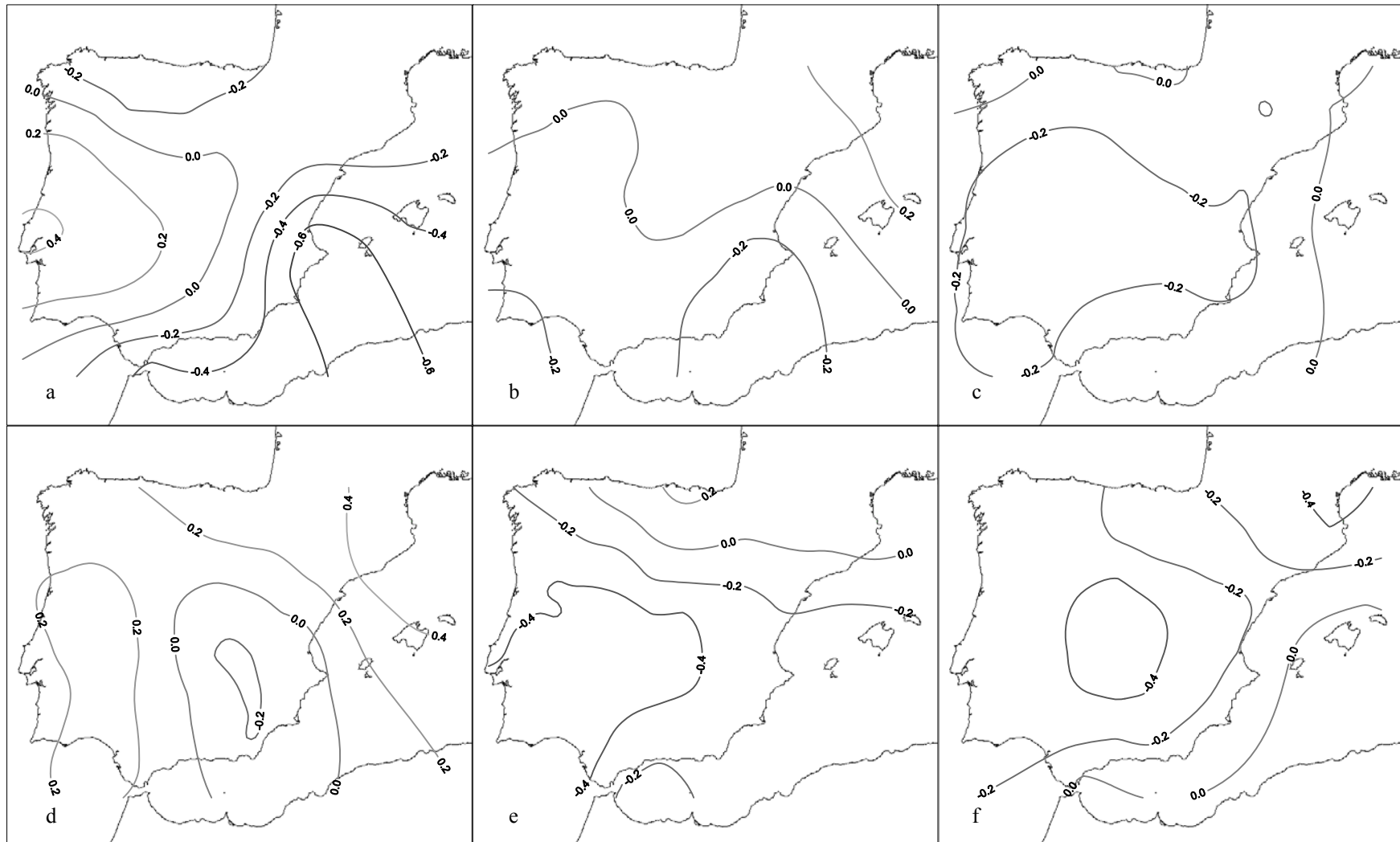


Figura 3.26. Com en la figura 3.20, però per als mesos de Set. +3 (a), Oct. +3 (b), Nov. +3 (c), Des. +3 (d), Gen. +4 (e) i Feb. +4 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

3.4.4. Erupcions de latituds elevades de l'HN i temperatura mitjana. Resultats espacials

Les erupcions localitzades a latituds elevades comporten un senyal sobre la temperatura de característiques diferents a les implicades per a les tropicals. A les figures 3.27.-3.29. es mostra la distribució de les anomalies tèrmiques estandarditzades per a l'any i mig posterior a les quatre erupcions seleccionades a la taula 3.4. Com s'havia indicat anteriorment, la resposta a aquest tipus d'erupcions no va més enllà d'aquest període.

La localització de les quatre erupcions a la mateixa època de l'any (de març a juny) i els resultats obtinguts a la secció 3.3.5. determinen que el doble criteri de selecció de les dates clau sigui en aquest cas un aspecte relativament secundari. Així, escollint com a data clau el mes exacte de l'erupció, permetrà conèixer al mateix temps la velocitat de resposta de la temperatura i el component estacional.

Coincidint amb els resultats previs pel conjunt peninsular, el descens de la temperatura que s'aprecia després d'una gran erupció de latituds elevades (de l'HN, òbviament) és pràcticament immediat. En aquest sentit, ja en el mes (+1), s'enregistren anomalies negatives a la meitat sud-occidental de la Península, fins i tot significatives en alguns sectors (figura 3.27-b), i progressivament van afectant a la totalitat de l'àmbit d'estudi, apreciand-se un desplaçament de les desviacions negatives d'oest a est. Aquesta successió és especialment evident dels mesos (+1) a (+4), essent sempre el sector més meridional el més sensible al descens (figures 3.27-b a 3.27-e). Per contra, el nord-est peninsular, tot i presentar desviacions negatives en els mateixos mesos indicats, és l'únic àmbit on no es supera el llindar fixat per Monte Carlo, fet que es perpetua en la resta de mesos post-volcànics. Després d'aquests quatre a cinc mesos de màxim refredament a pràcticament tot el sector, es succeeixen aleatòriament els mesos amb anomalies negatives encara de magnitud considerable (figures 3.28-c, 3.28-e, 3.29-b i 3.29-d) i els mesos amb anomalies positives no massa destacades, a excepció dels casos (+11) i (+12). Amb tot, es repeteix un mateix patró espacial que ja havia estat detectat prèviament en l'apartat 3.3.5. on és el sud de la Península l'àmbit geogràfic més sensible al refredament post-volcànic induït per erupcions de latituds elevades de l'HN.

Així doncs, podríem concloure que la màxima resposta de la temperatura mitjana peninsular es concentra en els cinc mesos posteriors a la data de l'erupció, essent els quatre primers els quins mostren una resposta més destacada. Aquest comportament

coincideix doncs amb els resultats obtinguts prèviament i escollint una base de dades amb una cobertura temporal més àmplia (apartat 3.3.5.). El possible pes estacional del refredament queda en aquest cas difícilment identificable per la proximitat temporal de les quatre erupcions. Malgrat tot, serien els mesos d'estiu i de tardor del mateix any de l'erupció els quins, a priori, serien més afectats mentre que al voltant dels mesos hivernals el refredament seria substituït per un breu episodi càlid. Respecte a aquest l'escalfament hivernal detectat, hi ha referències que corroboren l'ocurrència d'aquest fenomen posteriorment a erupcions de latituds elevades [*Robock & Mao*, 1992, 1995].

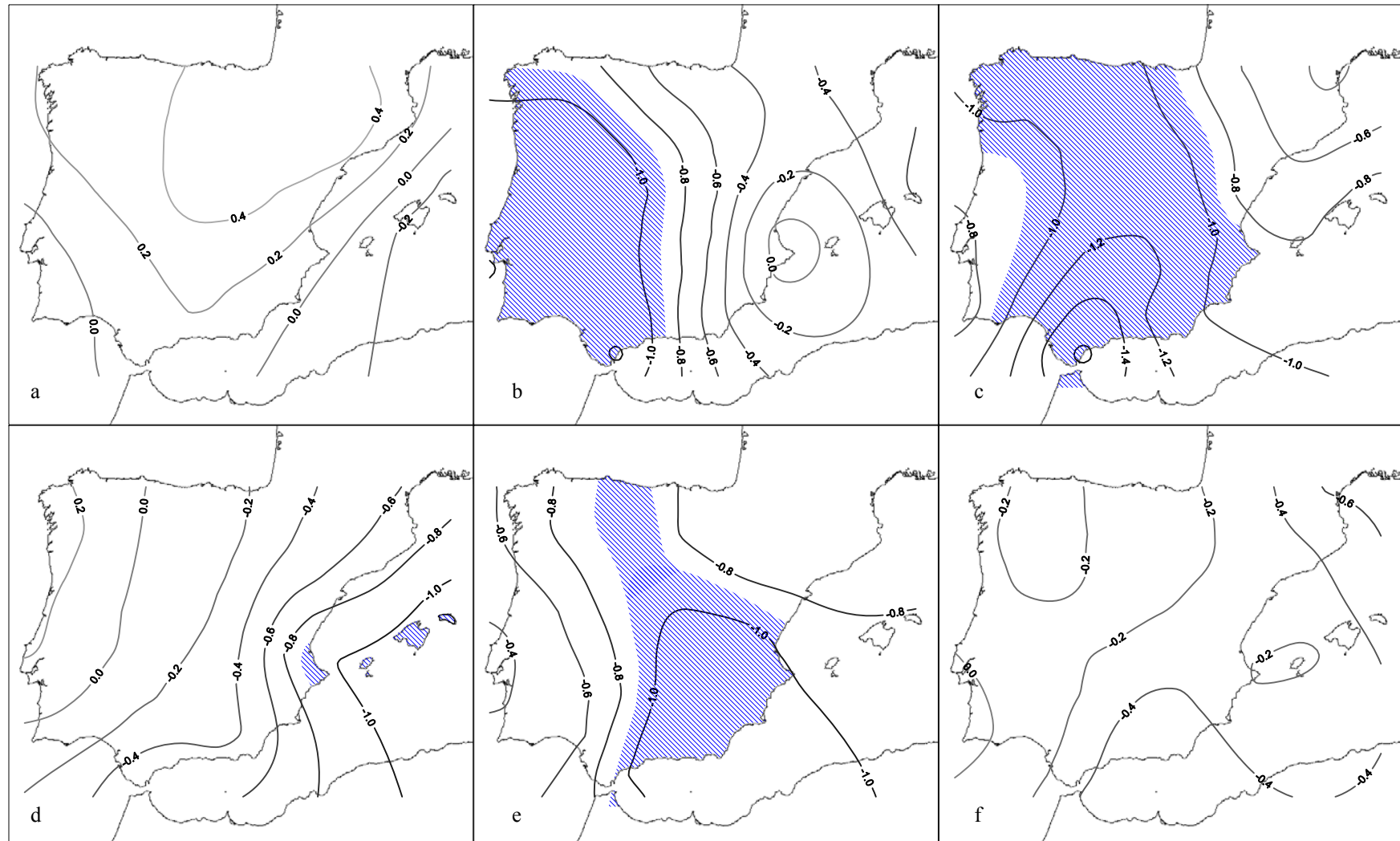


Figura 3.27. Distribució espacial de les anomalies estandarditzades de la temperatura mitjana després de l'aplicació del mètode AES per al conjunt de les quatre erupcions d'elevades latituds de l'HN considerades, prenent el mes de l'erupció com a la data clau. Mes 0 (a), mes +1 (b), mes +2 (c), mes +3 (d), mes +4 (e) i mes +5 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

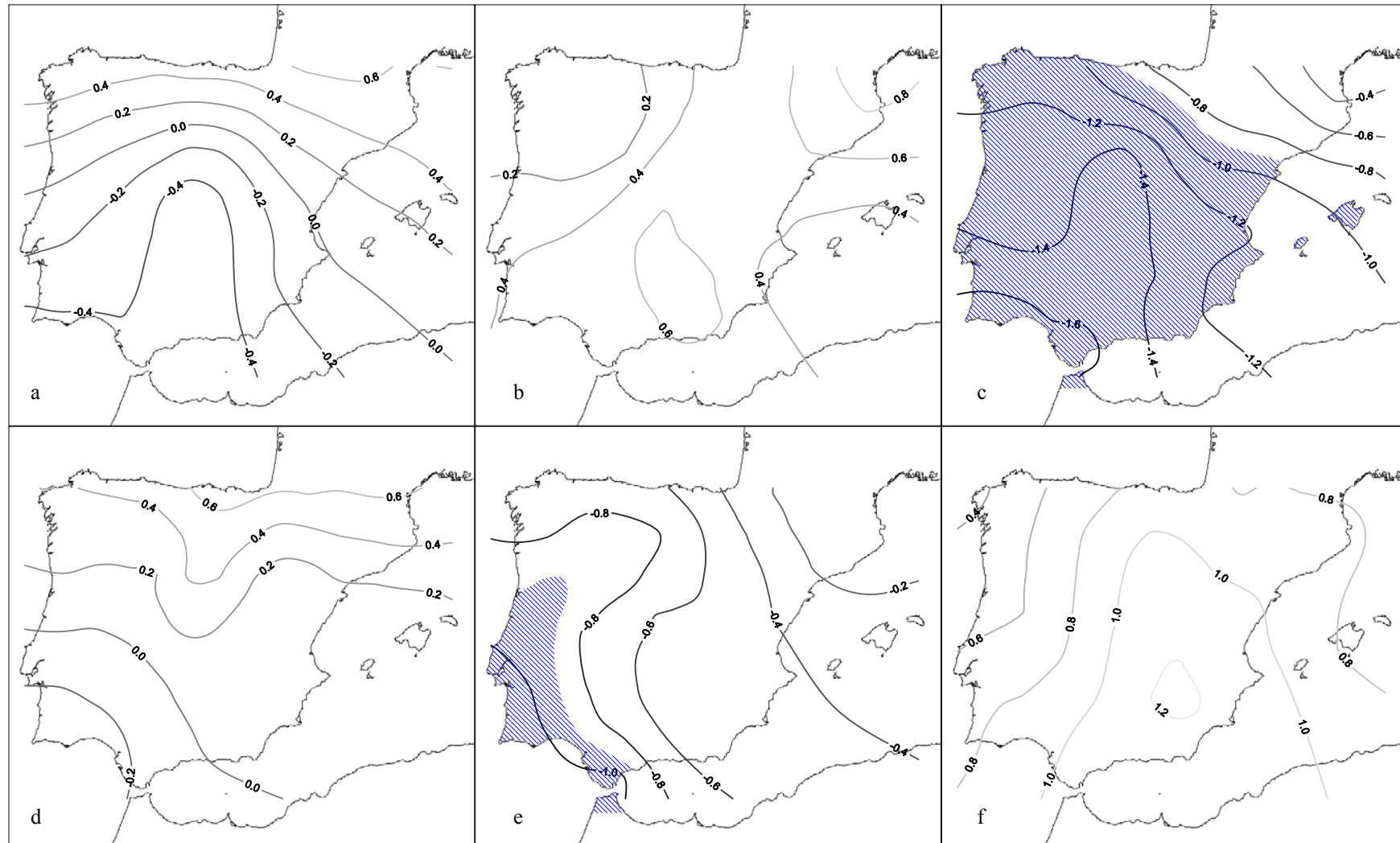


Figura 3.28. Com en la figura 3.27. però per als mesos +6 (a), mes +7 (b), mes +8 (c), mes +9 (d), mes +10 (e) i mes +11 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

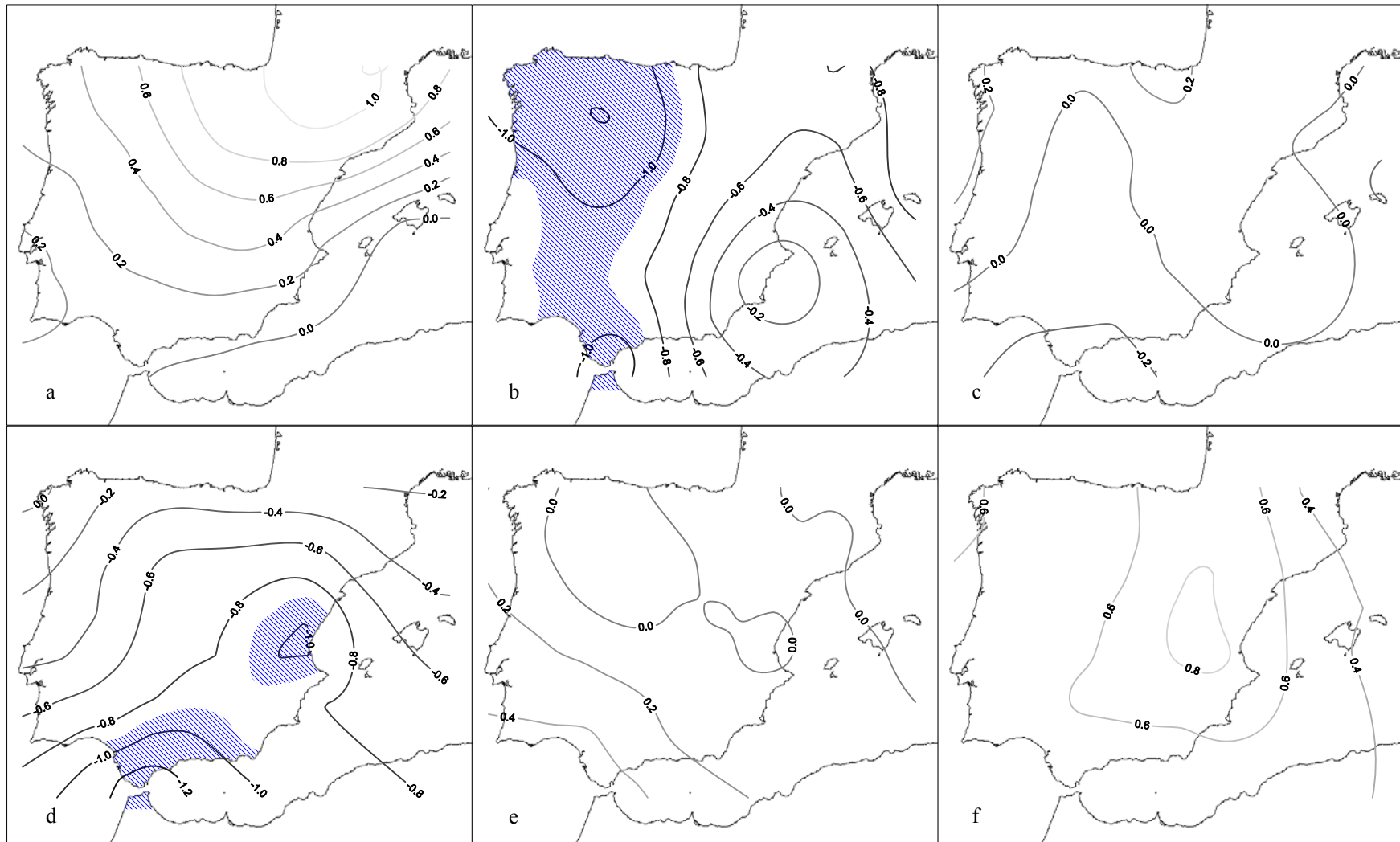


Figura 3.29. Com en la figura 3.27. però per als mesos +12 (a), mes +13 (b), mes +14 (c), mes +15 (d), mes +16 (e) i mes +17 (f). El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

3.5. RESPOSTA ESPACIAL DE LES TEMPERATURES MÀXIMES I MÍNIMES MITJANES MENSUALS (1901-1996)

Fins ara, s'ha pogut comprovar que la temperatura mitjana peninsular és un paràmetre que respon al forçament volcànic, enregistrant en alguns mesos posteriors a una erupció, desviacions negatives de durada i magnitud variables. Per a concloure la resposta del component tèrmic, en aquest apartat s'analitza el comportament per separat de les temperatures màximes i mínimes. Això és possible gràcies a la inclusió del paràmetre de l'amplitud tèrmica diària en la base de dades dissenyada per *New et al.* [2000]. Malauradament però, aquest tipus de paràmetre només és disponible pel nostre sector d'estudi a partir de la dècada de 1950. Per tant, si bé és possible incloure quatre de les cinc erupcions tropicals, per a les erupcions d'elevades latituds la mostra es redueix a un sol cas, l'erupció del volcà Bezymianny. La fiabilitat dels resultats doncs seria en aquest darrer cas molt relativa i s'ha considerat oportú excloure-la de l'anàlisi. Per contra, en el cas de les erupcions tropicals, l'erupció que no pot ser inclosa és la del volcà Paluweh, la de menor magnitud de la mostra i, per tant, la seva exclusió és menys dramàtica. Així doncs, la investigació es centrarà només en els efectes dels fenòmens localitzats a la franja equatorial.

L'estudi de les tendències de les temperatures màximes i mínimes en el període posterior a grans erupcions és molt poc corrent en la literatura, essent una de les primeres aproximacions la realitzada per *Milham* [1924]. Aquest autor analitzà amb detall les observacions fetes a una localitat de l'estat nord-americà de Massachusetts en el període de 1816 a 1913, centrant l'anàlisi en l'evolució de les temperatures en els anys 1816, 1835 i 1912, és a dir, els anys afectats per les erupcions dels volcans Tambora, Cosigüina i Katmai, respectivament. Entre les seves conclusions, l'autor assenyala “... *el principal efecte d'una erupció volcànica sembla provocar un descens de la temperatura, sobretot apreciable en les temperatures mínimes.*” [Milham, 1924, p. 566]. Més endavant, *Saxena et al.* [1997] varen dur a terme un estudi de més detall i abastant una àrea més àmplia. En aquesta investigació els autors analitzaren les tendències de les temperatures màximes i mínimes al sud-est dels Estats Units pel període 1985-1994, és a dir, l'afectat per les erupcions de El Chichón i el Pinatubo. Els resultats indicaren un descens en la mitjana de les temperatures màximes i una tendència cap a l'increment de la mitjana de les mínimes, en els períodes 1992-1994 i 1985-1987. En el primer dels intervals assenyalats, les màximes foren 0.6°C més baixes i les mínimes 0.2°C més càlides, mentre que pel període

1985-1987 el descens de les màximes es fixà en 0.1°C i l'augment de les mínimes en 0.3°C . Així doncs som, aparentment, davant d'una contradicció entre els dos treballs. En aquesta secció, la investigació intentarà esbrinar el que succeeix a nivell de l'àrea peninsular.

L'anàlisi s'estructura en dues fases. En primer lloc s'han escollit aquells mesos en els que la temperatura mitjana s'ha mostrat més sensible al forçament volcànic, per tal de comprovar si les màximes i les mínimes tenen un comportament paral·lel. Posteriorment, s'han seleccionat quatre punts repartits dins l'àrea d'estudi i s'ha analitzat la dinàmica estacional de les temperatures màximes i mínimes durant el període post-volcànic. En ambdós casos, s'utilitza la mateixa metodologia, l'Anàlisi d'Èpoques Superposades (AES), escollint com a data clau, el gener de l'any de les erupcions.

3.5.1. Erupcions tropicals

De la figura 3.30. a la figura 3.32. es mostra la distribució de les z en vuit mesos que han enregistrat anomalies especialment evidents, després de les quatre erupcions tropicals ja conegudes. Fent un cop d'ull general, es pot comprovar clarament com les desviacions negatives són més contundents i territorialment més àmplies per a les temperatures mínimes que per a les màximes, aspecte que contradiria l'estudi de *Saxena et al.* [1997] abans esmentat. Això és cert en tots els vuit casos cartografiats, però en cinc d'ells, els que corresponen a mesos dins la meitat freda de l'any, les diferències entre ambdues respostes és més gran. Per exemple a la figura 3.30., s'il·lustra la incidència en el mes de gener (+1) (és a dir, del primer hivern posterior a l'erupció). És evident una àrea on les anomalies negatives són especialment significatives, i que correspon al sector al voltant de la vall de l'Ebre i Sistema Ibèric. Les màximes només són inferiors precisament en aquest sector, mentre que les mínimes, a part de ser més baixes, assoleixen un abast territorial molt més ampli. Aquest darrer aspecte també succeeix en els mesos d'octubre (0) (figura 3.30.), octubre (+1), febrer (+2) (figura 3.31.) i octubre (+2) (figura 3.32.).

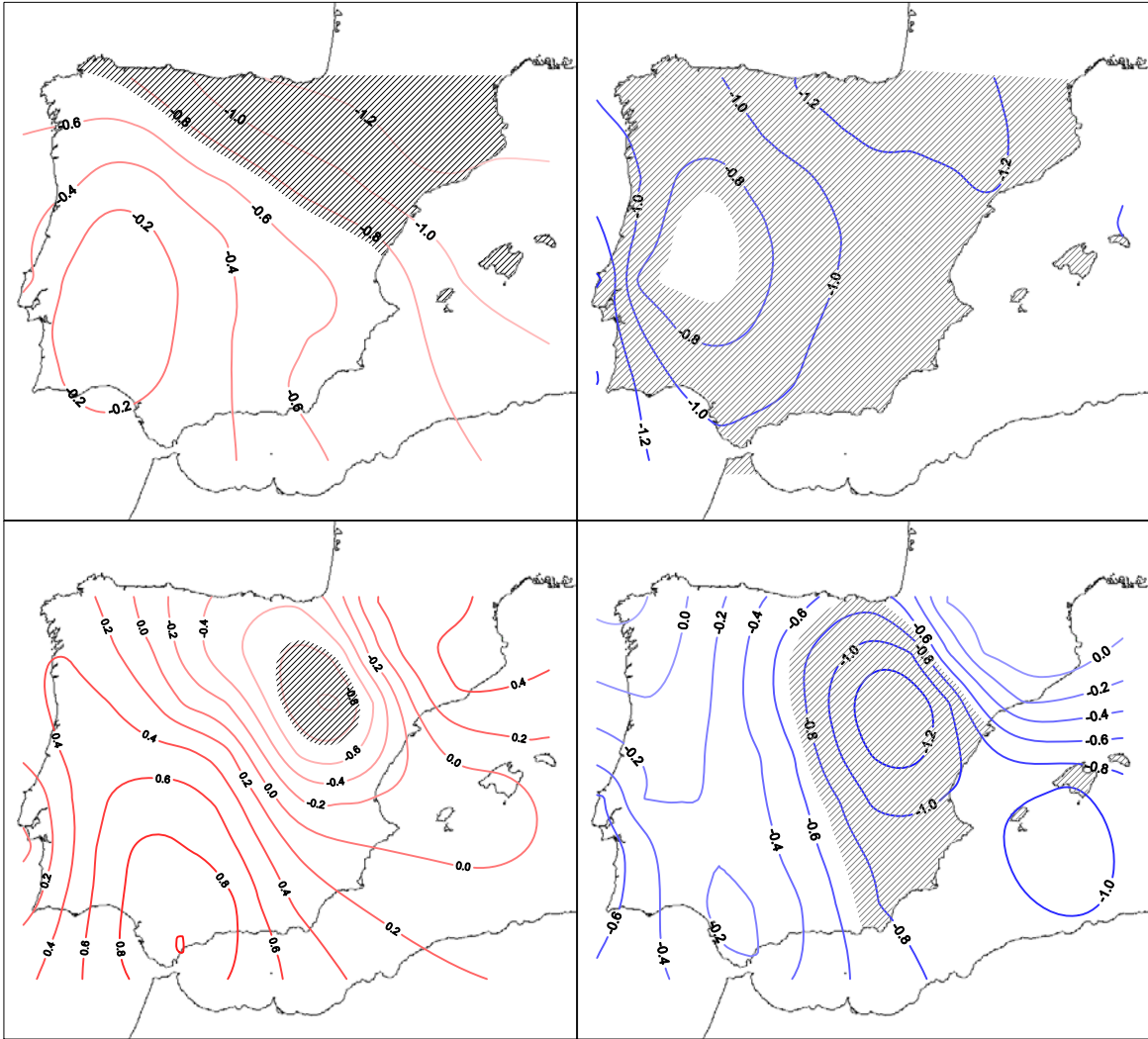


Figura 3.30. Distribució espacial de les anomalies estandaritzades de temperatura màxima (esquerra) i mínima (dreta) corresponent als mesos d'octubre (0) (superior) i gener (+1) (inferior), després de l'aplicació del mètode AES per al conjunt de quatre erupcions tropicals. El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

Com succeïa amb les temperatures mitjanes mensuals, el sector més meridional peninsular és el més sensible al refredament, i és també en aquest sector on les mínimes experimenten un descens més clar, superant clarament el ritme de descens de les màximes. En canvi, en els sectors nord-oriental i nord-occidental peninsular es podria dir que ambdós paràmetres es comporten de manera similar, és a dir, que les màximes i les mínimes baixen al mateix ritme, essent les diferències molt poc destacades.

La possibilitat d'estudiar per separat l'evolució de les temperatures mínimes i màximes, permet realitzar una aproximació a la situació sinòptica dominant en els mesos afectats pel forçament volcànic. Per exemple, i com s'ha comentat anteriorment, en el gener (+1) (figura 3.30.) s'aprecia una concentració dels mínims tèrmics al

voltant de la depressió de l'Ebre i Sistema Ibèric. Aquesta morfologia és típica en situacions d'estancament o anticiclòniques en aquest sector, on les boires d'irradiació hi són persistents durant setmanes senceres. Aquest extrem es veuria reforçat pel fet que el mateix patró espacial es repeteix tant per a les màximes com per a les mínimes. En el mateix cas, són evidents les anomalies positives de les temperatures màximes en el sector més meridional de la Península, mentre que les mínimes són lleugerament més baixes. Aquesta major amplitud tèrmica es donaria en situacions de cels asserenats i associats a temps anticiclònic. Un fet similar es detecta en el mes de febrer (+2) i en el sector més proper a l'Atlàntic (figura 3.31.).

Els mesos d'estiu, juntament amb els de tardor tendeixen a ser els més sensibles al descens tèrmic en la nostra franja latitudinal [*Bradley, 1988; Robock & Mao, 1995*]. Malgrat tot, durant els estius peninsulars corresponents als primer i segon anys post-volcànics, no s'aprecien anomalies negatives destacades i aquestes només es manifesten en les temperatures mínimes i al sud peninsular, però sense sobrepassar el llindar de significació. Per contra, els dos primers hiverns (DGF) sí que mostren anomalies negatives apreciables en les temperatures mínimes i, de nou, sobre la meitat sud. Ara bé, en el tercer hivern es trenca aquesta dinàmica i desapareixen completament les anomalies negatives en ambdós paràmetres, essent en aquest cas les mínimes les que puguen de manera més evident. Aquest patró espacial en la distribució de les z , implicaria probablement una major i més persistent aportació d'aire oceànic, temperat i humit, que faria disminuir l'amplitud tèrmica diària.

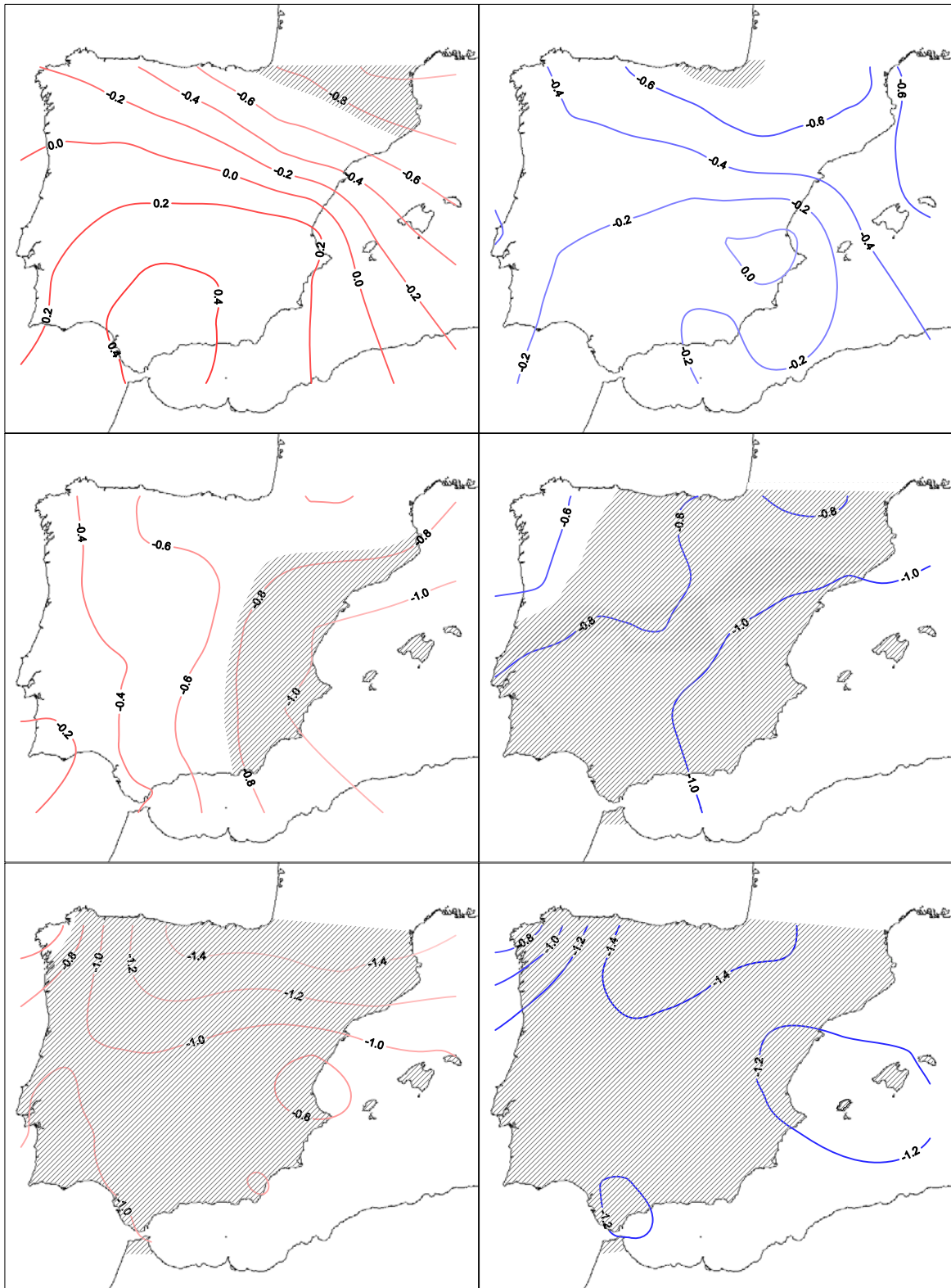


Figura 3.31. Com en la figura 3.30. però per als mesos d'octubre (+1) (superior), febrer (+2) (central) i setembre (+2) (inferior), després de l'aplicació del mètode AES per al conjunt de quatre erupcions tropicals. El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

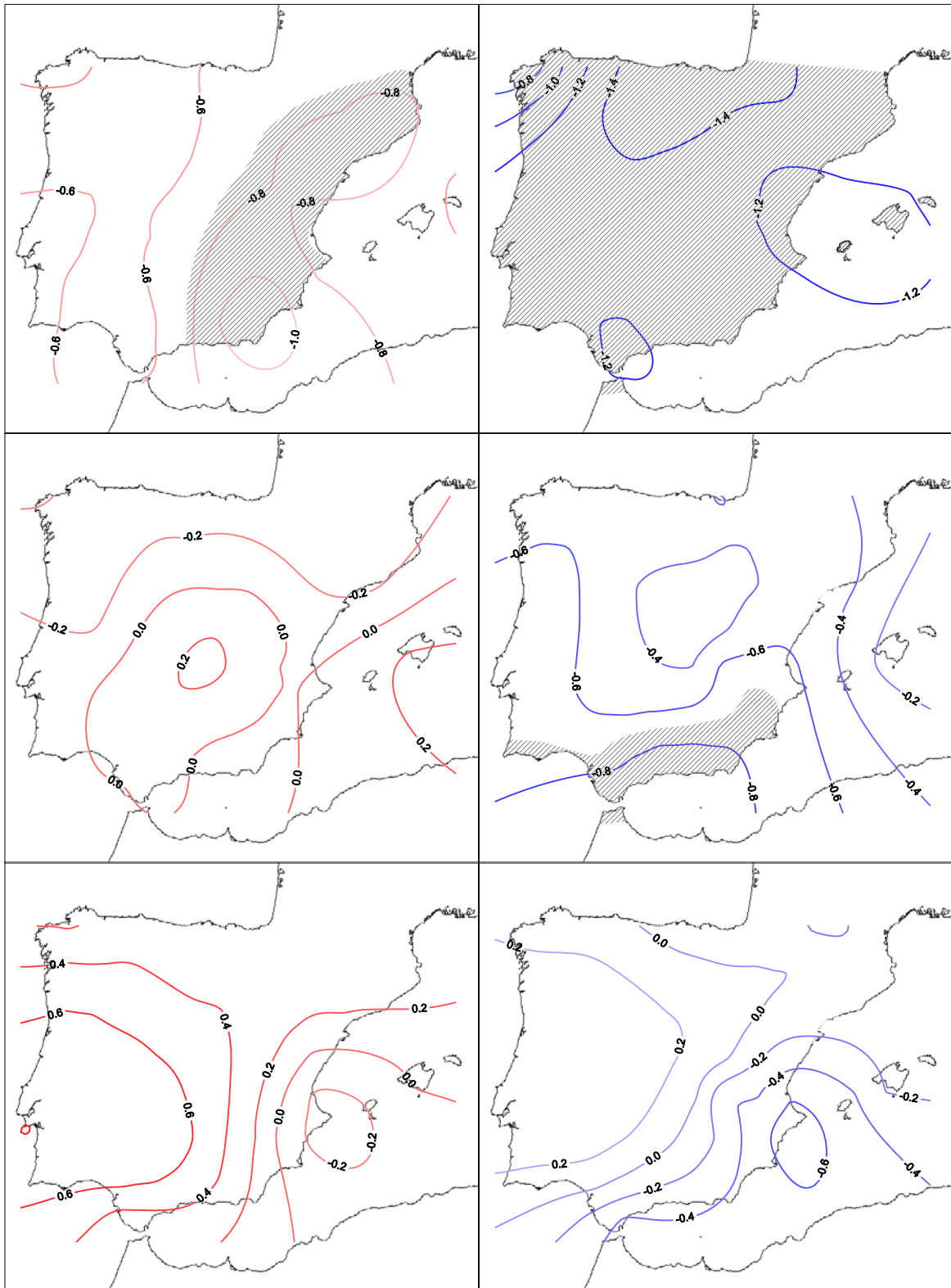


Figura 3.32. Com en la figura 3.30, però per als mesos d'octubre (+2) (superior), agost (+3) (centre) i setembre (+3) (inferior), després de l'aplicació del mètode AES per al conjunt de quatre erupcions tropicals. El ratllat indica els sectors que superen el llindar del nivell de significació (0.05) fixat per Monte Carlo.

Per tancar el capítol dedicat a la resposta tèrmica, tot seguit es presenten quatre figures que representen l'evolució de les anomalies estandarditzades de temperatura màxima i mínima en els quatre anys posteriors a les cinc erupcions tropicals escollides i en quatre punts latitudinals repartits per l'àrea d'estudi. Els resultats es presenten a resolució estacional i s'han escollit quatre punts de malla que venen a representar el sud-est (figura 3.33.), el centre (figura 3.34.), el nord-oest (figura 3.35.) i el nord-est (figura 3.36.) peninsulars. Com es veurà, els diferents resultats que s'havien indicat fins ara es confirmen aquí i prenen un major protagonisme.

Fent un cop d'ull ràpid a les diferents figures, es pot comprovar com la corresponent al sud-est peninsular (figura 3.33.) presenta un comportament ben diferenciat. Així, s'observa que en tot el període post-volcànic les temperatures mínimes mostren unes anomalies gairebé sempre negatives, i especialment evidents en els dos anys que hi ha entre la tardor de l'any de l'erupció i la segona tardor. Per la seva part, les màximes tendeixen a ser més altes que la mitjana o molt properes a aquesta en el mateix interval, destacant-se doncs un aspecte que ja s'havia apuntat anteriorment i és el clar augment de l'amplitud tèrmica i que es fa més contundent en el primer any posterior a les erupcions. Les estacions que mostren un descens més apreciable són la tardor de l'any de l'erupció, el segon hivern i la segona tardor. En tots tres casos, el descens és manifest tant en les mínimes com en les màximes. A grans trets es podria fixar el període d'afectació volcànica el que ve limitat per la tardor de l'any de l'erupció i per la segona tardor, tot i que les temperatures mínimes no s'acaben de recuperar en el tercer i quart any. En tot cas, les anomalies positives d'entitat no es presenten en cap de les estacions post-volcàniques, ni en cap dels dos paràmetres, donant suport a la idea que és en aquest sector on el refredament induït pel vulcanisme tropical de gran magnitud és més intens.

A mida que hom es desplaça cap al nord, aquest senyal es va diluint. Al centre de la Península (figura 3.34.) encara s'identifiquen les mateixes estacions amb una resposta més evident. Fins i tot, les temperatures mínimes tendeixen a presentar de nou una major sensibilitat (per bé que amb menys claredat que en el cas anterior) i les anomalies positives si bé hi són més presents, encara són d'escassa entitat. Però per als dos punts més septentrionals aquest mateix patró no és vàlid: les anomalies negatives s'intercalen amb períodes d'anomalies positives; aquestes darreres assoleixen uns valors molt més contundents i es fa difícil detectar el període afectat pel vulcanisme.

Aquest efecte de dents de serra es fa més evident en el sector nord-occidental (figura 3.35.).

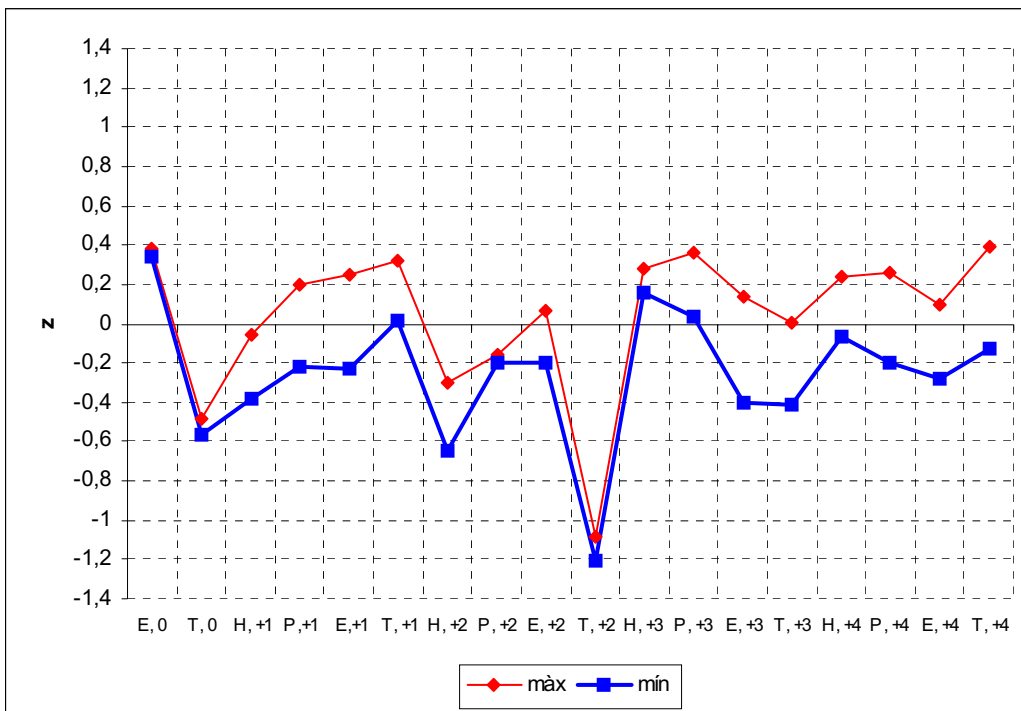


Figura 3.33. Resultat de l'aplicació del mètode AES a les temperatures màximes (línia vermella) i mínimes (línia blava) estacionals corresponents a un punt localitzat al sud-est de la Península Ibèrica (37.25 / -2.25). Les erupcions són un conjunt de quatre erupcions tropicals i les dates claus són els gensers dels anys de les erupcions. E=Estiu (JJA), T=Tardor (SON), H=Hivern (DJF) i P=Primavera (MAM). 0 indica l'any de l'erupció, +1, el primer any posterior i així successivament.

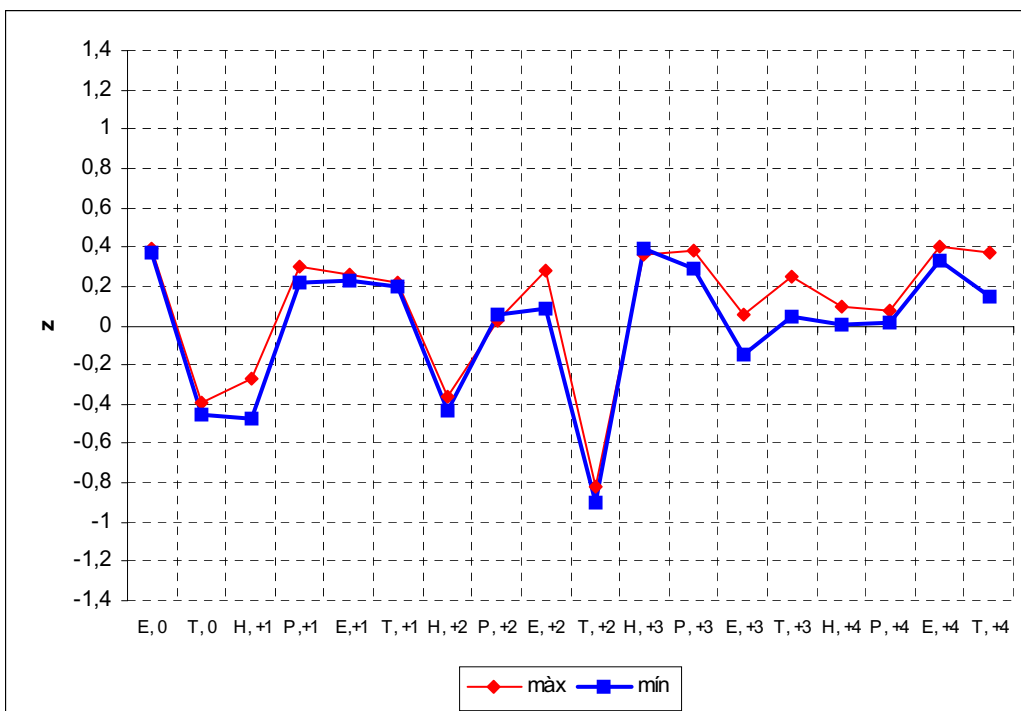


Figura 3.34. Com en la figura 3.33. però per a un punt localitzat al centre de la Península Ibèrica (41.25 / -3.25).

Al nord-est peninsular, i a diferència de la resta de sectors, són les temperatures màximes les que majoritàriament són més afectades pel refredament (figura 3.36.). Aquest extrem es fa evident a les tres estacions de tardor dels tres anys post-eruptius, tot i que també cal dir que el refredament experimentat és d'una magnitud molt modesta, tant en aquests mesos com en els de la resta del període. Igualment, és destacat l'escalfament experimentat en els dos primers estius posteriors a les erupcions, tant en aquest sector com al nord-oest, fet que confirmaria que com a mínim al sud-oest d'Europa els anomenats “anys sense estiu” post-volcànics no s’hi donarien. De fet, hi ha autors que referent a aquest aspecte, fan algunes matisacions. Així, entre les conclusions d'un grup de treball dedicat al clima global de l'any 1816, *Wilson* [1992] indica que les condicions de fred anormal que s'enregistraren l'estiu de 1816 foren un fenomen regional (i no pas global), i lligat probablement a la combinació de dos fenòmens: la gran erupció del volcà Tambora l'any precedent i el mínim en el nombre de taques solars d'aquell mateix any. És a dir, que resultaria una mica temerari aplicar el terme “any sense estiu” a tots els mesos d'estius post-volcànics.

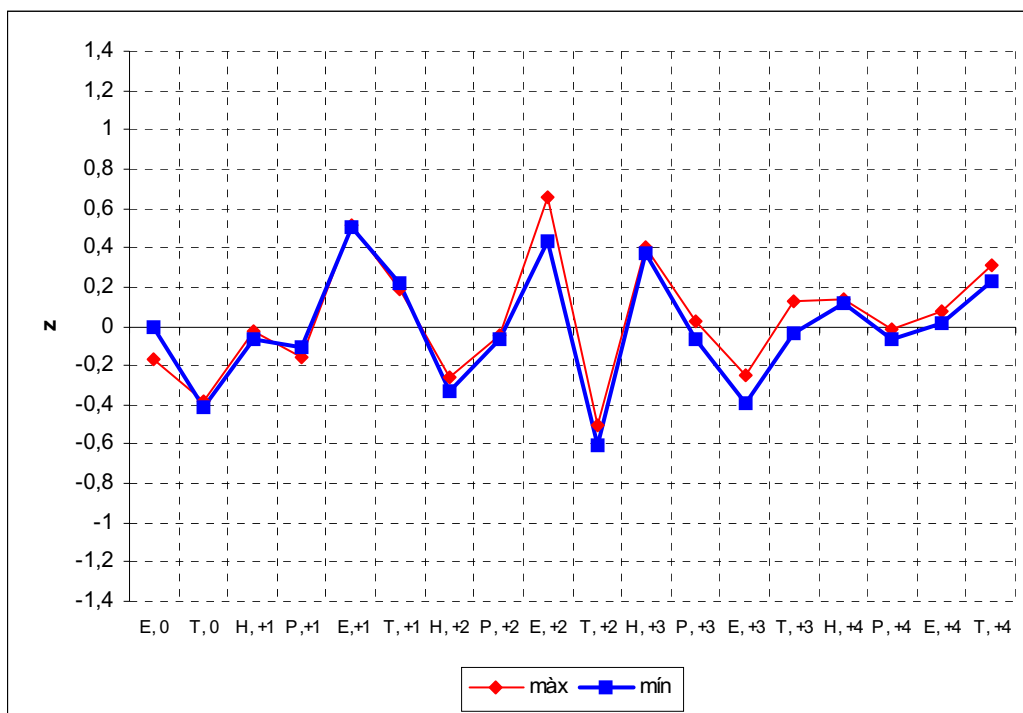


Figura 3.35. Com en la figura 3.33. però per a un punt localitzat al nord-oest de la Península Ibèrica (43.25 / -8.25).

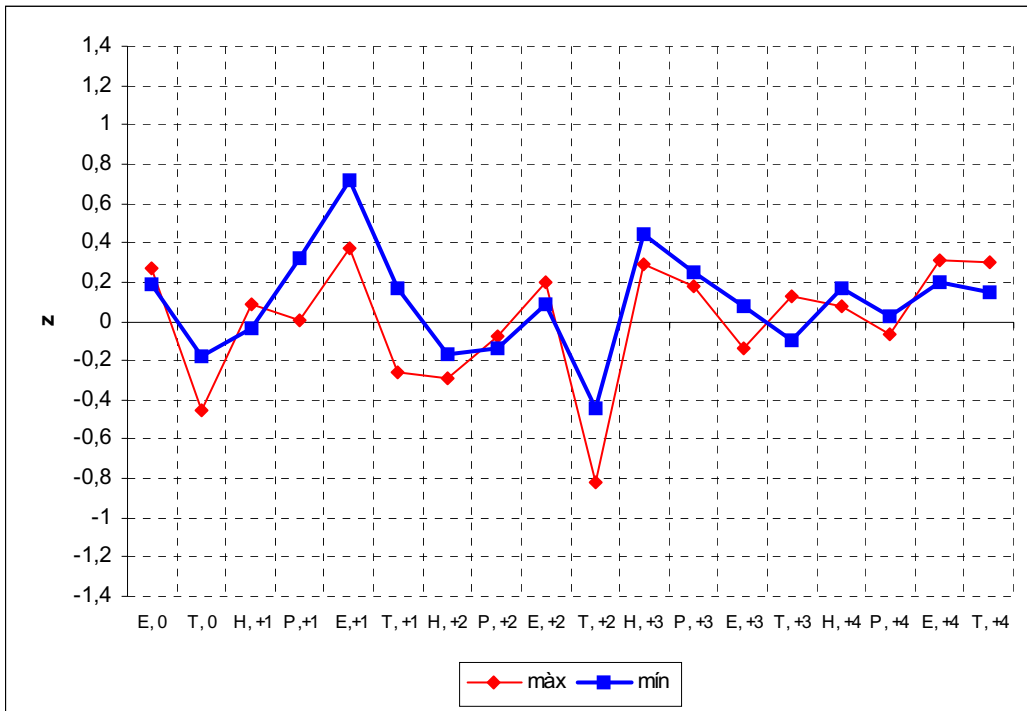


Figura 3.36. Com en la figura 3.33. però per a un punt localitzat al nord-est de la Península Ibèrica (43.25 / 1.75).

CONCLUSIONS CAPÍTOL 3

Les erupcions volcàniques són un conegut factor de forçament extern que afecta al sistema climàtic amb una periodicitat variable. A escala global, el principal efecte derivat d'aquest tipus d'impacte és el descens de la temperatura de l'ordre de 0.3°C a 0.5°C, especialment apreciable en el primer any posterior a l'erupció. Ara bé, a nivell regional i a escales temporals més breus, la resposta de la temperatura varia no només en quan a la magnitud sinó també en el signe, podent-se produir en determinats punts del planeta anomalies positives en algun moment del període post-volcànic.

La temperatura de la Península Ibèrica no queda exempta de la influència del vulcanisme de gran magnitud essent les característiques bàsiques de la seva resposta les següents:

- En els dos a tres anys posteriors a una erupció volcànica tropical de gran magnitud, la temperatura mitjana de la Península Ibèrica presenta anomalies negatives de temperatura més o menys generals d'una magnitud aproximada de 0.3°C. Tant la durada com la intensitat del senyal són similars a les experimentades a escala global i hemisfèrica. Majoritàriament, són els mesos de tardor i els dos primers hiverns posteriors a la data de l'erupció els que solen mostrar una resposta més evident, podent-se enregistrar descensos de l'ordre de -1.3°C en alguns d'aquests mesos.
- La temperatura mitjana peninsular també és sensible a erupcions de latituds elevades de l'Hemisferi Nord, tot i que en aquest cas el senyal és més breu però, alhora, més intens. Així, la durada aproximada de l'impacte és d'un any i mig i el descens mitjà en aquest període és d'aproximadament 0.4°C. Els mesos d'estiu i tardor del mateix any de l'erupció semblen ser els més sensibles, essent el mes de juliol el quin mostra un descens més accentuat: aproximadament -0.9°C.
- En qualsevol dels dos casos, les anomalies positives d'entitat hi són pràcticament inexistent.
- La distribució espacial de la incidència volcànica sobre la temperatura mostra un sector meridional peninsular més sensible que no pas el sector més septentrional, en ambdós tipus d'erupcions.
- Davant d'erupcions tropicals, les temperatures mínimes de la major part de la Península mostren una resposta molt més evident que no pas les màximes. Aquest extrem és sobretot vàlid al sud i centre peninsulars, mentre que al nord-est s'inverteix aquest comportament.
- Es pot concloure que la Península Ibèrica s'emmarca en una àrea de transició pel que fa a la incidència del vulcanisme, entre un sector proper al continent africà molt més sensible al refredament i un sector septentrional, a cavall de l'Europa continental, on les anomalies negatives són molt més diluïdes i, fins i tot, de signe contrari en alguns mesos.

