

ALMA MATER STUDIORUM·UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea Magistrale in Fisica del Sistema Terra

Caratterizzazione delle formazioni
cicloniche associate a precipitazioni
estreme sulla Sardegna

Relatore:
Prof. Vincenzo Levizzani

Presentata da:
Carlotta Usala

Correlatori:
Dott. Paolo Boi
Dott. Francesco Marra
Dott. Giulio Monte

Sessione IV
Anno Accademico 2021/2022

Ai miei genitori,
a Diego e Sofia

Porto docce fresche per i fiori assetati
dai mari e dai ruscelli;
Porto ombra leggera per le foglie quando si posano
nei loro sogni di mezzogiorno.
Dalle mie ali sono scosse le rugiade che risvegliano
I dolci boccioli di ognuno,
Quando si cullano per riposare sul seno della madre
Come lei danza intorno al sole.
Io brandisco il flagello della grandine sferzante
E imbianco le verdi pianure sottostanti,
E poi di nuovo la dissolvo nella pioggia
E rido mentre passo nel tuono.

Percy Bysshe Shelley,
La nuvola, 1820

La vedi nel cielo quell' alta pressione,
la senti una strana stagione?
Ma a notte la nebbia ti dice d' un fiato
che il dio dell'inverno è arrivato.

Francesco Guccini
Quello che non, 1990

Talor pe' campi infuriato scorre con turbo orrendo, e le gran
piante atterra; talor col soffio impetuoso
svelle selve annose...

De Rerum Natura (I, 385),
Lucrezio (c.99-55 A.C)

Indice

Elenco delle figure.....	iv
Elenco delle Tabelle	vi
Sigle e Acronimi	vii
Sommario.....	1
1 Introduzione	2
2 Dati e Metodi.....	5
2.1 Osservazioni al suolo.....	5
2.1.1 Lettura dei dati di precipitazione osservati.....	7
2.2 Dati di rianalisi	9
2.2.1 Lettura dei dati di rianalisi.....	11
2.3 Classificazione dei cicloni in cluster	12
2.4 Analisi sinottica e statistica delle variabili dinamiche.....	17
2.5 Analisi stagionale della precipitazione e dei cluster.....	18
2.6 Precipitazione totale associata ai cicloni estremi.....	19
2.6.1 Definizione dell’inizio e fine dei cicloni	19
2.6.2 Indici per la caratterizzazione della precipitazione	20
2.6.3 Analisi della precipitazione totale a scala sub-regionale.....	21
3 Risultati e discussione.....	22
3.1 Temperatura superficiale del mare mensile media	22
3.2 Climatologia dei cicloni.....	24
3.2.1 Stagionalità delle giornate di precipitazione oltre 200 mm/giorno	24
3.2.2 Stagionalità e frequenza dei cluster	25
3.2.3 Precipitazione totale a scala sub-regionale est/ovest.....	31

3.3 Analisi sinottica	43
3.3.1 Campo di geopotenziale medio a 500 hPa.....	43
3.3.2 Campo di pressione media al suolo	45
3.3.3 Campo di temperatura media a 850 hPa.....	46
3.3.4 Campo di vento medio tra 700-1000 hPa e 250-500 hPa	48
3.3.5 Vorticità potenziale media a 250 hPa	51
3.3.6 Umidità relativa media a 250 hPa.....	53
3.3.7 Anomalia di temperatura superficiale del mare.....	54
3.4 Meccanismi fisici dei cicloni C1 e C2	56
3.4.1 Meccanismi fisici del cluster C1.....	56
3.4.2 Meccanismi fisici del cluster C2.....	57
3.4.3 Confronto tra i meccanismi fisici tra il cluster C1 e il cluster C2	58
3.5 Casi di studio significativi	60
3.5.1 Caso rappresentativo per il cluster C1: giornata del 22 ottobre 2008.....	60
3.5.2 Caso rappresentativo del cluster C2: giornata del 26 gennaio 1992.....	64
3.6 Limitazioni delle analisi	69
4 Conclusioni	70
Bibliografia	73
Ringraziamenti	76

Elenco delle Figure

Figura 2.1 Tipica configurazione di un cluster C1	13
Figura 2.1 Tipica configurazione di un cluster C2	13
Figura 3.1 Temperatura superficiale media del mare riferita al periodo 1979-2009.....	23
Figura 3.2 Stagionalità delle precipitazioni che hanno superato la soglia del 200 mm/giornata nel periodo 1951-2009.....	25
Figura 3.3 Stagionalità dei cluster C1, C2, C3 e misti nel caso di singole giornate o più giornate consecutive in cui si registrano precipitazioni di almeno 200 mm, per il periodo 1951-2009.....	26
Figura 3.4 Stagionalità dei cicloni appartenenti ai cluster C1, C2, C3 nel caso di cicloni che determinano precipitazione maggiore o uguale a 200 mm/giorno per un solo giorno nel periodo 1951-2009.....	27
Figura 3.5 Stagionalità dei cicloni appartenenti ai cluster C1, C2, C3 e misti nel caso in cui producono precipitazione di almeno 200 mm/giorno per oltre un giorno nel periodo 1951-2009....	27
Figura 3.6 Frequenza dei cicloni appartenenti ai cluster C1, C2, C3 e misti in funzione del numero di giorni durante i quali la precipitazione risulta di almeno 200 mm/giorno per il periodo 1951-2009.	28
Figura 3.7 Frequenza decennale dei cicloni appartenenti ai cluster C1, C2, C3 e misti con la relativa somma per il periodo 1951-2009.....	29
Figura 3.8 Frequenza dei cicloni appartenenti ai cluster C1 e C2 in funzione del numero di giorni con precipitazione di almeno 200 mm/giorno per il periodo di 1951-2009.	30
Figura 3.9 Localizzazione delle stazioni della rete pluviometrica ARPAS considerate nell'analisi climatologica per il periodo 1951-2009.....	32
Figura 3.10 Precipitazione cumulata areale associata al cluster C1 e C2 calcolata per il settore est ed ovest della Sardegna.).....	34
Figura 3.11 Precipitazione cumulata areale associata al cluster C1 e C2 per le giornate in cui è stata superata la soglia dei 200 mm calcolata per il settore est ed ovest della Sardegna).....	36
Figura 3.12 Area della Sardegna colpita dalle precipitazione intense del 15-18 ottobre 1951 e del 6-7 dicembre 2004.	41

Figura 3.13 Esempi di precipitazione cumulata totale dei soli giorni in cui è stata superata la soglia dei 200 mm in almeno una stazione nelle giornate del 15-18 ottobre 1951 e 6-7 dicembre 2004	42
Figura 3.14 Campo medio dell'altezza di geopotenziale a 500 hPa.....	43
Figura 3.15 Campo medio della pressione al suolo.....	46
Figura 3.16 Campo medio della temperatura calcolata a 850 hPa	47
Figura 3.17 Campo medio del vento calcolato alle superfici isobariche di 700-1000 hPa	49
Figura 3.18 Campo medio del vento calcolato alle superfici isobariche di 250-500 hPa	50
Figura 3.19 Campo medio della vorticità potenziale a 250 hPa	52
Figura 3.20 Campo medio della umidità relativa a 250 hPa.....	53
Figura 3.21 Anomalia di temperatura superficiale media relativa al periodo 1979-2009.....	55
Figura 3.22 Ricostruzione della precipitazione totale dei soli giorni in cui è stata superata la soglia dei 200 mm in almeno una stazione e area interessata dalle precipitazioni intense del 22 ottobre 2008	60
Figura 3.23 Campo di geopotenziale sulla superficie isobarica a 500 hPa e MSLP, campo di geopotenziale e temperatura sulla superficie isobarica a 850 hPa per la giornata del 22 ottobre 2008	61
Figura 3.24 Campo di vento a 10 m, alla superficie isobarica a 850 hPa, 500 hPa,e 250 hPa per la giornata del 22 ottobre 2008.....	62
Figura 3.25 Campo di vorticità potenziale a 250 hPa e campo di umidità relativa a 250 hPa per la giornata del 22 ottobre 2008.....	63
Figura 3.26 Ricostruzione della precipitazione totale dei soli giorni in cui è stata superata la soglia dei 200 mm in almeno una stazione e area interessata dalle precipitazioni intense del 26 gennaio 1992	65
Figura 3.27 Campo di geopotenziale sulla superficie isobarica a 500 hPa e di MSLP, campo di geopotenziale e temperatura sulla superficie isobarica a 850 hPa per la giornata del 26 gennaio 1992.....	66
Figura 3.28 Campo di vento a 10 m, alla superficie isobarica a 850 hPa, 500 hPa e 250 hPa per la giornata del 26 gennaio 1992.....	67
Figura 3.29 Campo di vorticità potenziale a 250 hPa e campo di umidità relativa a 250 hPa per la giornata del 26 gennaio 1992.....	68

Elenco delle Tabelle

Tabella 1 Variabili, unità di misura utilizzate e relative superfici isobariche in base ai prodotti ERA5 Hourly	10
Tabella 2 Giornate di precipitazione in cui è stata registrata la rilevazione più alta in assoluto di precipitazione in almeno una stazione nel periodo 1979-2009 e considerate nelle rianalisi ERA-5 per la elaborazione dei campi per i quattro orari sinottici (00, 06, 12, 18 UTC) e dei casi significativi.	18
Tabella 3 Tabella riassuntiva della temperatura media superficiale del mare mensile	22
Tabella 4 Tabella riassuntiva degli eventi considerati per la precipitazione cumulata totale areale dal 1951-2009 per il cluster C1	33
Tabella 5 Tabella riassuntiva degli eventi considerati per la precipitazione cumulata totale areale dal 1951-2009 per il cluster C2.	33
Tabella 6 Quattro eventi del cluster C1 (precipitazione totale < 100 mm)	35
Tabella 7 Quattro eventi del cluster C2 (precipitazione totale < 150 mm).	35
Tabella 8 Quattro eventi del cluster C1 (precipitazione totale < 50 mm)..	37
Tabella 9 Cinque eventi del cluster C2 (precipitazione totale > 50 mm)	37

Sigle e Acronimi

ARPAS	Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente della Sardegna
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
C3S	Copernicus Climate Change Service
CAPE	Convective Available Potential Energy
ECMWF	European Centre for Medium-range Weather Forecasts
ERA	ECMWF Re-Analysis
LCL	Lifting Condensation Level
LFC	Level of Free Convection
MSLP	Mean Sea Level Pressure
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCL	NCAR Command Language
netCDF	Network Common Data Form
SST	Sea Surface Temperature

Sommario

Gli eventi degli ultimi due decenni hanno mostrato come la Sardegna, in particolare il suo settore est, sia soggetta a frequenti eventi di precipitazione intensa che comportano perdita di vite umane e ingenti danni. Le alluvioni avvenute a Olbia nel 2013 o la più recente avvenuta a Bitti nel 2020 sono la dimostrazione dell'impatto che questi eventi possono avere sul territorio.

Dal punto di vista della pratica previsionale di questi fenomeni intensi, è in uso presso ARPAS una classificazione dei cicloni avvenuti nel periodo compreso tra il 1957 e il 1999, che presentano configurazioni bariche simili e raggruppati in gruppi o "cluster".

Lo scopo di questo lavoro di tesi è estendere questa classificazione per il periodo 1951-1957 e 2000-2009, sulla base della configurazione sinottica in quota e al suolo in cui si sviluppano i cicloni appartenenti ai vari cluster. Tramite questa nuova classificazione, e utilizzando la temperatura superficiale media del mare, verrà analizzata la loro stagionalità e la loro durata temporale. Infine, sarà ricostruita la precipitazione legata ai diversi cluster suddividendo la precipitazione per i settori est e ovest dell'isola, per valutarne distribuzione e variabilità spaziale.

I risultati mostrano come vi siano differenze tra i cicloni associati a ciascun cluster in base alle diverse configurazioni sinottiche. Un fattore importante è dato anche dalla stagione in cui i cicloni si verificano: emerge una frequenza maggiore nei mesi autunnali in cui le temperature medie mensili e l'anomalia di temperatura media risulta più alta.

La distribuzione spaziale delle precipitazioni associate ai cluster conferma che le precipitazioni più intense e omogenee interessano il settore est dell'isola.

Poiché lo studio è basato interamente su una classificazione di tipo operativo in uso ad ARPAS, i suoi sviluppi riguardano soprattutto un maggior supporto e conoscenza previsionale degli eventi estremi sulla Sardegna.

1. Introduzione

Le precipitazioni intense nel bacino del Mediterraneo rappresentano importanti rischi naturali per il territorio e la popolazione (Cossu et al., 2010). In base agli eventi degli ultimi due decenni risulta che i fenomeni alluvionali in Sardegna non sono eventi rari e spesso comportano numerose perdite di vite umane e ingenti danni. Eventi piuttosto recenti avvennero nella Sardegna centro orientale come l'alluvione del 6 dicembre 2004 a Villagrande Strisaili, in cui vennero registrati circa 600 mm nell'arco di poche ore e in cui morirono due persone con danni per oltre 20 milioni di euro.

Nella Sardegna nord-orientale l'evento più recente risale al 28 novembre 2020¹ in cui fu colpita la provincia di Nuoro dove vennero registrati i massimi di precipitazione a Oliena (500 mm), Dorgali Filitta (446 mm) e Bitti (338 mm). Proprio a Bitti l'onda di piena del torrente Cuccureddu, fuoriuscito dal canale tombato che percorre il paese, comportò la morte di tre persone, 68 sfollati e ingenti danni.

Uno dei casi però più estremi verificatosi in Sardegna avvenne nelle giornate dal 15 al 18 ottobre 1951 in Ogliastra (Sardegna centro-orientale) in cui si registrarono 1500 mm di pioggia totale. Si registrarono danni ingenti nei paesi a valle del Flumendosa a causa della sua esondazione, mentre frane e smottamenti portarono un rapido abbandono da parte della popolazione dei paesi di Gairo e Osini. Nei paesi di Lanusei e Barisardo vi furono cinque morti.²

Il 18 novembre 2013 gli effetti del ciclone chiamato "Cleopatra" colpirono nuovamente l'area nord-orientale con precipitazioni superiori ai 450 mm in 12 ore.³ In tutta la Sardegna vi furono 16 morti, 43 feriti e 2300 sfollati con danni per oltre 660 milioni di euro. L'area più colpita dall'evento fu Olbia ma furono colpite anche le zone dell'Ogliastra, dell'Oristanese e del Medio Campidano.

Un'altra area particolarmente colpita da alluvioni è la Sardegna meridionale. Il 22 ottobre 2008 nella città di Capoterra caddero 460 mm nell'arco di poche ore. In quella giornata morirono quattro persone con danni ingenti a infrastrutture e abitazioni.

¹ <https://polaris.irpi.cnr.it/event/alluvione-di-bitti-nu/>

² https://www.regione.sardegna.it/messaggero/1972_dicembre_10-11.pdf

³ <https://polaris.irpi.cnr.it/sardegna-2013-la-furia-del-ciclone-cleopatra/>

Gli eventi sopra elencati mostrano come siano colpite principalmente le aree della Sardegna centro orientale e sud-occidentale, in particolare nei mesi di ottobre e novembre. Infatti, a causa della sua posizione al centro del bacino del Mediterraneo, il clima della Sardegna è legato a differenti tipi di masse d'aria che vengono fatte convergere sull'isola da diverse configurazioni bariche a scala sinottica in determinati periodi dell'anno e in determinate aree. Durante l'autunno, in particolare, lo spostamento dell'anticiclone delle Azzorre verso nord comporta la discesa di masse d'aria dall'Oceano Atlantico verso il Mediterraneo attraverso la valle del Rodano, della Loira e dell'Ebro e la risalita di masse d'aria provenienti dalla cintura sub-tropicale (Serra e Sollai, 1990), con sviluppo di centri di bassa pressione o nell'area afro-mediterranea o nel Mediterraneo occidentale che possono persistere nelle medesime aree, talvolta per un lungo intervallo temporale.

Tali configurazioni sinottiche possono portare a fenomeni di precipitazione estremamente intensa. Inoltre, come si evince dalle analisi climatologiche di ARPAS, le precipitazioni medie annue per il periodo 1951-1980⁴ e dal 1981 al 2010⁵ mostrano quattro zone caratterizzate da alti valori di precipitazione. Le aree a ridosso del Gennargentu (Barbagie, Ogliastra e zone limitrofe) e la parte centrale della Gallura (a ridosso del Limbara) mostrano valori medi annuali tra gli 800 e i 1000 mm annui, nell'altopiano di Campeda (Sardegna nord-occidentale) 800 mm, mentre nell'Iglesiente (Sardegna sud-occidentale) emergono zone con valori medi annuali di precipitazione tra i 600 e gli 800 mm annui. Per quanto riguarda le precipitazioni medie mensili il mese di novembre, dicembre e febbraio rispecchiano le quattro zone con alti valori di precipitazioni che vengono evidenziate dalle medie annuali mentre un forte gradiente est-ovest si evidenzia principalmente nel mese di ottobre.

Un ulteriore fattore che può determinare notevoli variazioni delle masse d'aria e delle aree depressionarie in arrivo sull'isola e modifiche alla distribuzione delle precipitazioni sull'isola è la sua orografia complessa (Serra e Sollai, 1990) che può portare fenomeni intensi a scala locale.

Difatti, il territorio della Sardegna è formato nella sua parte orientale da pianure che si sviluppano in modo molto ripido fino al Gennargentu, alto 1835 m (Bodini e Cossu, 2008). Nella sua parte nord-orientale è presente la catena montuosa dei monti del Limbara (1359 m). Nella zona sud-occidentale le pianure risultano meno ripide con la catena montuosa del Sulcis-Iglesiente rappresentata dai monti di Lattias (1086 m), monte Genna Strinta (846 m) e dal monte Arcosu (948

⁴ <http://www.sar.sardegna.it/pubblicazioni/notetecniche/nota2/pag014.asp>

⁵ <https://arpas.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=0bedeb6a438f428bb66372ea592f8eb6>

m). Nella parte centro-occidentale si estende la catena montuosa del Marghine composta dai monti Santu Padre (1030 m), punta Lammeddari (1118 m) e infine monte Palai (1200 m). Al confine con i monti del Marghine si estende la catena montuosa del Goceano in cui Monte Rasu rappresenta la vetta più alta (1259 m).

Dal punto di vista operativo, è possibile individuare le configurazioni sinottiche associate a precipitazioni intense in particolari mesi dell'anno. In tal senso, è in uso presso ARPAS una classificazione dei cicloni avvenuti nel periodo compreso tra il 1957 e il 1999, ottenuta tramite l'analisi delle corrispondenti configurazioni sinottiche al suolo e in quota con dati di rianalisi ERA40. In base all'analisi della configurazione barica, sia al suolo che in quota, sono stati poi raggruppati in gruppi o "cluster" i cicloni che presentano configurazioni bariche simili. Il raggruppamento è stato fatto solo dopo l'analisi sinottica e non tramite una *cluster analysis* numerica (Boi e Marroccu, 2011). Attualmente, la classificazione comprende i cicloni che hanno creato danni al suolo e si limita al periodo compreso tra il 1957 e il 1999.

Primo obiettivo di questa tesi è l'estensione della classificazione a tutti i cicloni che hanno portato precipitazioni estreme sull'isola durante il periodo tra il 1951 e il 1957 e tra il 2000 e 2009. Vengono definite estreme le precipitazioni in grado di superare i 200 mm in un giorno in almeno una località. Tenuto conto dell'intensità delle precipitazioni che hanno interessato la Sardegna negli ultimi decenni e sulla base della classificazione in uso ad ARPAS, questa tesi si pone il secondo obiettivo di verificare se vi sia una stagione in cui queste si verificano con più frequenza. Inoltre, utilizzando analisi di tipo statistico verrà verificato qual è il valore medio della precipitazione totale associata ai cicloni, durante tutto il periodo in cui questi permangono sulla Sardegna o nelle sue vicinanze. Infine, si studierà la distribuzione spaziale della precipitazione totale media per valutare se vi siano delle zone più soggette a fenomeni di precipitazione intensa e se vi siano degli elementi comuni nelle varie configurazioni sinottiche e termodinamiche alla base delle precipitazioni intense sulla Sardegna.

2 Dati e Metodi

È utile definire preliminarmente la terminologia che verrà utilizzata nei paragrafi seguenti:

- **ciclone** - area in cui la pressione centrale risulta più bassa delle aree circostanti e in cui la circolazione del vento si sviluppa in senso antiorario (nell'emisfero settentrionale) e convergente verso il centro;
- **giornata** - giornata durante la quale la precipitazione ha superato i 200 mm in almeno una stazione;
- **giorni consecutivi di precipitazione** - giornate consecutive in cui la precipitazione ha superato i 200 mm in almeno una stazione (non necessariamente la stessa stazione in tutte le giornate);
- **evento** - periodo di giornate consecutive con precipitazione (vedi paragrafo 2.6.1) e includente almeno una giornata durante la quale la precipitazione ha superato i 200 mm in almeno una stazione.

2.1 Osservazioni al suolo

Sul territorio della Regione Sardegna esistono varie reti di stazioni di monitoraggio meteorologico e idrologico gestite da enti pubblici e privati. Poiché tali reti non trasmettevano le informazioni necessarie per gli scopi operativi con trasmissione dei dati in tempo reale o con possibilità di modificare la cadenza di lettura, dal 1990 l'insieme di queste reti è gestito dal Consorzio SAR (Servizio Agrometeorologico Regionale) Sardegna *srl*.⁶ Dal 30 dicembre 2004 il consorzio SAR è confluito all'interno dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Sardegna

⁶ <https://www.sardegnaambiente.it/index.php?xsl=611&s=20&v=9&c=4678&es=4272&na=1&n=10>

(ARPAS). Sempre ad ARPAS è stata trasferita dal 2015 la gestione della rete termo-pluviometrica e idrometrica del settore idrografico.⁷

Le serie temporali di precipitazione analizzate in questo studio provengono da osservazioni al suolo della rete meteo-idrologica ARPAS. Esse sono state fornite in file in formato ASCII, suddivise per provincia (CA, SS, NU e OR) e in base alla rete pluviometrica e idrologica di riferimento (rete SAR e rete del settore idrografico). Al loro interno sono presenti sette colonne:

- Nella prima colonna sono presenti i dati ordinati in ordine crescente di data.
- La seconda colonna riporta il codice identificativo della stazione. Esso identifica univocamente la stazione poiché vi sono stazioni diverse ma installate nel medesimo comune, quindi con lo stesso nome. Inoltre, permette anche di identificare la rete pluviometrica: le prime due lettere indicano la provincia, la terza indica la rete pluviometrica; la lettera B indica la rete del settore idrografico i cui dati iniziano dal 1951; la lettera S indica la rete SAR (dal 1995 al 2010/2015); la lettera A rappresenta i dati dell'Aeronautica (dal 1995 al 2010/2015); le stazioni con la lettera R o Q si possono equiparare alla rete SAR.
- Nella terza colonna è presente il nome della stazione che indica il comune in cui questa è installata.
- La quarta colonna indica da quale ora inizia il valore cumulato; nelle stazioni dell'Ente Idrografico inizia alle 8 fino alle 8 del giorno dopo; nelle stazioni SAR dalle ore 24 alle 24 del giorno dopo.
- La quinta colonna indica su quante ore è stato calcolato il valore cumulato.
- L'ultima colonna è un flag che indica la qualità del dato, ed è presente solo per i dati SAR; il dato si può considerare buono se il flag è 0 oppure una lettera maiuscola oppure 9. Negli altri casi in cui il flag è assente il dato è da considerarsi buono in quanto già verificato da ARPAS.

Per l'analisi di queste serie di dati verranno utilizzati la data, il codice della stazione, la cumulata giornaliera di precipitazione e, quando presente, il flag.

⁷ <https://sardegnacedoc.it>

I dati pluviometrici contengono tutte le serie storiche di precipitazione; in questo studio verranno calcolate le cumulate totali misurate nell'intero evento e successivamente solo le cumulate che hanno superato i 200 mm/giorno tramite un metodo che verrà approfondito nel paragrafo 2.6.3.

La georeferenziazione delle stazioni è fornita in un file separato, che contiene: latitudine, longitudine, quota e distanza dal mare, nome e codice della stazione. Di questi sono stati utilizzati unicamente codice della stazione, nome, latitudine e longitudine; quota e distanza dal mare non sono utili ai fini del nostro studio.

Oltre ai dati di precipitazione sono stati utilizzati ulteriori due file contenenti la lista delle stazioni presenti nel settore orientale e nel settore occidentale della regione secondo l'organizzazione operativa di ARPAS, il relativo codice e il comune in cui queste si trovano.

2.1.1 Lettura dei dati di precipitazione osservati

I dati utilizzati per l'analisi provengono da tredici file in totale. I primi dieci contengono i dati di precipitazione osservati suddivisi per le quattro province (CA, OR, SS, NU): quattro file con i dati di precipitazione del settore idrografico e sei con i dati della rete SAR; l'undicesimo file contiene le coordinate di latitudine e longitudine delle stazioni; gli ultimi due contengono l'elenco delle stazioni suddivise per il settore est e per il settore ovest. I dati forniti sono formattati in un file di testo (formato ASCII).

È stato sviluppato un codice *Matlab* per racchiudere i dati in un unico file dal 1951 al 2009. Questo aiuterà le fasi successive dello studio permettendo una riduzione della dimensione del file e una lettura molto più veloce.

Il codice si occuperà di leggere i file di testo forniti e di organizzare le stazioni e i dati di precipitazione in due settori: settore est e ovest, definiti seguendo l'organizzazione in uso presso ARPAS. Il codice è costituito da due parti. La prima è composta da nove fasi mentre i dettagli della seconda parte del codice, consistente in cinque fasi, verrà discusso nel paragrafo 2.6.3. Le nove fasi della prima parte del codice sono di seguito riassunte:

1. Lettura del file contenente sei colonne: latitudine, longitudine, distanza dal mare e quota a cui si trovano le stazioni. Per leggere velocemente i dati è stata utilizzata la funzione *Matlab textscan*; nella prima colonna verranno ignorati i caratteri, mentre verranno letti come stringa e in doppia precisione le restanti cinque colonne.

2. Creazione di una *struttura Matlab* (*Matlab struct*) a più elementi, cioè un tipo di dato composto da diversi campi ciascuno dei quali è caratterizzato da un nome e può contenere diversi tipi di variabili; in questo caso i campi sono sei cioè il nome della stazione, il suo codice, la latitudine, la longitudine, la quota e la distanza dal mare. Successivamente verranno aggiunti campi ulteriori contenenti le serie temporali di precipitazione giornaliera, le relative date e flag.
3. Lettura della lista dei dieci file di testo che contengono i dati di precipitazione; viene sempre utilizzata la funzione *textscan*, ma questa volta sono presenti sette colonne. In ciascun file le prime due colonne verranno lette come stringhe (la data e il codice), la terza, la quarta e la quinta non verranno lette mentre le ultime due verranno lette come numero in virgola mobile a doppia precisione e come stringa rispettivamente.
4. Poiché le date sono in un formato non leggibile da *Matlab*, verrà creato un array apposito con la funzione *datenum*; tramite opportuna conversione ci si è assicurati che le date salvate con solo due cifre per l'anno (e.g. "99" per "1999") fossero lette correttamente.
5. Pulizia dei dati di pioggia utilizzando delle condizioni sulla base del flag. Si impone la condizione per i dati non buoni quando il flag risulta maggiore o uguale a 1 e minore o uguale a 8; in corrispondenza dei punti in cui i flag risulti compreso tra 1 e 8 verrà associato un NaN (*Not a Number*).
6. Creazione, tramite un ciclo *for*, di una struttura finale che conterrà anche la struttura creata nella prima fase; alla *struct* di ciascuna stazione verranno assegnata la latitudine, la longitudine, la data, il dato di precipitazione e flag. Il numero totale delle stazioni disponibili è pari a 367.

7. Lettura degli altri due file di testo che contengono la lista delle stazioni nel settore est e ovest e di questi ultimi verranno letti solo i codici delle stazioni e il settore corrispondente a ogni stazione verrà salvato in un apposito campo della *struct*.
8. Correzione di alcune stazioni che presentavano problemi nelle informazioni su latitudine e longitudine (casi con latitudine e longitudine invertiti, mancanza del separatore decimale) e conversione delle coordinate da gradi-minuti-secondi a gradi decimali.
9. Unione della struttura dei dati letti con le latitudini e longitudini corrette assieme alla lista dei file letti per le stazioni est ed ovest. Verranno create due regioni in cui saranno suddivisi i dati letti e le stazioni identificate dai loro codici; queste regioni verranno chiamate est e ovest in base al valore di un flag assegnato (*flag=1 ovest, flag=2 est*). Con questa ultima fase, per ogni evento di precipitazione sarà possibile associare una stazione per ogni regione, da poter riportare poi in una mappa per chiarezza espositiva.

2.2 Dati di rianalisi

Per poter procedere con l'analisi sinottica sono stati utilizzati dati di rianalisi. Esse si basano sul principio del *data assimilation* il quale permette di comporre i dati del modello con le osservazioni rilevate da tutto il mondo in un insieme globalmente completo e coerente. Su questo principio si basano i metodi utilizzati dai centri di previsione meteorologica numerica per le cosiddette *analisi* in cui ogni 12 ore, come avviene all'European Centre for Medium Weather Forecasts (ECMWF), una previsione precedente viene unita a nuove osservazioni disponibili per produrre la miglior stima dello stato dell'atmosfera dal quale viene emessa una previsione sempre migliore e aggiornata. Le rianalisi di ECMWF non possiedono il vincolo di una previsione tempestiva, dunque, il tempo per la raccolta delle osservazioni è superiore rispetto alle analisi, in particolar modo se si procede a ritroso nel tempo.⁸

⁸ <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview>

Tramite l'analisi sinottica sono state individuate due categorie o cluster, intesi come raggruppamenti di elementi omogenei di un insieme di dati. In base alla situazione barica al suolo e in quota, i cicloni con caratteristiche bariche simili verranno divisi in due cluster differenti. Tutte le situazioni bariche che si discostano da quelle contenute in questi due cluster verranno inseriti in un terzo gruppo.

La classificazione in cluster si basa su quella operativa in ARPAS, sviluppata per i cicloni avvenuti dal 1957 al 1999 tramite l'utilizzo di rianalisi climatiche ERA40 (la seconda versione delle ECMWF Re-Analyses). Il lavoro, perciò, si è articolato in due fasi: la prima si è basata sullo studio delle rianalisi e della classificazione in cluster fornita, in modo da comprendere le strutture bariche fondamentali alla base dei due cluster; nella seconda fase sono state utilizzate le più recenti rianalisi ERA5 per estendere la classificazione realizzata da ARPAS ai cicloni avvenuti nel periodo dal 1951 al 1957 e dal 2000 al 2009.

Variabili	Unità di misura	Superficie	Prodotto
Geopotenziale	m^2s^{-2}	500 hPa	ERA5 Hourly-Pressure levels
Pressione sul livello del mare	hPa	1013 hPa	ERA5 Hourly-Single level
Vorticità potenziale	$K \cdot m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$	250 hPa 500 hPa	ERA5 Hourly -Pressure levels
Temperatura	K	850 hPa	ERA5 Hourly-Single level
Componenti del vento u,v a 10 m	$m \cdot s^{-1}$	700-1000 hPa 250-500 hPa	ERA5 Hourly-Single level
Temperatura superficiale del mare	K	Vicino alla superficie del mare	ERA5 Hourly – Single level

Tabella 1 Variabili, unità di misura utilizzate e relative superfici isobariche in base ai prodotti ERA5 Hourly - Pressure levels e ERA5 Hourly – Single level. ERA5 Hourly - Pressure levels. La risoluzione verticale di quest'ultimo set è pari a 37 livelli di pressione (da 1000 hPa a 1 hPa) e la risoluzione temporale è oraria. ERA5 Hourly – Single level ha una risoluzione oraria su livelli singoli.

I dati ERA5 (l'ultima versione delle ECMWF Re-Analyses) consistono di dati orari di diverse variabili meteorologiche e di superficie (terrestre e marina) su una griglia regolare avente una risoluzione di $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ in latitudine-longitudine (circa 30 km). I dati ERA5 sono stati estratti dal database Copernicus Climate Change Service (C3S).

Le giornate estratte dal database sono unicamente quelle in cui sono stati superati i 200 mm di precipitazioni in una giornata in almeno una stazione (Tabella 2, paragrafo 2.4). Gli orari considerati sono i tipici orari di assimilazione dei dati utilizzati per le previsioni meteorologiche, cioè i quattro orari sinottici (00, 06, 12, 18 UTC).

Le variabili analizzate sono state scaricate da due prodotti ERA5: "ERA5 Hourly – Single level", contenente variabili di superficie, e "ERA5 Hourly – Pressure levels" contenente variabili atmosferiche in tre dimensioni organizzate in livelli di pressione. Le variabili utilizzate con le relative unità di misura sono riassunte nella Tabella 1.

2.2.1 Lettura dei dati di rianalisi

I dati di rianalisi ERA5 sono stati elaborati utilizzando il linguaggio open-source NCL, il quale permette, tramite script, di poter analizzare e visualizzare dati climatici e meteorologici di rianalisi espressi nel formato netCDF.

Le fasi principali in cui sono stati sviluppati gli script per trattare le variabili dinamiche e termodinamiche introdotte nella Tabella 1, possono essere riassunte nel modo seguente:

1. Sviluppo di codici in linguaggio NCL;
2. inserimento delle variabili di interesse all'inizio del codice;
3. selezione dell'intervallo temporale di interesse;
4. calcolo di parametri statistici;
5. rappresentazione dei dati in proiezione cilindrica secondo la rappresentazione di uso comune per le mappe sinottiche;
6. ritaglio del dominio a seconda della risoluzione desiderata.

2.3 Classificazione dei cicloni in cluster

Come per i dati di precipitazione, lo studio si concentra su cicloni che si sono verificati dal 1951 al 2009 durante i quali almeno una stazione ha registrato una precipitazione al suolo superiore ai 200 mm in un giorno. La scelta della soglia di precipitazione superiore ai 200 mm/giorno nasce da un compromesso tra l'esigenza di concentrarsi su eventi particolarmente intensi o estremi, e la numerosità del campione di cicloni disponibili. Si tratta quindi di una scelta di tipo empirico. Nell'arco temporale di 60 anni, le analisi ci mostrano che i cicloni in cui almeno una stazione ha misurato almeno 150 mm in un giorno sono 120 (circa 2 casi all'anno), diventano 63 per 200 mm/giorno (circa 1 caso all'anno), e 22 per 300 mm/giorno (circa 1 caso ogni 3 anni). Le soglie da 400 mm/giorno in poi non sono state oggetto di studio in quanto nell'arco dei 60 anni risultano molto rare. Gli eventi di precipitazione con soglia superiore ai 200 mm/giorno risultano circa 1 caso ogni anno, e sono quindi assimilabili a estremi intesi come massimi annuali (Gumbel, 1958).

L'obiettivo è di organizzare i cicloni che presentano configurazioni bariche simili tra di loro in cluster. Come introdotto nel paragrafo 2.2, la classificazione fatta da ARPAS si estende dal 1957 sino al 1999 mentre in questo lavoro è stata rifinita tale classificazione ed estesa dal 1951 al 1957 e dal 2000 al 2009. Non si è potuto estendere ulteriormente la classificazione fino ai giorni nostri a causa di una diminuzione delle stazioni disponibili dal 2010 in poi. Tale riduzione, infatti, porterebbe alla possibile non osservazione di superamenti della soglia scelta, con un conseguente sotto-campionamento dei cicloni rispetto al periodo esaminato.

I cicloni sono stati scelti e classificati in base alle loro caratteristiche bariche seguendo la procedura operativa presso ARPAS:

- **Cluster I (C1):** minimo o saccatura a 500 hPa sulla penisola Iberica con avvezione di vorticità ciclonica sulla Sardegna. Minimo al suolo sulle Baleari o sul nord Africa o canale di Sardegna. Venti al suolo sud-orientali sulla Sardegna.
- **Cluster II (C2):** minimo chiuso su tutti i livelli sul canale di Sardegna, o sul Nord-Algeria, o sulla Tunisia, o sul canale di Sicilia.
- **Gruppo III (C3):** questo gruppo contiene tutte le configurazioni bariche che non possiedono né le caratteristiche comuni (presenti nei due cluster precedenti) né la stessa frequenza, in quanto più rari.

L'oggetto di questo studio sarà limitato ai cluster C1 e C2 in quanto risultano più frequenti, presentano caratteristiche bariche simili e una stagionalità ben definita rispetto ai cicloni del gruppo C3.

A titolo di esempio sono mostrati in Figura 2.1 e Figura 2.2 i tipici casi per il cluster C1 e C2 basati su dati di rianalisi ERA40.

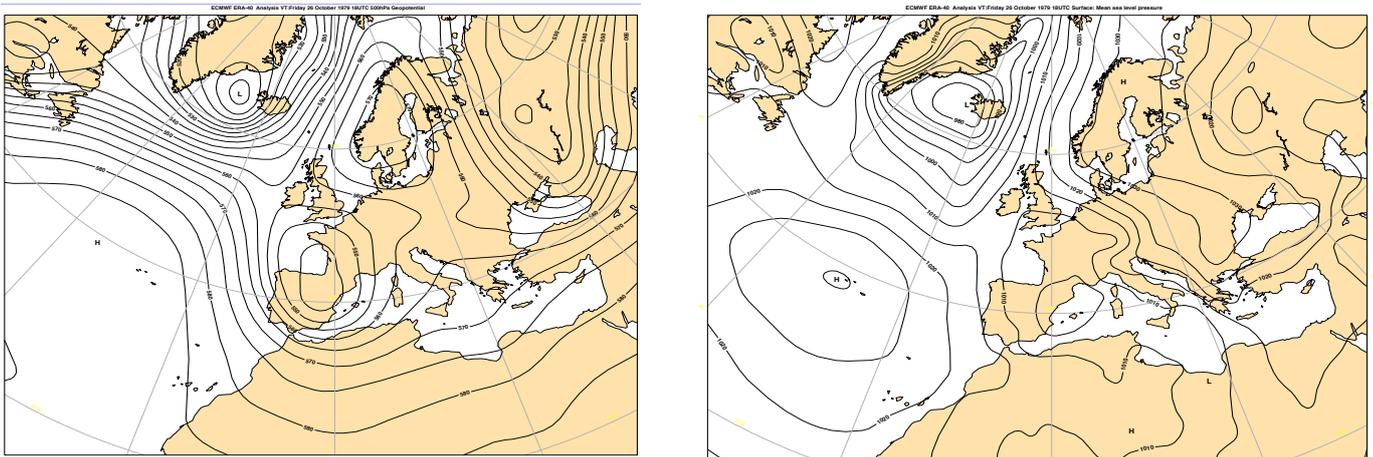


Figura 2.1 Tipica configurazione barica di un cluster C1 sulla base di dati di rianalisi ERA40 disponibili per il 26 ottobre 1979. A sinistra è rappresentato il geopotenziale sulla superficie isobarica di 500 hPa, a destra la pressione media al suolo (in hPa).

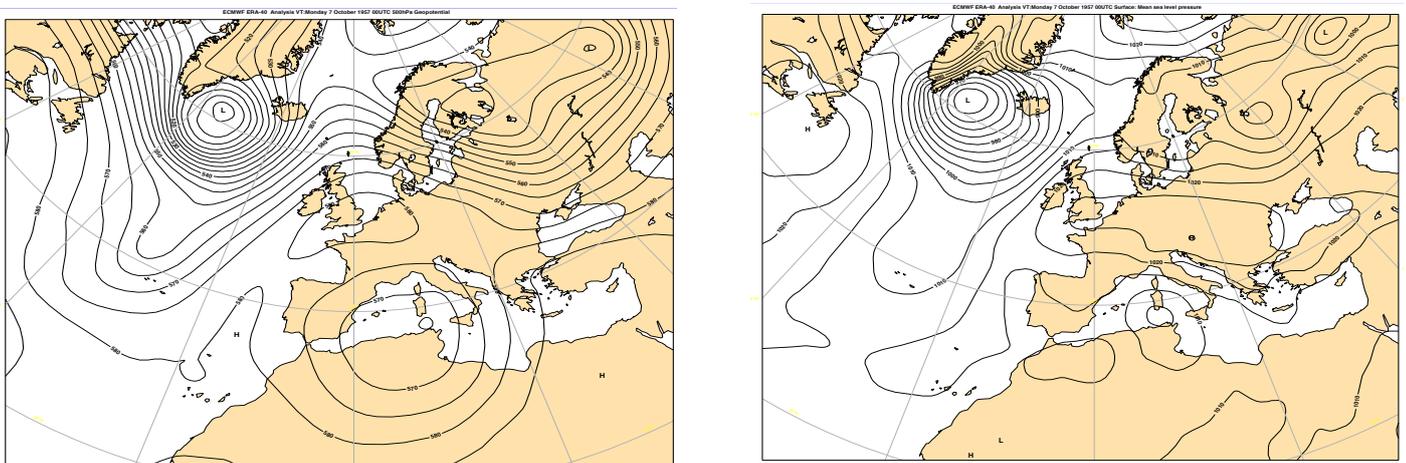


Figura 2.2 Tipica configurazione barica di un cluster C2 sulla base di dati di rianalisi ERA40 disponibili per il 7 ottobre 1957. A sinistra è rappresentato il geopotenziale sulla superficie isobarica di 500 hPa, a destra la pressione media al suolo (in hPa).

Con riferimento alla Tabella 1 le variabili utilizzate per la classificazione sono le seguenti:

- **Geopotenziale:** Il geopotenziale Φ in un qualsiasi punto dell'atmosfera terrestre è definito come *“il lavoro necessario a vincere la forza di gravità e sollevare una massa d'aria unitaria dal livello del mare (dove il geopotenziale è zero) fino a quel punto”*.

$$\Phi(z) = \int_0^z g dz$$

In questo lavoro è stato convertito il geopotenziale in altezza di geopotenziale (espressa in dam) che viene definita dalla seguente relazione:

$$Z = \frac{\Phi(z)}{g_0} = \frac{1}{g_0} \int_0^z g dz$$

Dove g_0 è l'accelerazione media dovuta all'accelerazione di gravità alla superficie terrestre (considerata uguale a $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Le superfici isobariche considerate per l'elaborazione nell'analisi sinottica sono le seguenti:

- **Superficie isobarica a 500 hPa:** si riferisce ad altezze mediamente poste intorno ai 5500 m, ma presenta variazioni stagionali (quote più basse in inverno e più elevate d'estate). In essa si possono individuare i promontori, le saccature e la loro natura.
- **Superficie isobarica a 850 hPa:** si riferisce a quote comprese mediamente tra i 1300 e 1600 metri. Permette di individuare i massimi e minimi di geopotenziale in bassa troposfera. Inoltre, l'analisi del campo di temperatura a tale livello isobarico permette di individuare le avvezioni termiche delle masse d'aria e la localizzazione dei sistemi frontali. I fenomeni che limitano l'analisi dei sistemi frontali con l'uso della temperatura a 850 hPa sono i sollevamenti adiabatici lungo i rilievi o i fenomeni non adiabatici legati al rilascio di calore latente durante la formazione delle nubi.
- **Pressione media sul livello del mare (Mean Sea Level pressure, MSLP):** questa variabile indica la pressione che esercita l'atmosfera alla superficie della Terra, ridotta sull'altezza del livello medio del mare; poiché i gradienti di pressione sono grandi lungo la verticale (dell'ordine di $10 \text{ kPa} \cdot \text{km}^{-1}$) ma piccoli nella direzione orizzontale (dell'ordine di $0.001 \text{ kPa} \cdot \text{km}^{-1}$), le differenze di pressione tra le stazioni meteorologiche sono dominate dalle

quote a cui esse si trovano al di sopra del livello del mare. Per rimuovere l'influenza dominante dell'elevazione a cui si trova la stazione tramite il gradiente di pressione verticale, la pressione che viene riportata dalla stazione P_{stn} (*Reported Station Pressure*) viene estrapolata a un'altitudine costante come il livello medio del mare (Mean Sea Level, MSL). Le mappe meteorologiche della pressione sul livello medio del mare così ottenute sono utilizzate per localizzare i centri di alta e bassa pressione al suolo (anticicloni e cicloni). La procedura di estrapolazione è chiamata riduzione della pressione a livello del mare, P_{MSLP} , ed è effettuata utilizzando l'equazione ipsometrica:

$$P_{MSLP} = P_{stn} \cdot \exp\left(\frac{z_{stn}}{a \cdot \overline{T}_{*v}}\right)$$

Dove $a = \mathfrak{R}_d/|g| = 29.3 \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$ e \overline{T}_{*v} è la temperatura virtuale in K .

L'analisi di questa variabile in un'analisi sinottica ha lo scopo di identificare le posizioni dei sistemi meteorologici di bassa e alta pressione, spesso indicati come cicloni e anticicloni.

- **Vorticità potenziale (PV)**

Essa è definita come (Ertel, 1942):

$$P = -g(\zeta_\theta + f) \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \text{da cui} \quad \frac{DP}{Dt} = 0$$

dove g è l'accelerazione di gravità, ζ_θ la vorticità calcolata su superfici isentropiche, f il parametro di Coriolis (dipendente dalla latitudine), θ la temperatura potenziale e z l'altezza al di sopra della superficie del mare; poiché $\partial\theta/\partial z$ rappresenta il gradiente di temperatura potenziale esso può essere visto come una misura locale della profondità dello strato tra due superfici isentropiche; un aumento di $\partial\theta/\partial z$ implica un allungamento della colonna d'aria e un aumento della vorticità assoluta, mentre una diminuzione di $\partial\theta/\partial z$ implica una compressione della colonna d'aria e una diminuzione della vorticità assoluta. Dunque, la generazione della vorticità può avvenire tramite la variazione della stabilità statica lungo superfici isentropiche oppure tramite la variazione della latitudine; in condizione di moti adiabatici, la variazione dell'uno o dell'altro parametro permette la conservazione della vorticità potenziale. Poiché la vorticità potenziale è positivamente correlata con l'ozono nella bassa stratosfera extratropicale essa è un tracciante particolarmente adatto per definire la tropopausa. Vi sono due definizioni per la tropopausa, una termica e l'altra dinamica, entrambe fornite dal WMO.

-Tropopausa termica: *“è definita come il più basso livello al quale il gradiente di temperatura decresce di $2 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ o meno, a condizione che il gradiente medio tra questo livello e i livelli superiori non superi $2 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ (WMO, 1957)”*.

Questa definizione convenzionale della tropopausa “termica” non tiene conto del fatto che, dal punto di vista chimico, la tropopausa varia stagionalmente in quanto la tropopausa tropicale corrisponde approssimativamente a una superficie isentropica di circa 380 K (media annuale) mentre la tropopausa extratropicale corrisponde a una superficie con vorticità potenziale costante. Dunque, si definisce la tropopausa dinamica:

-Tropopausa dinamica: *“è definita sia statisticamente, sia dal punto di vista sinottico che locale, dal valore $P = 1.6 \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, considerando un’analisi oggettiva di 8 anni di analisi zonali, di cross-section di temperature potenziale, vento e vorticità potenziale” (WMO, 1985).*

Con questa definizione, e dalle osservazioni sperimentali, l’altezza della tropopausa dinamica è comunemente considerata come il livello alla quale la vorticità potenziale è uguale a 2 PVU, dove con PVU si indica l’unità di vorticità potenziale ($1\text{PVU} = 10^{-6} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). Seguendo la definizione del WMO, la superficie isentropica a 1.6 PVU si trova al di sotto della tropopausa definita come termica.

Nella troposfera la vorticità potenziale è tipicamente al di sotto di 2 PVU ed è relativamente uniforme, ma nella stratosfera è superiore ai 2 PVU: ciò corrisponde a una massa d’aria discendente e molto secca caratterizzata da alti valori di stabilità.

- **Vento:** per questa variabile è stato calcolato il valore medio tra le superfici isobariche 700-1000 hPa e 250-500 hPa; il primo caso è utile non solo per valutare la direzione dei venti nella bassa troposfera ma anche la provenienza delle masse d’aria; il secondo caso è adatto per valutare sia la variazione del vento nella medio-alta troposfera (shear verticale) sia per individuare (soprattutto analizzando il vento in alta quota) la posizione della corrente a getto e le zone in cui è massima la sua intensità (Jet Streak); individuare, a livello generale, il massimo del getto è importante in quanto a esso sono associate le zone di massima vorticità

positiva, dovuta allo shear, che determinano divergenza in quota e intensificazione dei sistemi frontali o approfondimenti barici.

- **Temperatura superficiale del mare:** è stata utilizzata sia per determinare le medie mensili sia per il calcolo delle anomalie, entrambe riferite al periodo climatologico di riferimento 1979-2009.

2.4 Analisi sinottica e statistica delle variabili dinamiche

Come già introdotto nel paragrafo 2.3, l'analisi sinottica ha come obiettivo la ricerca degli elementi che differenziano o che accomunano i cluster C1, C2; si estrapolerà una giornata da ciascun cluster che presenti caratteristiche significative da punto di vista della quantità di precipitazione al suolo.

La procedura seguita è la seguente:

1. tramite l'utilizzo della caratterizzazione sinottica introdotta del paragrafo 2.3, sono state considerate le giornate e i giorni consecutivi a partire dai quattro orari sinottici (00, 06, 12, 18 UTC) in cui in almeno una stazione, è stata rilevata una precipitazione superiore ai 200 mm/giorno associata ai cluster C1 e C2.
2. In base al metodo con cui sono stati sviluppati i codici (paragrafo. 2.2.1), sono stati ricostruiti i campi medi a scala sinottica delle variabili dinamiche e termodinamiche e la relativa deviazione standard a partire dai quattro orari sinottici (00, 06, 12, 18 UTC) per le singole giornate in cui è stata registrata la rilevazione più alta in assoluto di precipitazione in almeno una stazione. I casi considerati nella media sono in tutto 7 per il cluster C1 e 7 per il cluster C2 (Tabella 2).
3. Infine, verrà ritagliato un dominio sulla Sardegna per le singole giornate in cui è registrata la rilevazione più alta in assoluto di precipitazione in almeno una stazione; nel paragrafo 3.5, verranno scelti due casi più significativi dal punto di vista della precipitazione registrata nella singola giornata e che risultano rappresentativi delle tipiche caratteristiche bariche e termodinamiche dei cluster C1 e C2.

C1	C2
26 ottobre 1979	29 dicembre 1980
30 settembre 1986	19 gennaio 1988
1° novembre 1993	26 gennaio 1992
13 novembre 1999	24 novembre 1995
7 dicembre 2004	29 novembre 1999
22 ottobre 2008	28 febbraio 2003
28 novembre 2008	25 settembre 2009

Tabella 2 Giornate di precipitazione in cui è stata registrata la rilevazione più alta in assoluto di precipitazione in almeno una stazione nel periodo 1979-2009 e considerate nelle rianalisi ERA-5 per la elaborazione dei campi per i quattro orari sinottici (00, 06, 12, 18 UTC) e dei casi significativi.

2.5 Analisi stagionale della precipitazione e dei cluster

Utilizzando un foglio Excel, è stata studiata dapprima la stagionalità delle precipitazioni considerando la giornata e i giorni consecutivi in cui la precipitazione è risultata al di sopra dei 200/giorno. Il metodo seguito consiste in un'unica fase in cui è stata impostata una formattazione condizionale in cui è stato verificato che ogni giornata in cui si è superata la soglia fosse avvenuta in un determinato mese.

Successivamente è stato impostato il primo foglio di lavoro per studiare la stagionalità dei cicloni, classificati in base ai criteri introdotti nel paragrafo 2.3. Nel caso in cui vi siano più giorni consecutivi in cui viene superata la soglia dei 200 mm/giorno verrà considerata una sola giornata.

Il metodo seguito si articola in cinque parti principali:

1. Tramite una formattazione condizionale sono stati contati i cicloni classificati; per evitare refusi o sviste si è assegnato il valore 1 quando la giornata è stata contata una volta, 0 quando assente e 0.5 quando la classificazione era di dubbia origine e necessitava di una verifica.
2. Tramite un'altra formattazione condizionale, è stato verificato se la precipitazione fosse avvenuta oppure no. In questo modo è possibile ottenere un conteggio degli eventi di precipitazione per ciascun cluster e per ciascun mese.
3. Per lo studio della stagionalità dei cicloni è stato considerata la singola giornata, poiché a ogni ciclone possono corrispondere più giorni sopra soglia; nel caso in cui la precipitazione

si sviluppi per più giorni consecutivi e la configurazione barica passi da un cluster a un altro con caratteristiche differenti, i cluster vengono definiti come “misti”.

4. Sono state create quindi quattro matrici, tre per i cluster C1, C2 e per il gruppo C3 e una per il cluster misto; sempre tramite una formattazione condizionale è stata testata la persistenza di un determinato cluster per un giorno o per più giorni in funzione del mese.
5. È stato scelto di analizzare la frequenza dei cicloni in base alla loro durata per valutare se nell’arco temporale 1950-2009 vi sia stata o no una regolarità in tal senso. Sempre all’interno delle quattro matrici, è stata impostata una condizione sulla durata del ciclone (uguale a 1, 2, 3, 4, 5 o 6 giorni), a quale cluster appartenesse e un loro conteggio, considerando in quest’ultimo caso solo un controllo sul cluster in modo tale che non presenti variazioni nel caso in cui la sua durata risulti superiori al giorno; questo è per scartare i cluster misti.
6. Infine, nel periodo di riferimento è stato scelto di studiare l’andamento decennale dei cicloni per calcolare il loro numero totale e un loro eventuale aumento.

2.6 Precipitazione totale associata ai cicloni estremi

L’obbiettivo dello studio della precipitazione totale associata ai cicloni è studiare la distribuzione spaziale delle precipitazioni all’interno dei due settori est e ovest. Per fare ciò, è stato suddiviso il codice *Matlab* in due parti: il metodo per la prima parte del codice è stato descritto nel paragrafo. 2.1.1, in cui sono state riassunte le fasi per il calcolo della precipitazione totale osservata sulle stazioni durante ogni ciclone e la relativa variabilità spaziale sulla regione e nei due settori. Nella seconda verrà ripetuta questa analisi concentrandosi sulle giornate in cui è stata superata la soglia di 200 mm/giornata.

2.6.1 Definizione dell’inizio e fine dei cicloni

Per poter procedere con l’analisi delle precipitazioni è necessario definire un criterio oggettivo per individuare l’inizio e la fine dei cicloni, cioè l’evento, tramite sia un’analisi sinottica che di precipitazione al suolo.

Per fare ciò, attraverso l’analisi sinottica, è stata analizzato l’inizio della struttura barica associata al cluster C1 e C2 a cui viene legato l’inizio della precipitazione al suolo sulla Sardegna: questo permette di definire l’inizio del ciclone. Per la fine del ciclone, il criterio si basa sull’individuazione

della variazione della struttura barica tipica del cluster C1 e C2 a cui corrisponde la fine della precipitazione associata; la precipitazione in alcune giornate proseguirà ma con un altro tipo di ciclone e dunque di cluster differente.

2.6.2 Indici per la caratterizzazione della precipitazione

Il numero delle stazioni totali presenti sul territorio è 367 e su queste verrà fatta l'analisi utilizzando la media, la deviazione standard e il coefficiente di variazione. I dati di precipitazione utilizzati saranno quelli associati a 10 eventi del cluster C1 e a 19 eventi per il cluster C2.

La media è definita come:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

dove si indica con:

- N il numero di dati (stazioni)
- $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ sono i dati di precipitazione

Si definisce invece la deviazione standard:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}$$

Infine, il coefficiente di variazione:

$$CV = \frac{\sigma}{|\mu|}$$

L'uso del coefficiente di variazione permette di valutare la variabilità spaziale della precipitazione indipendentemente dalla media di precipitazione osservata.

Lo stesso metodo verrà applicato anche all'analisi dei soli giorni di precipitazione al di sopra dei 200 mm.

Sono state realizzate mappe della Sardegna in cui sono state rappresentate le stazioni in cui è stata calcolata la precipitazione cumulata. Separatamente sono state realizzate altrettante mappe in cui sono evidenziate solo le stazioni in cui sono stati registrati valori al di sopra dei 200 mm. Sono state escluse da questa rappresentazione grafica solo quelle stazioni per cui non è stato possibile risalire alle coordinate di latitudine e longitudine (circa 40 stazioni).

2.6.3 Analisi della precipitazione totale a scala sub-regionale

Una volta assegnati al settore est e ovest le relative stazioni con i dati di precipitazione con la prima parte del codice (paragrafo. 2.1.1) e stabilito un criterio oggettivo per l'inizio e la fine del ciclone (paragrafo. 2.6.1) si può procedere all'analisi statistica della precipitazione totale a scala sub-regionale. Dunque, la seconda parte del codice può essere riassunta in cinque fasi:

1. Caricamento della struttura con i dati letti creata nelle fasi precedenti, in un nuovo codice in cui si inseriscono le date di inizio e fine di tutti i cicloni dal 1951 al 2009 sia per il cluster C1 e C2, tramite la funzione *datenum*.
2. Creazione di una nuova struttura per ogni cluster in cui, tramite un ciclo *for*, verrà associato all'inizio e fine di ogni ciclone il dato di pioggia registrato nella stazione.
3. Calcolo della precipitazione totale media registrata dall'inizio alla fine del ciclone nelle stazioni suddivise precedentemente nel settore est e nel settore ovest; calcolo della deviazione standard e del coefficiente di variazione con la stessa procedura.
4. Tramite lo stesso codice vengono inserite le date di inizio e fine dei cicloni per ciascun cluster che hanno fatto registrare precipitazioni superiori ai 200 mm/giorno.
5. Calcolo della precipitazione totale media, deviazione standard e coefficiente di variazione per ciascun cluster e per tutte le stazioni nel settore est e nel settore ovest.

3 Risultati e discussione

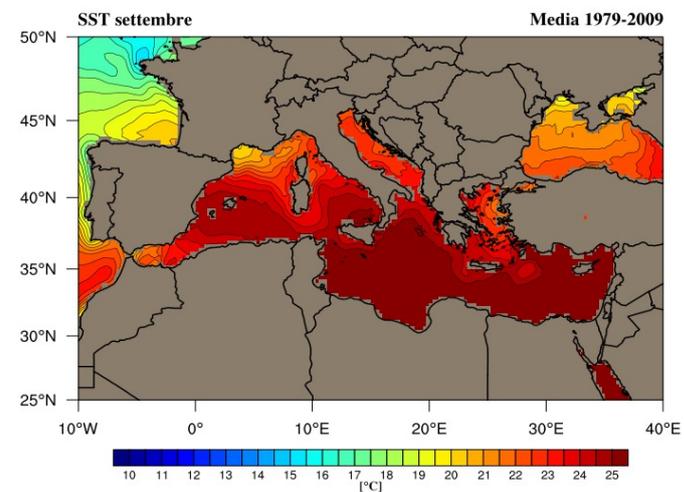
3.1 Temperatura superficiale del mare mensile media

In questo paragrafo verranno analizzati e discussi i risultati ottenuti dal calcolo della temperatura superficiale del mare media nel periodo 1979-2009 per i mesi di settembre, ottobre, novembre, dicembre, gennaio e febbraio (Figura 3.1). Il periodo 1951-1978 non verrà considerato in quanto, nel momento dell'acquisizione dei dati ERA5 è stato scelto di estrarre solo i dati dal 1979 in quanto provenivano da un unico dataset omogeneo.

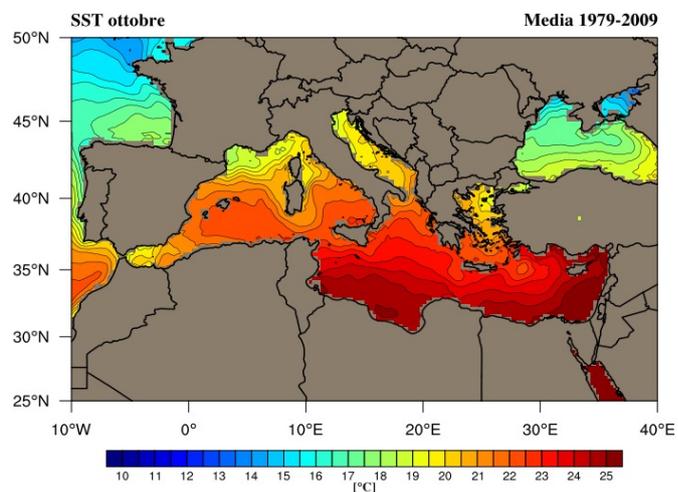
L'area di maggiore interesse è la porzione di Mediterraneo nelle vicinanze dell'isola, cioè il Canale di Sardegna, Mar di Sardegna e Mar Tirreno (Tabella 3). Emerge dalle mappe come le temperature dal mese di settembre al mese di febbraio risultano via via sempre più basse, passando da 23°C a settembre (Figura 3.1.a) a 14°C a febbraio (Figura 3.1.f)

Mese	SST MEDIA (°C)
Settembre	22.5-23
Ottobre	21-21.5
Novembre	17.5- 18
Dicembre	15.5-16
Gennaio	14.5 -15
Febbraio	14-14.5

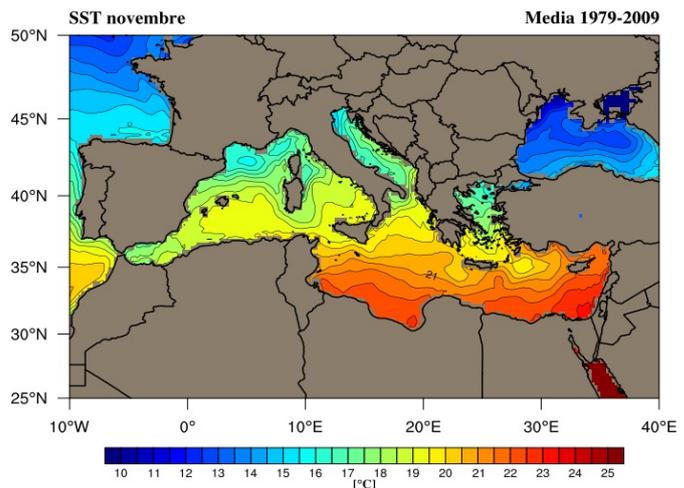
Tabella 3 Tabella riassuntiva della temperatura media superficiale del mare mensile. A sinistra sono indicati i mesi considerati nel calcolo della temperatura media superficiale del mare, nella colonna a destra i valori di temperatura superficiale del mare nell'area prossima alla Sardegna (Canale di Sardegna, Mar di Sardegna e Mar Tirreno)



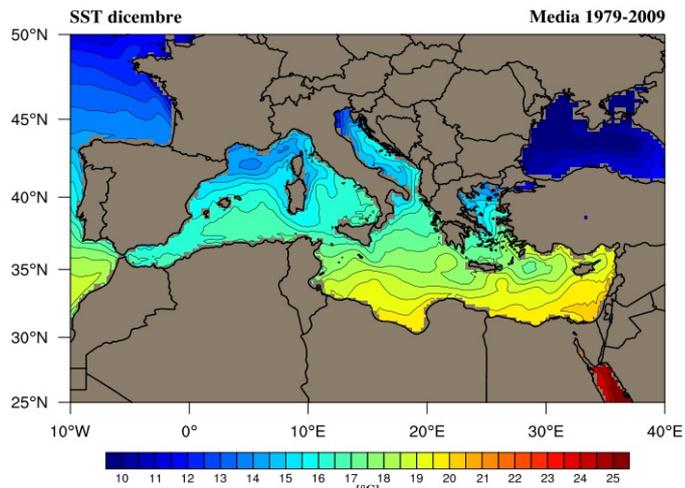
(a)



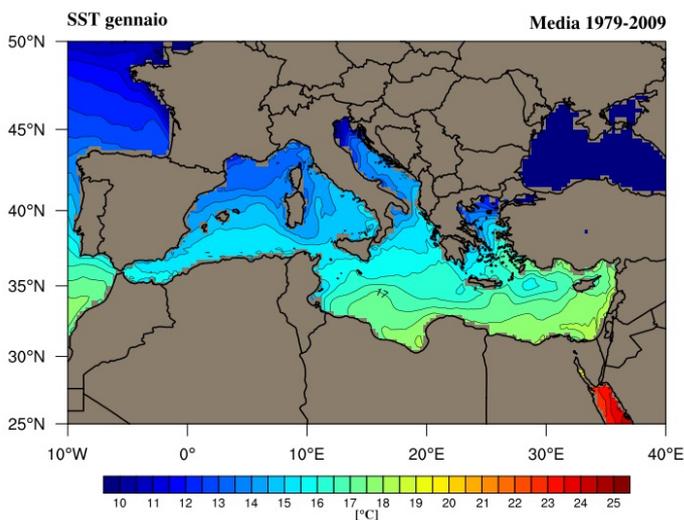
(b)



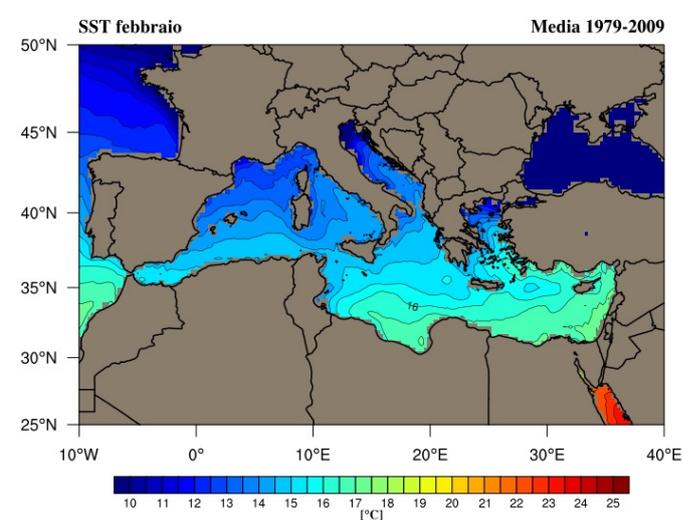
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.1 Temperatura superficiale media del mare riferita al periodo 1979-2009 durante i mesi di settembre (a), ottobre (b), novembre (c), dicembre (d), gennaio (e) e febbraio (f).

3.2 Climatologia dei cicloni

In questa fase dello studio verranno analizzati e discussi i risultati ottenuti tramite i metodi descritti nel Capitolo 2. L'obiettivo è rispondere alle seguenti domande:

1. se vi sia una stagione privilegiata per i fenomeni di precipitazione intensa al di sopra dei 200 mm/giorno, associati ai cicloni appartenenti ai cluster C1, C2 e C3;
2. quale sia la loro stagionalità valutando la loro durata in giorni;
3. se vi sia o meno una regolarità nella loro durata e se si può osservare un loro aumento durante l'arco temporale di osservazione dei dati (1951-2009);
4. quale dei due settori in cui è stata suddivisa la Sardegna, in base alle stazioni pluviometriche, è maggiormente interessata da precipitazioni intense;
5. se il pattern delle precipitazioni sui due settori è dovuto a particolari condizioni sinottiche e termodinamiche.

3.2.1 Stagionalità delle giornate di precipitazione oltre 200 mm/giorno

Prima di mostrare la stagionalità dei cluster è utile poter avere una valutazione quantitativa dei giorni in cui è stata superata almeno in una stazione la soglia dei 200 mm/giorno, in base al mese in cui questa soglia è stata superata

Dal grafico in Figura 3.2 si nota innanzitutto che ottobre e novembre sono i mesi in cui si registra il numero maggiore di giornate di precipitazione sopra soglia con 15 e 21 giorni di precipitazione rispettivamente. In numero minore, ma sempre rilevante, risultano i mesi di dicembre, gennaio in cui risultano 10 giorni e 9 giorni di precipitazione sopra soglia rispettivamente.

STAGIONALITÀ PRECIPITAZIONI >200 mm

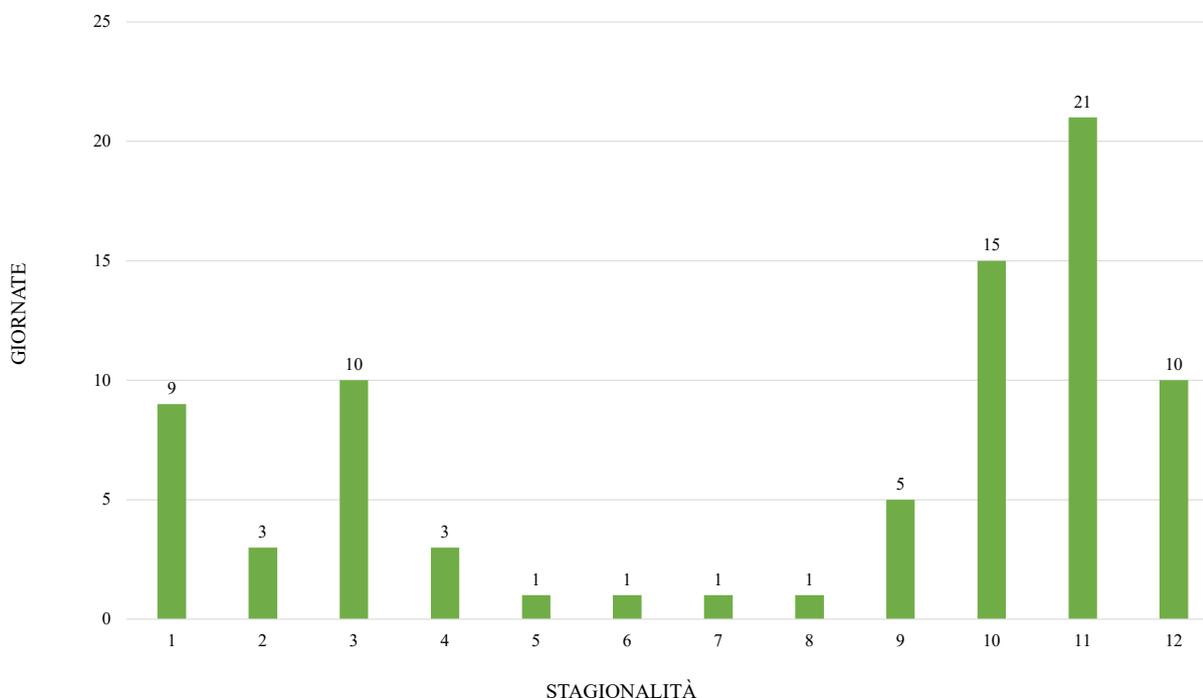


Figura 3.2 Stagionalità delle precipitazioni che hanno superato la soglia del 200 mm/giornata nel periodo 1951-2009.

3.2.2 Stagionalità e frequenza dei cluster

Il conteggio delle giornate in cui si è superata la soglia dei 200 mm/giorno come mostrato in Figura 3.2 ha un limite, in quanto non permette di quantificare la frequenza delle giornate in cui si verifica un determinato ciclone, poiché per ogni ciclone possono corrispondere più giorni sopra soglia. L'analisi della durata per ogni ciclone è importante in quanto fa parte di una delle sue caratteristiche. In generale, più a lungo un ciclone è in grado di sviluppare precipitazione intensa (nel nostro caso 200 mm/giorno) più è alto il potenziale impatto al suolo.

Quindi, nell'ambito della stagionalità dei cluster si è preferito considerare la singola giornata qualora la precipitazione duri più giorni (es. per i giorni consecutivi dal 15 al 18 ottobre 1951 verrà considerato solo il 15 ottobre 1951). Se durante questo arco temporale il ciclone modifica le sue

caratteristiche bariche e passa a un altro cluster esso verrà indicato come “misto”. Le giornate sopra soglia dal 1951 al 2009 sono in tutto 63.

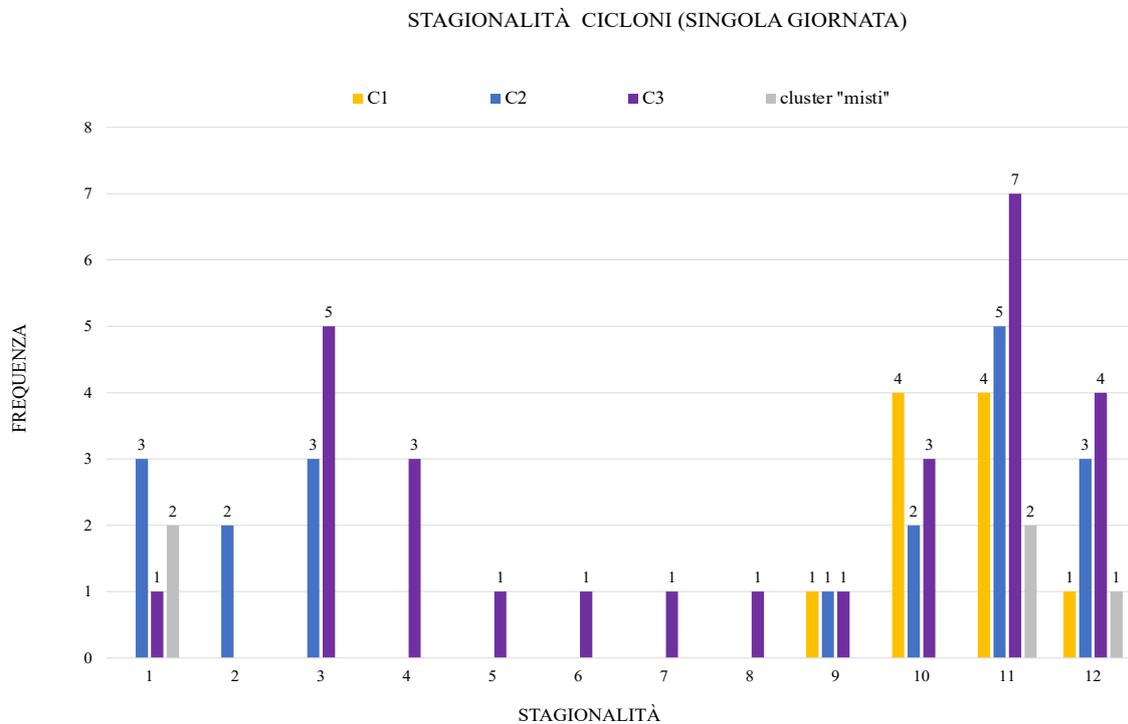


Figura 3.3 Stagionalità dei cluster C1, C2, C3 e misti nel caso di singole giornate o più giornate consecutive in cui si registrano precipitazioni di almeno 200 mm, per il periodo 1951-2009.

Come si può notare dalla Figura 3.3, i cluster C1 mostrano una frequenza maggiore in assoluto nei mesi di ottobre e novembre mentre i cluster C2 nei mesi di novembre; il gruppo C3 risulta anch'esso più frequente nei mesi di novembre e dicembre ma vi è una frequenza elevata anche nel mese di marzo. I cluster misti non si sviluppano frequentemente durante l'anno ma risultano più frequenti nei mesi di novembre e gennaio.

Per valutare la stagionalità dei cicloni in base alla loro durata, sono mostrate rispettivamente la stagionalità dei cicloni quando questi si sviluppano in una sola giornata in cui la precipitazione supera i 200 mm all'interno dello stesso cluster (Figura 3.4) oppure quando il ciclone si sviluppa su più giorni o all'interno dello stesso cluster o (Figura 3.5) variando configurazione barica e passando a un altro cluster (cluster misti).

STAGIONALITÀ DURATA CICLONI (1 GIORNO)

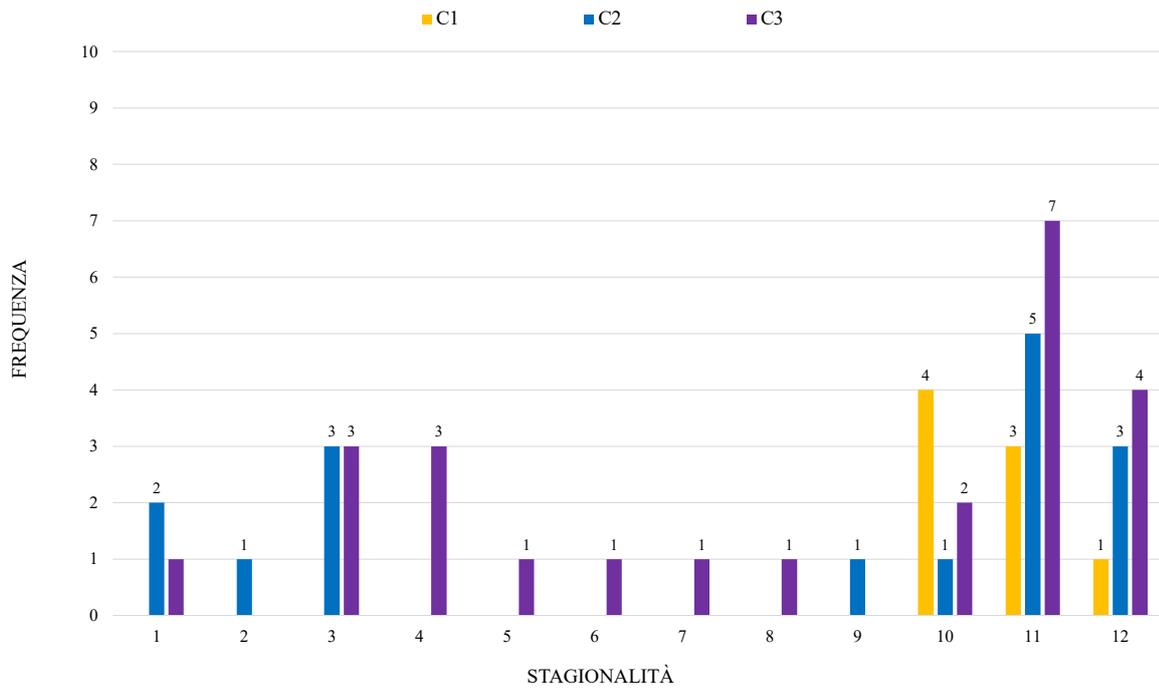


Figura 3.4 Stagionalità dei cicloni appartenenti ai cluster C1, C2, C3 nel caso di cicloni che determinano precipitazione maggiore o uguale a 200 mm/giorno per un solo giorno nel periodo 1951-2009.

STAGIONALITÀ DURATA CICLONI >1 GIORNO

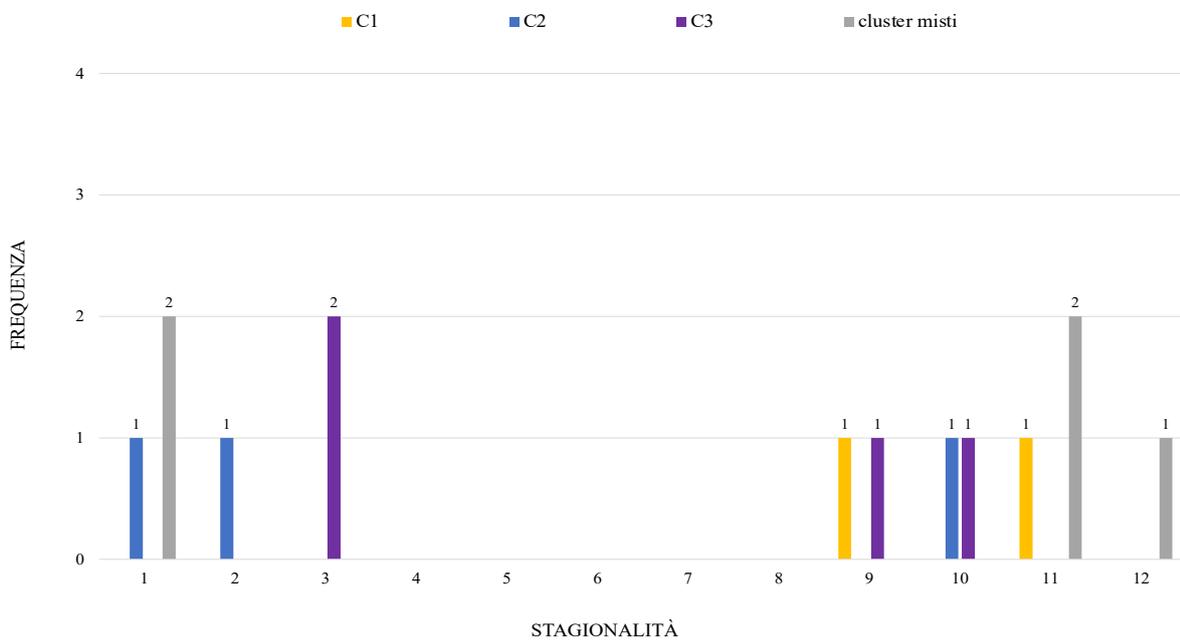


Figura 3.5 Stagionalità dei cicloni appartenenti ai cluster C1, C2, C3 e misti nel caso in cui producono precipitazione di almeno 200 mm/giorno per oltre un giorno nel periodo 1951-2009.

Come mostrato dalla Figura 3.4, il mese in cui si sviluppa con frequenza massima in assoluto il cluster C1 di durata non superiore al giorno è ottobre mentre per il cluster C2 risulta novembre.

Per quanto riguarda la stagionalità dei cicloni la cui durata è superiore al giorno (Figura 3.5), i cluster misti presentano una maggiore frequenza assoluta nel mese di novembre e gennaio mentre i cluster C1 e C2 risultano meno frequenti; il gruppo C3 mostra la frequenza più alta solo nel mese di marzo. Inoltre, ai fini dello studio risulta interessante l'analisi della regolarità nella durata dei cicloni appartenenti ai quattro cluster per capire se vi sia una regolarità.

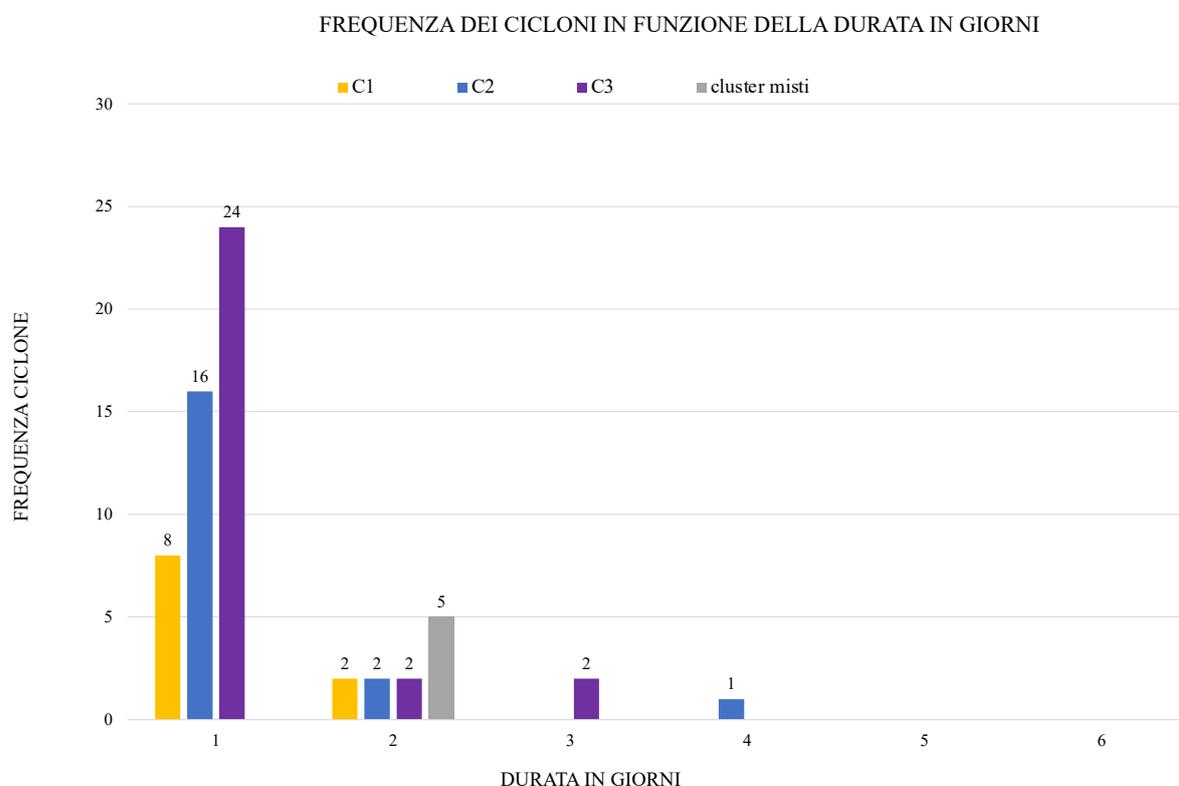


Figura 3.6 Frequenza dei cicloni appartenenti ai cluster C1, C2, C3 e misti in funzione del numero di giorni durante i quali la precipitazione risulta di almeno 200 mm/giorno per il periodo 1951-2009.

Come si può dedurre dalla Figura 3.6 non è stata riscontrata nessuna regolarità; vi è un solo ciclone con durata pari a 4 giorni, appartenente al cluster C2. Le quattro giornate si riferiscono all'alluvione

del 15-18 ottobre 1951 verificatasi nella zona centro-orientale della Sardegna e che verrà analizzata nel paragrafo 3.2.3 dedicato alla precipitazione totale a scala sub-regionale.

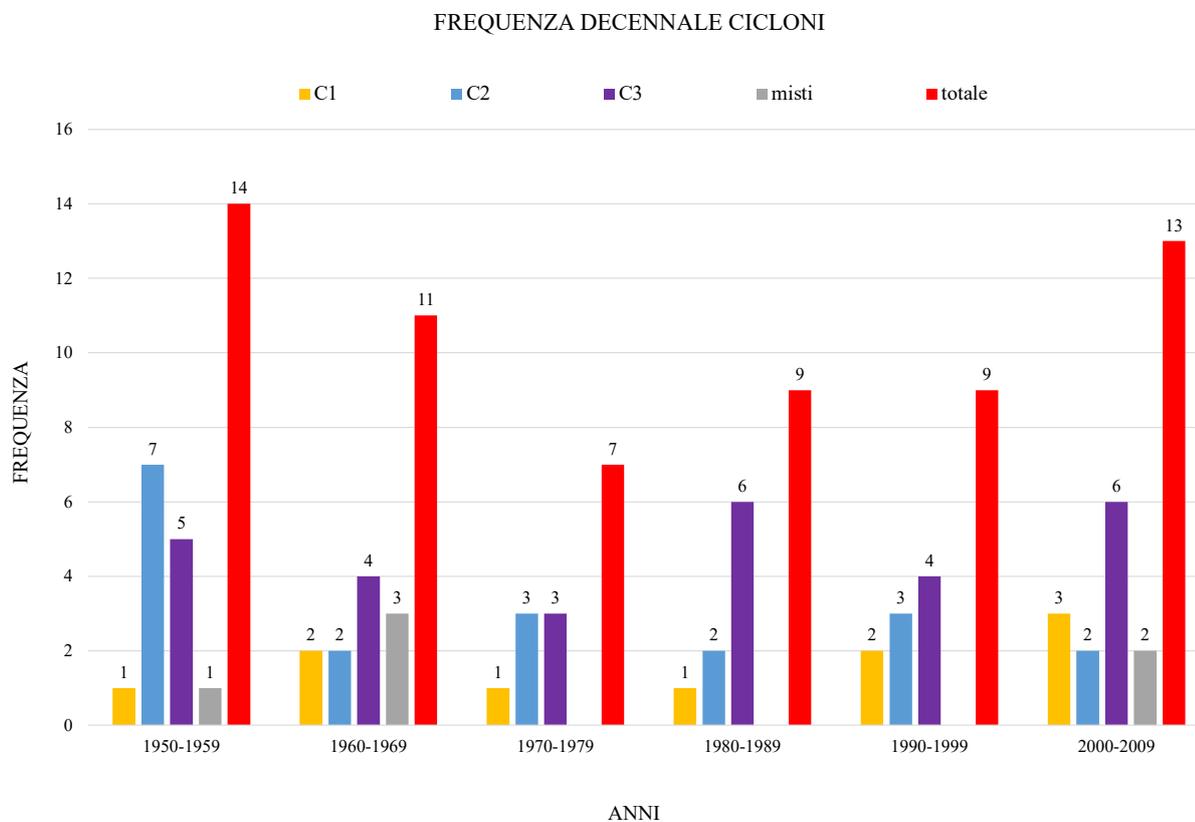


Figura 3.7 Frequenza decennale dei cicloni appartenenti ai cluster C1, C2, C3 e misti con la relativa somma per il periodo 1951-2009.

Per poter verificare l'ipotesi su quale potesse essere la frequenza decennale dei cicloni con precipitazioni al suolo eccedenti i 200 mm in un giorno in almeno una stazione nel periodo climatologico di riferimento, è stata calcolata la somma dei cicloni associati a ciascun cluster per ogni decennio (Figura 3.7).

FREQUENZA DEI CICLONI MENSILE IN BASE ALLA LORO DURATA

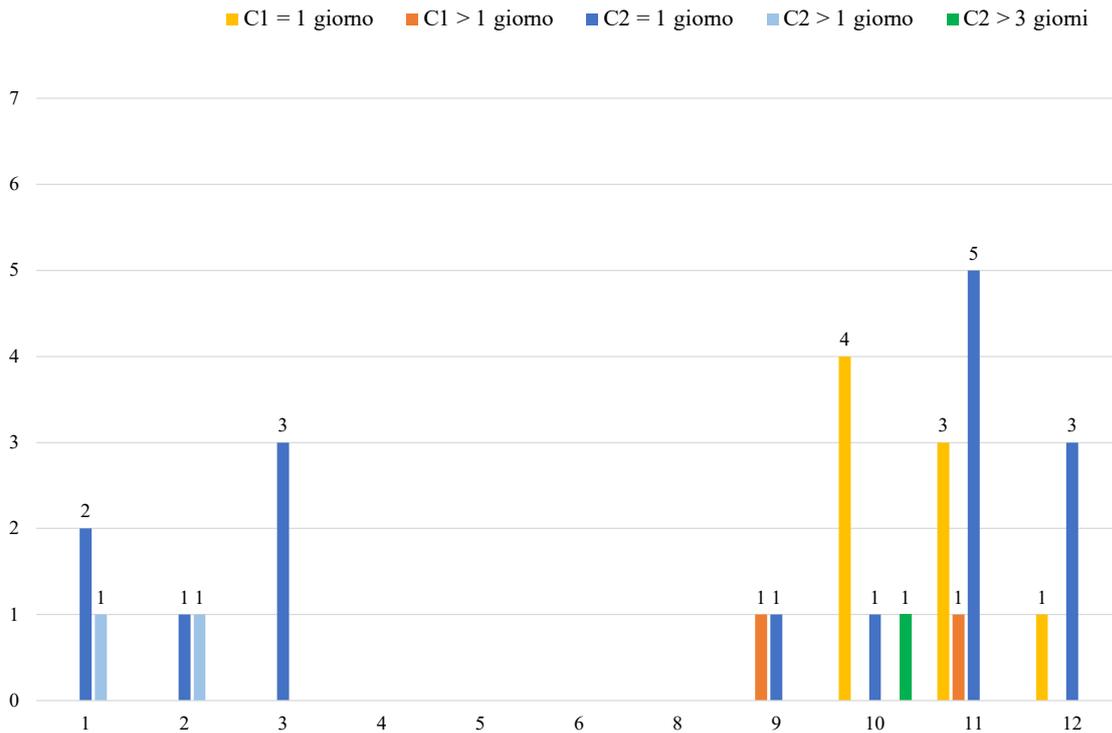


Figura 3.8 Frequenza dei cicloni appartenenti ai cluster C1 e C2 in funzione del numero di giorni nei quali il ciclone provoca precipitazione di almeno 200 mm/giorno per il periodo di 1951-2009.

All'interno del cluster C1 sono stati ottenuti 10 cicloni, nel cluster C2 19 cicloni, nel gruppo C3 28 cicloni, mentre all'interno dei cluster misti 6 cicloni sopra soglia.

Il numero totale ottenuto è di 63 cicloni, pari a una frequenza di circa 1 ciclone ogni anno associato a precipitazione sopra soglia. Come mostrato in Figura 3.7 non è stata riscontrata nessuna regolarità ma una frequenza alta nella somma totale per i decenni 1951-1959 (14 in totale) e 2000-2009 (13 giornate in totale).

Focalizzando l'analisi sulle precipitazioni soglia appartenenti ai cicloni appartenenti ai cluster C1 e C2, si può fare un confronto tra la stagionalità delle giornate di precipitazione oltre i 200 mm/giorno, la stagionalità dei cicloni, la frequenza della loro durata, la frequenza mensile in base alla loro durata (Figura 3.8) con la temperatura media mensile.

In base ai risultati ottenuti nell'analisi delle giornate di precipitazione sopra soglia (Figura 3.2) si deduce che i mesi con la maggior frequenza in assoluto sono ottobre e novembre. Sulla base dell'analisi della frequenza dei cicloni in base alla loro durata (Figura 3.8), i cicloni appartenenti al cluster C1 e C2 durano più frequentemente una sola giornata sviluppandosi con maggior frequenza nel mese di ottobre e novembre, rispettivamente. Si può ipotizzare che ciò sia legato alle

temperature superficiali medie del mare in quanto nei mesi di ottobre e novembre i mari attorno alla Sardegna (Canale di Sardegna, Mar di Sardegna e basso Tirreno) risultano infatti più alte rispetto a dicembre, gennaio e febbraio con temperature comprese tra i 21 e i 22°C nel mese di ottobre e tra i 17.5 e i 18°C nel mese di novembre.

Difatti, il mare ha un calore specifico a pressione costante più alto rispetto all'aria (Talley et al., 2011); proprio a causa dell'alto valore del calore specifico il processo di assorbimento di calore è un processo progressivo e regolare durante tutto l'anno che raggiunge la massima intensità durante i mesi estivi. Il raffreddamento che avviene durante i mesi tardo autunnali e invernali è al contrario un processo irregolare e rapido, in quanto avviene in particolare per rilascio di calore latente di evaporazione che può avvenire in determinate condizioni sinottiche quando viene agevolata la discesa verso sud di masse d'aria più fredde e secche sul mar Mediterraneo; se durante i mesi estivi vi sono lunghi periodi caratterizzati da un'alta pressione molto stabile e persistente, con assenza di perturbazioni in grado di rimescolare gli strati superficiali marini, l'arrivo delle masse d'aria tipiche dei mesi autunnali e invernali ne provoca il rimescolamento e la perdita di calore per evaporazione assicurando un maggiore apporto di vapore che può essere contenuto nella massa d'aria, necessario per la formazione della precipitazione (Wells, 2012).

Le condizioni sinottiche medie in cui si verificano i cicloni appartenenti ai cluster C1 e C2 verranno discusse successivamente nel dettaglio nel paragrafo 3.3.

3.2.3 Precipitazione totale a scala sub-regionale est/ovest

In questa sezione verranno mostrati e discussi i risultati ottenuti tramite l'analisi a scala sub-regionale della precipitazione cumulata totale in un evento e della precipitazione che ha superato in una giornata i 200 mm. Ci si concentrerà sulla precipitazione media areale nei settori est e ovest della Sardegna per i cluster C1 e C2.

Per chiarezza espositiva, in Figura 3.9 è rappresentata la geolocalizzazione delle stazioni della rete pluviometrica ARPAS considerate nell'analisi, suddivise per il settore est e per il settore ovest della Sardegna.

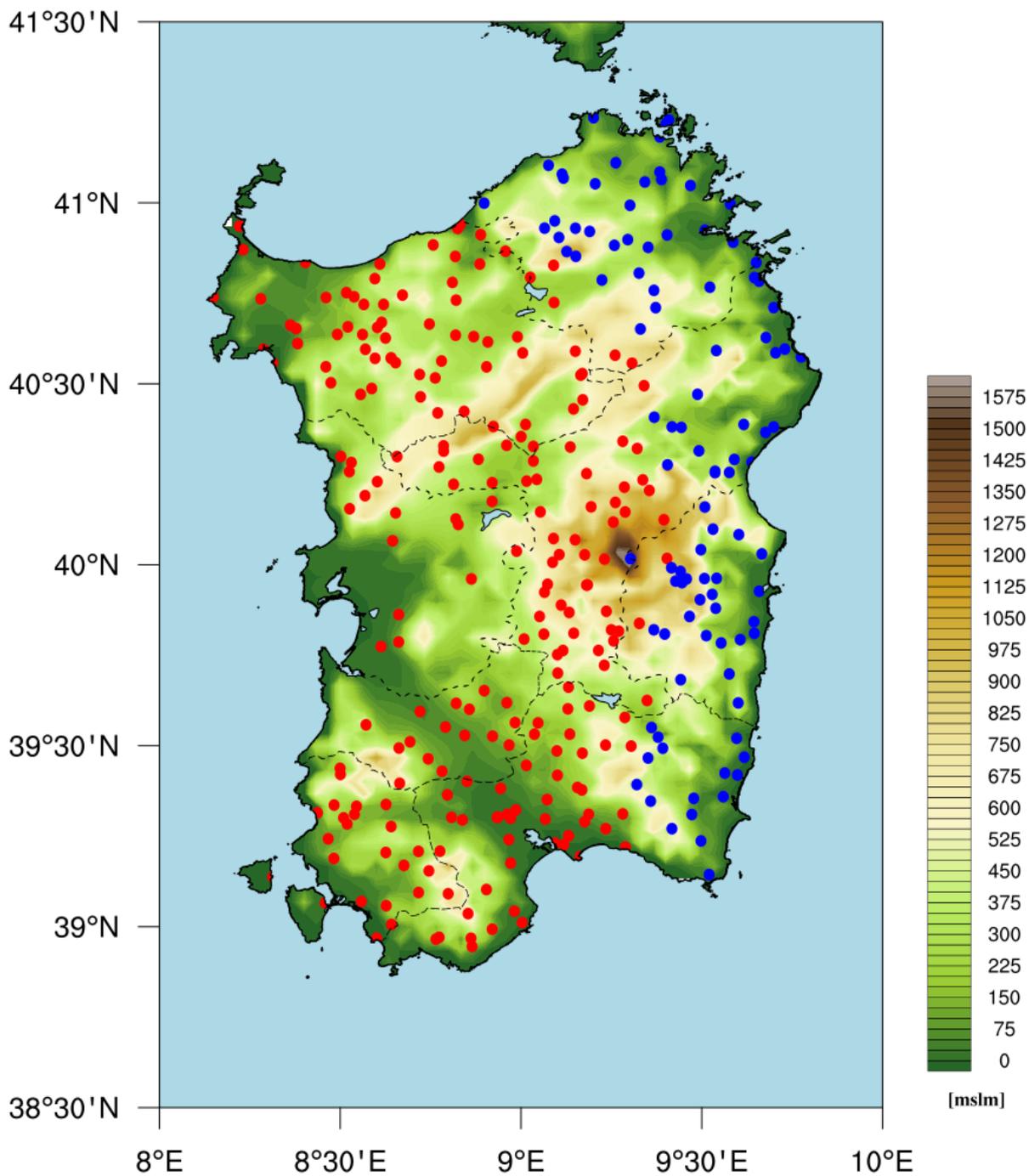


Figura 3.9 Localizzazione delle stazioni della rete pluviometrica ARPAS considerate nell'analisi climatologica per il periodo 1951-2009. Il pallino di colore rosso indica le stazioni nel settore ovest, il pallino blu le stazioni nel settore est.

I giorni di precipitazioni analizzati, considerando l'inizio e la fine del ciclone appartenente al cluster C1 e C2, sono riportati in Tabella 4 e Tabella 5.

Giornata > 200 mm	Cluster	Inizio evento	Fine evento
1° ottobre 1957	C1	4 ottobre	5 ottobre
23 novembre 1961	C1	22 novembre	25 novembre
25 ottobre 1965	C1	24 ottobre	27 ottobre
26 ottobre 1979	C1	24 ottobre	1° novembre
30 settembre 1986	C1	25 settembre	3 ottobre
1° novembre 1993	C1	30 ottobre	2 novembre
12 novembre 1999	C1	10 novembre	14 novembre
6 dicembre 2004	C1	4 dicembre	14 dicembre
22 ottobre 2008	C1	21 ottobre	25 ottobre
28 novembre 2008	C1	27 novembre	29 novembre

Tabella 4 Tabella riassuntiva degli eventi considerati per la precipitazione cumulata totale areale dal 1951-2009 per il cluster C1. Per la giornata del 1° ottobre va notato che dal 5 ottobre il ciclone si sposta verso est ed evolve nella configurazione C2 in data 7 ottobre 1957 come indicato in Tabella 5.

Giornata > 200mm	Cluster	Inizio evento	Fine evento
15 ottobre 1951	C2	13 ottobre	20 ottobre
16 marzo 1953	C2	15 marzo	17 marzo
7 ottobre 1957	C2	5 ottobre	11 ottobre
22 novembre 1957	C2	18 novembre	24 novembre
30 dicembre 1957	C2	25 dicembre	31 dicembre
21 novembre 1958	C2	20 novembre	22 novembre
24 novembre 1959	C2	22 novembre	26 novembre
15 gennaio 1961	C2	13 gennaio	17 gennaio
7 febbraio 1967	C2	5 febbraio	9 febbraio
24 marzo 1973	C2	23 marzo	25 marzo
30 marzo 1974	C2	26 marzo	2 aprile
22 dicembre 1976	C2	20 dicembre	24 dicembre
29 dicembre 1980	C2	26 dicembre	31 dicembre
19 gennaio 1988	C2	17 gennaio	21 gennaio
25 gennaio 1992	C2	23 gennaio	28 gennaio
24 novembre 1995	C2	22 novembre	25 novembre
29 novembre 1999	C2	26 novembre	2 dicembre
27 febbraio 2003	C2	25 febbraio	1° marzo
25 settembre 2009	C2	21 settembre	27 settembre

Tabella 5 Tabella riassuntiva degli eventi considerati per la precipitazione cumulata totale areale dal 1951-2009 per il cluster C2.

In Figura 3.10 è mostrata la precipitazione totale areale media associata ai cluster C1 e C2 calcolata separatamente per i settori est e ovest.

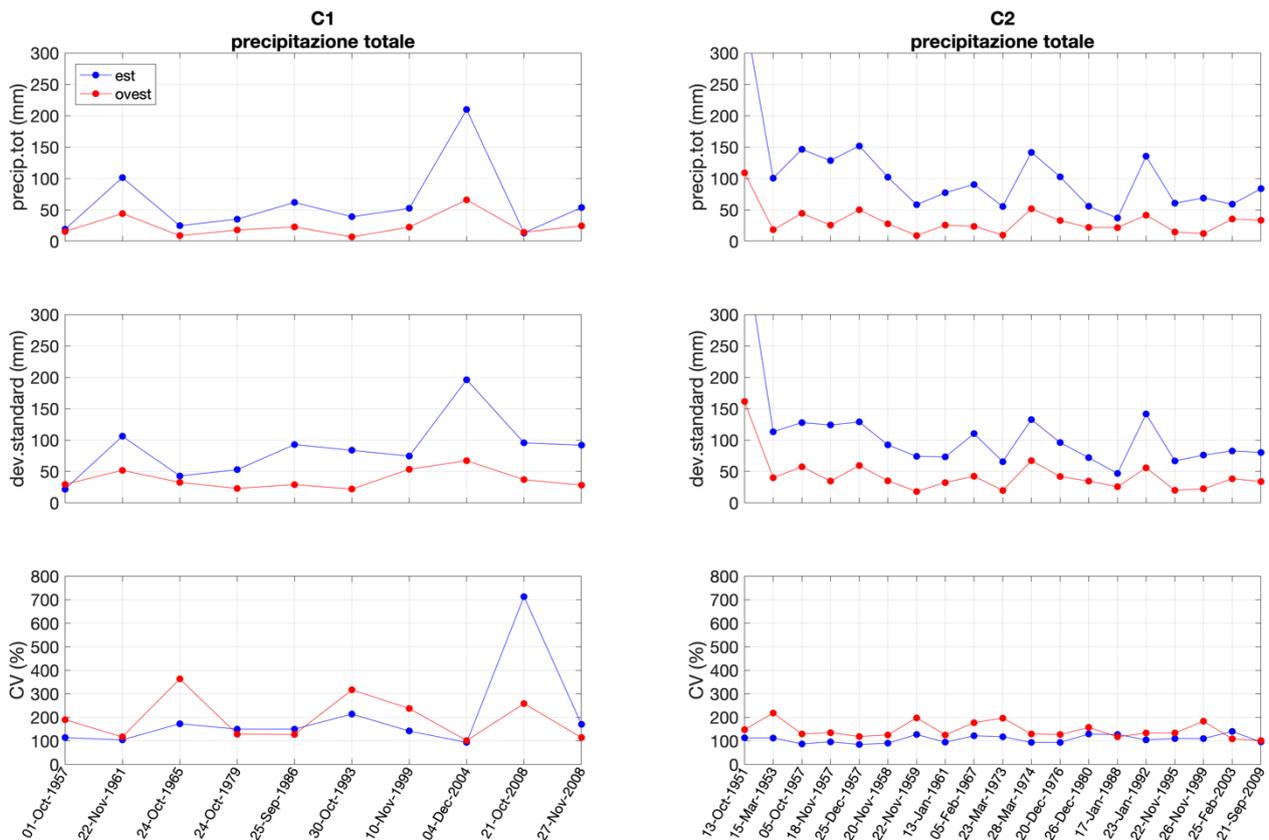


Figura 3.10 Precipitazione cumulata areale associata al cluster C1 e C2 calcolata per il settore est e ovest della Sardegna. In alto, precipitazione totale areale media (mm,) al centro la deviazione standard (mm), in basso il coefficiente di variazione (%).

Come si può osservare dal grafico, nel caso del cluster C1 la precipitazione totale media nel settore ovest non supera mai i 100 mm mentre nel settore est vi è un unico evento significativo cioè il 4-7 dicembre 2004 in cui si registrano ~210 mm.

Poiché si è in presenza di due set di misure con medie differenti, l'analisi del coefficiente di variazione (CV) permette di analizzare la variabilità spaziale della precipitazione totale in entrambi i settori. Infatti, in presenza del cluster C1, nel caso dell'evento del 4-7 dicembre 2004 il coefficiente di variazione presenta valori relativamente bassi (al di sotto del 200%) sia per il settore est che per il settore ovest ($CV_{est} = 101\%$, $CV_{ovest} = 125\%$).

In quattro casi si può osservare invece come a fronte di una precipitazione areale totale media in cui non si superano i 100 mm per ciascun settore, vi sia una maggiore variabilità nel settore ovest rispetto al settore est; vi è solo un caso (21-25 ottobre 2008) in cui accade l'opposto (Tabella 6).

Eventi (C1)	Precipitazione totale (mm)		CV (%)	
	Est	Ovest	Est	Ovest
24 -27 ottobre 1965	25	9	173	363
30 ottobre - 2 novembre 1993	39	7	214	316
10-14 novembre 1999	52	23	142	237
21-25 ottobre 2008	13	14	713	258

Tabella 6 Quattro eventi del cluster C1 in cui la precipitazione totale non supera i 100 mm (a sinistra). Valori di precipitazione totale e del CV nei settori est ed ovest (a destra).

Per quanto riguarda il cluster C2, la precipitazione totale media risulta al di sotto dei 100 mm nel settore ovest, mentre nel settore est la precipitazione totale media non supera i 150 mm; l'unico caso in cui queste osservazioni non vengono confermate è l'evento iniziato nella giornata del 13 ottobre 1951 e conclusosi il 20 ottobre 1951 in cui nel settore ovest sono stati registrati ~110 mm e nel settore est ~365 mm.

Eventi (C2)	Precipitazione totale (mm)		CV (%)	
	Est	Ovest	Est	Ovest
15-17 marzo 1953	146	45	112	218
22-26 novembre 1959	58	9	127	198
23-25 marzo 1973	56	10	118	196
26 novembre-2 dicembre 1999	70	12	110	183

Tabella 7 Quattro eventi del cluster C2 in cui la precipitazione totale non supera i 150 mm (a sinistra). Valori di precipitazione totale e del CV nei settori est ed ovest (a destra).

Il coefficiente di variazione per il settore est risulta basso ($CV_{est} \approx 100\%$) in tutti gli eventi, mentre per il settore ovest in quattro casi risulta più alto a fronte di una precipitazione areale totale media che non supera i 150 mm (Tabella 7).

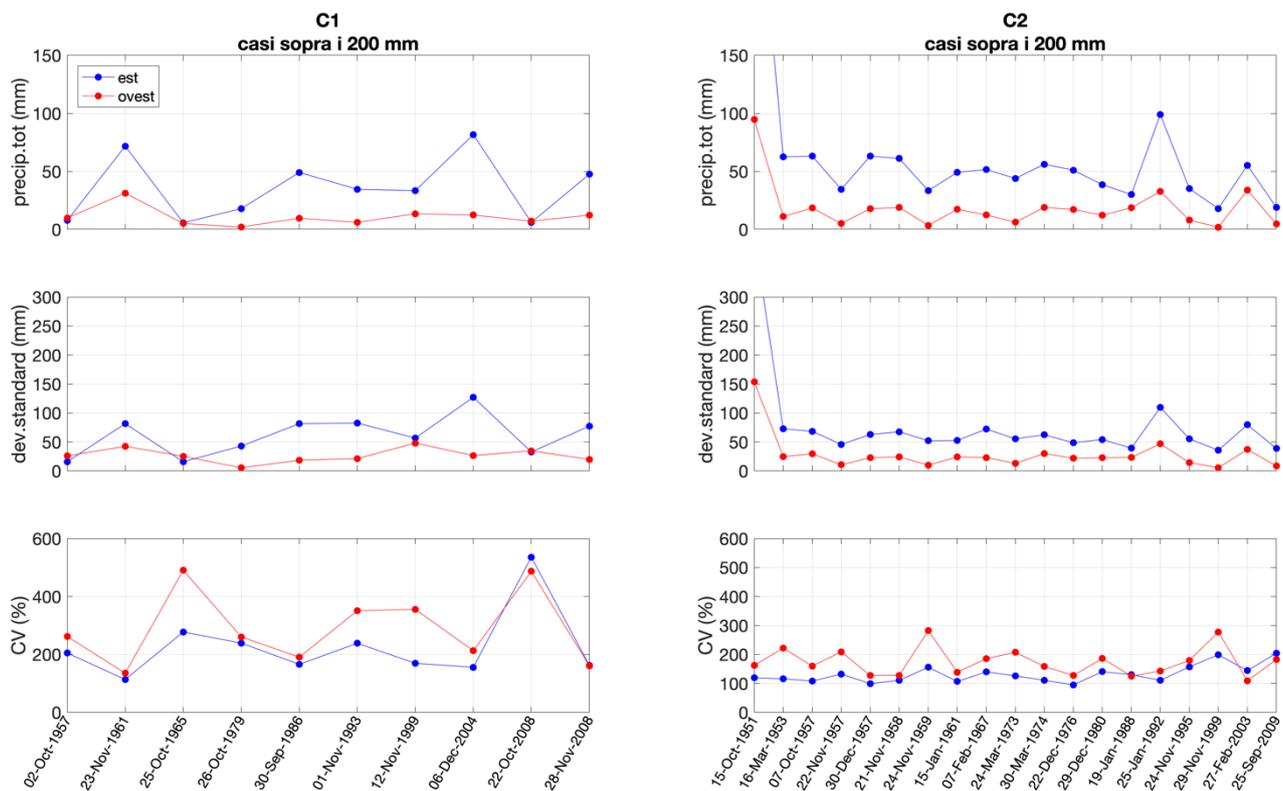


Figura 3.11 Precipitazione cumulata areale associata al cluster C1 e C2 per le giornate in cui è stata superata la soglia dei 200 mm calcolata per il settore est e ovest della Sardegna. In alto, precipitazione totale media (mm), al centro la deviazione standard (mm), in basso il coefficiente di variazione (%).

Gli eventi in cui la precipitazione ha superato i 200 mm nel settore est e ovest in una giornata o in più giornate consecutive, sono mostrate in Figura 3.11.

Osservando la precipitazione totale areale media nel settore est per il cluster C1, viene confermato nuovamente l'evento significativo osservato in precedenza, cioè l'evento del 6-7 dicembre 2004 in cui sono stati registrati 82 mm; parallelamente nel settore ovest, durante le stesse giornate consecutive furono registrati ~12 mm. Il coefficiente di variazione presenta per l'evento una variabilità minore nel settore est ($CV_{est} = 115\%$) e una variabilità maggiore nel settore ovest ($CV_{ovest} = 212\%$). In un secondo caso vengono superati i 50 mm di precipitazione totale areale media, durante l'evento del 23 novembre 1961 in cui furono registrati ~72 mm nel settore est ~31 mm nel settore ovest, con una variabilità bassa sia nel settore est che nel settore ovest ($CV_{est} = 113\%$, $CV_{ovest} = 135\%$).

Nel cluster C1, si notano quattro eventi in cui non vengono superati i 50 mm né sul settore est, né nel settore ovest. Come si può osservare dalla Figura 3.11 e dalla Tabella 8, i coefficienti di variazione calcolati per i due settori presentano una grande differenza (Tabella 8).

Eventi (C1)	Precipitazione totale (mm)		CV (%)	
	Est	Ovest	Est	Ovest
25 ottobre 1965	6	5	277	490
1° novembre 1993	35	6	238	350
12-13 novembre 1999	33	13	169	355
22 ottobre 2008	6	7	535	486

Tabella 8 Quattro eventi del cluster C1 in cui la precipitazione totale non supera i 50 mm (a sinistra). Valori di precipitazione totale e del CV nei settori est ed ovest (a destra).

Per il cluster C2, come già osservato in precedenza, la precipitazione totale media non supera mai i 150 mm per il settore est, escluso un solo evento significativo del 15 ottobre 1951 in cui sono stati registrati circa 340 mm nel settore est e 94 mm nel settore ovest. Nonostante ciò, è presente una differenza tra la precipitazione totale sul settore est ed ovest. Infatti, come si osserva dalla Figura 3.11, sul settore est vi sono cinque eventi in cui la precipitazione supera i 50 mm con un CV ~ 100%, mentre sul settore ovest non vengono mai superati i 50 mm durante gli stessi eventi con un coefficiente di variazione risulta compreso tra il 100% e il 200% (Tabella 9).

Eventi (C2)	Precipitazione totale (mm)		CV (%)	
	Est	Ovest	Est	Ovest
16 marzo 1953	63	11	116	222
7 ottobre 1957	63	18	108	160
30 dicembre 1957	63	17	100	127
21 novembre 1958	61	18	110	130
25 gennaio 1992	99	32	110	143

Tabella 9 Cinque eventi del cluster C2 in cui la precipitazione totale supera i 50 mm sul settore est (a sinistra). Valori di precipitazione totale (mm) e del CV (%) (a destra).

In generale, nel cluster C2 si osserva come il coefficiente di variazione mostri una bassa variabilità per tutti gli eventi. Il valore risulta di circa del 100% nel settore est e di circa del 200% nel settore ovest tranne in due casi in cui la variabilità nel settore ovest è maggiore rispetto al settore est:

- 24 novembre 1959 ($CV_{est} = 177\%$, $CV_{ovest} = 282\%$) con una precipitazione totale media di circa 33 mm nel settore est e di circa 4 mm nel settore ovest;
- 29 novembre 1999 ($CV_{est} = 198\%$, $CV_{ovest} = 277\%$) con una precipitazione totale media di circa 18 mm nel settore est e 2 mm nel settore ovest.

Alla luce dei risultati ottenuti si può osservare che sia nel cluster C1 che nel cluster C2 i bassi valori del coefficiente di variazione indicano una bassa variabilità relativa rispetto alla media, dunque, si è in presenza di fenomeni spazialmente omogenei. I casi in cui si osservano alti valori del coefficiente di variazione indicano invece un'alta variabilità, dunque, fenomeni spazialmente localizzati.

Da qui emerge il vantaggio nell'utilizzo di un indice di variabilità relativo come il coefficiente di variazione rispetto a un indice di variabilità assoluto come la deviazione standard; infatti, il coefficiente di variazione rispetto alla deviazione standard non dipende dall'unità di misura e non è influenzato dal carattere nella media. Questo permette il confronto tra i due set di misure con valori di precipitazione totale media differenti.

Il settore est è caratterizzato da soli due eventi in cui la precipitazione totale media supera i 100 mm nel cluster C1 (4 dicembre 2004) e da un solo caso (13-18 ottobre 1951) in cui superano i 150 mm nel cluster C2, mentre in entrambi i cluster nel settore ovest non viene superata la soglia dei 100 mm.

Con il coefficiente di variazione emerge però la notevole differenza nella distribuzione spaziale della precipitazione totale nei due settori.

La precipitazione totale media associata al cluster C1 in 1 caso su 10 casi supera i 100 mm nel settore est (poco frequente) mentre nel settore ovest risultano 10 casi su 10 al di sotto dei 100 mm (frequente); quindi nel settore est la precipitazione totale media è maggiore che nel settore ovest e ha un carattere più omogeneo sul settore est (8 eventi su 10 in cui $CV < 200\%$) rispetto al settore ovest (5 casi su 10 con $CV < 200\%$).

Emerge un caso particolarmente significativo nel cluster C1, in cui il coefficiente di variazione nel settore est risulta 713% mentre quello nel settore ovest è 258% ed è l'evento del 21-22 ottobre 2008 con una precipitazione totale areale media che non supera i 50 mm sul settore ovest. Questo significa che la precipitazione più intensa è stata rilevata da poche stazioni a ovest; difatti questo

corrisponde all'evento alluvionale di Capoterra (sud-ovest della Sardegna) che verrà analizzato dal punto di vista sinottico nel paragrafo 3.5.1.

Nel cluster C2, si nota che le precipitazioni al di sopra dei 100 mm risultano superiori nel settore est, cioè 5 casi su 18 dunque non frequenti; le due curve per il coefficiente di variazione mostrano per entrambi i settori un andamento regolare e che non mostra picchi al di sopra del 200% per il settore ovest e del 100% per il settore est. Questo particolare andamento indica che le precipitazioni associate al cluster C2 sia nel settore est che nel settore ovest hanno un carattere quasi omogeneo (18 eventi con $CV \sim 100\%$ per il settore est e 11 eventi con $CV \sim 100\%$).

In generale, si può concludere che nel cluster C1 e C2 i casi in cui la precipitazione totale media è maggiore a 100 mm nel settore est rispetto al settore ovest, sono rari (1 caso su 10 per C1 e 5 su 18 per C2); nonostante ciò, in entrambi i cluster, gli eventi in cui viene superata la soglia dei 100 mm risulta più frequente nel settore est rispetto al settore ovest.

Dall'analisi del coefficiente di variazione emerge il carattere omogeneo delle precipitazioni per il cluster C1 nel settore est rispetto al settore ovest dove si osservano più frequentemente eventi a carattere locale; l'andamento quasi sovrapponibile delle curve ottenute per il cluster C2, mostra il carattere quasi omogeneo delle precipitazioni in entrambi i settori.

Per quanto riguarda l'analisi della precipitazione totale media areale con soglia superiore ai 200 mm in una giornata o in più giornate consecutive, emerge un tratto comune tra i due cluster. Infatti, in entrambi i cluster non viene superata la soglia dei 100 mm nei due settori, a esclusione delle giornate del 15-18 ottobre 1951 nel settore est.

Con il coefficiente di variazione si nota la notevole differenza nella distribuzione spaziale della precipitazione totale media nei due settori nel cluster C1 dove in 4 eventi su 10 la variabilità risulta bassa ($CV < 200\%$) sul settore est e in soli 2 eventi su 10 sul settore ovest; dunque, la precipitazione totale areale media ha un carattere più omogeneo sul settore est. L'unico caso in cui si osserva una precipitazione totale con un carattere locale sul settore est è la giornata del 22 ottobre 2008. Durante questo evento la precipitazione totale areale media è stata bassa in tutti i due i settori, ma dal confronto con il coefficiente di variazione si osserva che nel settore est la variabilità è maggiore rispetto al settore ovest ($CV \sim 600\%$ sul settore est e 486% sul settore ovest). Dunque, la precipitazione sul settore est è stata rilevata da poche stazioni ed è stata a carattere locale rispetto al settore ovest.

Nel cluster C2, le due curve per il coefficiente di variazione mostrano per entrambi i settori un andamento abbastanza regolare con due soli picchi al di sopra del 200% a favore del settore ovest. I casi in cui il coefficiente di variazione risulta al di sotto del 200% sono 17 su 19 per il settore est e 13 su 19 per il settore ovest mentre solo 2 casi su 19 risultano al di sopra del 200%.

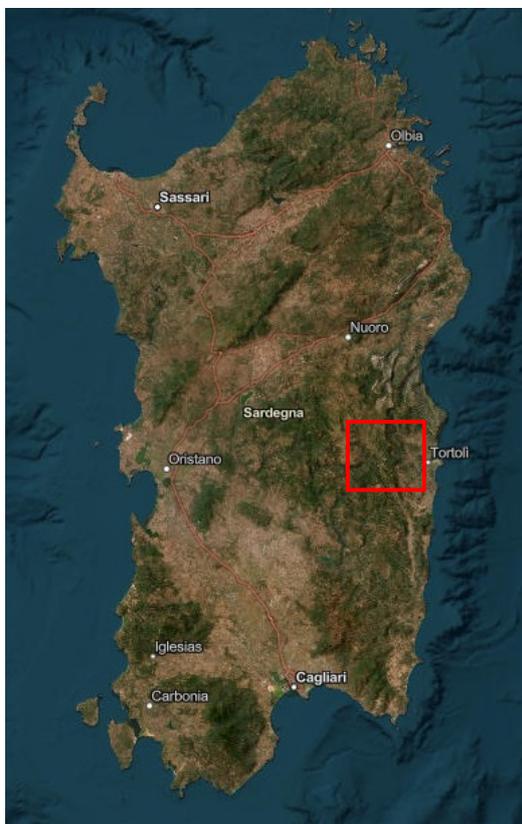
Dunque, nel cluster C2, la precipitazione totale nelle giornate in cui si superano i 200 mm mostra un carattere relativamente omogeneo sia sul settore est che sul settore ovest.

In base ai risultati ottenuti, si può concludere che la precipitazione totale media areale associata ai cluster C1 e C2, risulta superiore ai 50 mm con una frequenza superiore nel settore est rispetto al settore ovest; solo in un caso si registra una precipitazione superiore ai 100 mm nel cluster C1 e 5 casi nel cluster C2 sempre sul settore est. Nel cluster C1 la precipitazione ha un carattere più omogeneo nel settore est rispetto al settore ovest, dove si osservano più frequentemente eventi a carattere locale; l'andamento quasi sovrapponibile delle curve ottenute per il cluster C2, mostra il carattere quasi omogeneo delle precipitazioni in entrambi i settori.

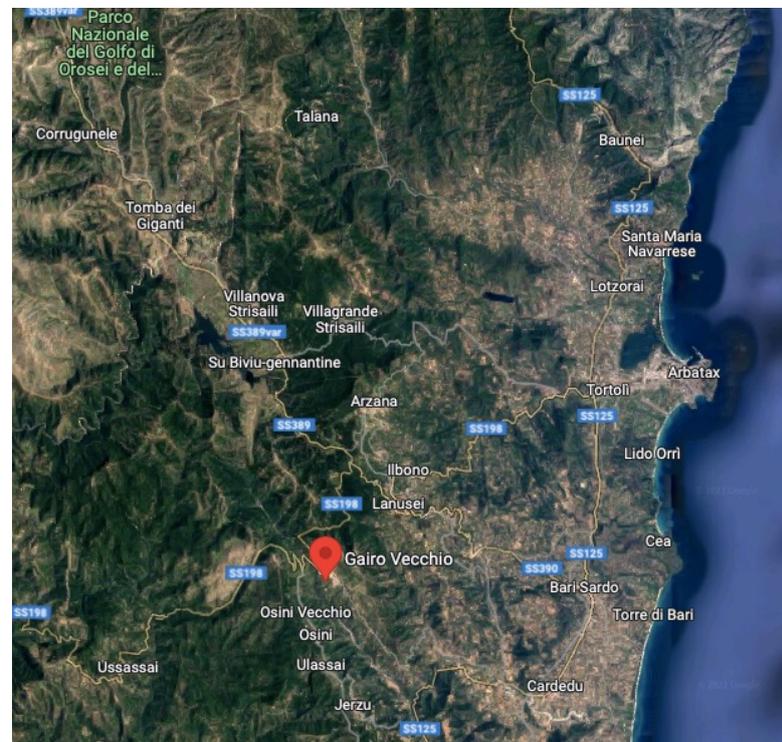
Per quanto riguarda lo studio della precipitazione totale media al di sopra dei 200 mm, si nota ancora che in entrambi i cluster viene superata con più frequenza la soglia dei 50 mm solo sul settore est.

Per il cluster C1 si osserva che la precipitazione totale media ha un carattere più frequentemente omogeneo sul settore est rispetto al settore ovest, mentre nel cluster C2 la precipitazione ha un carattere quasi omogeneo in entrambi i settori.

Dai risultati per la precipitazione totale media e del coefficiente di variazione sono stati selezionati due eventi particolarmente intensi di precipitazione che hanno insistito su una stessa area cioè la Sardegna centro-orientale (Ogliastra) durante le giornate dal 15 al 18 ottobre 1951 e le giornate dal 6 al 7 dicembre 2004.



(a)

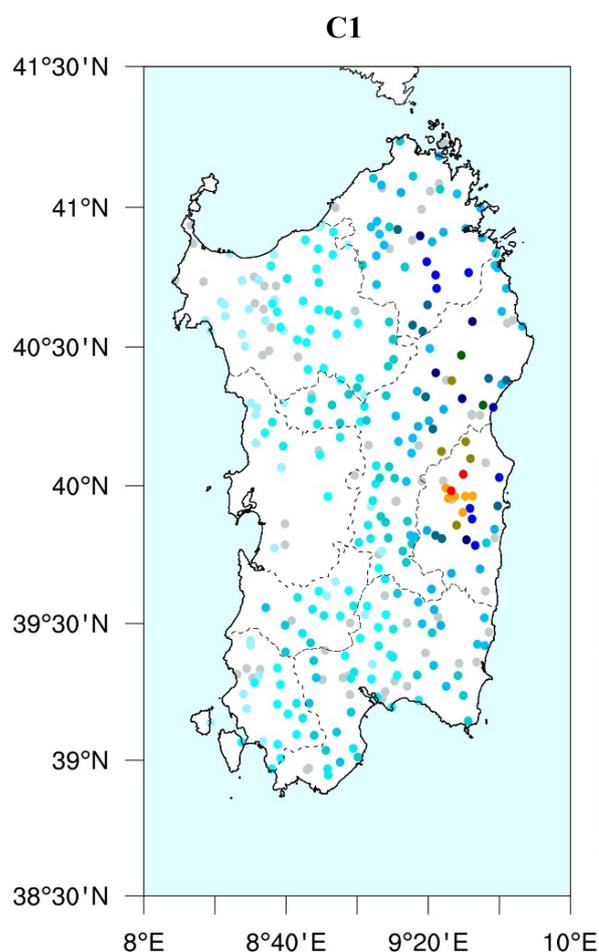


(b)

Figura 3.12 A sinistra (a) mappa della Sardegna in cui è evidenziata l'area colpita dagli eventi del 15-18 ottobre 1951 e del 6-7 dicembre 2004. A destra (b) focus sulla Sardegna centro-orientale (Ogliastra, 39°32'42 N, 9°33'00'' E) (fonte: <https://arpas.maps.arcgis.com/home/index.html> e <https://www.google.it/maps>).

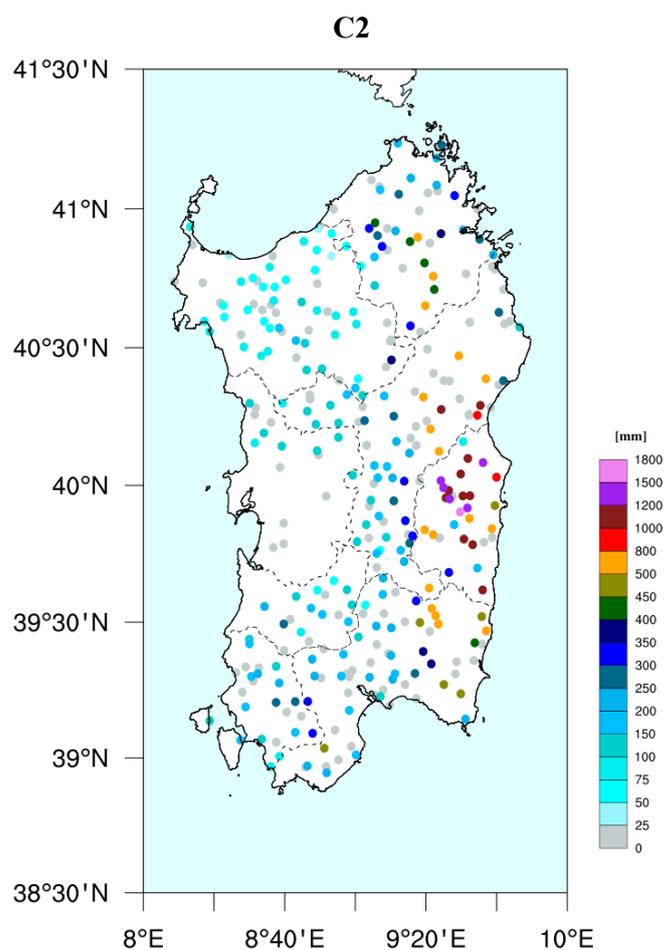
I comuni coinvolti furono Jerzu, Arzana, Talana, Villagrande Strisaili e Osini per le giornate dal 15 al 18 ottobre 1951; Villanova Strisaili, Villagrande Strisaili e Talana per le giornate dal 6 al 7 dicembre 2004. In Figura 3.12 è mostrata l'area geografica di studio.

Come si può osservare dalla Figura 3.13 la precipitazione cumulata totale per entrambi i casi è stata intensa: per le giornate del 15-18 ottobre 1951 è stata di 1538 mm mentre per le giornate del 6-7 dicembre 2004 è stata di 841 mm.



6-7 Dicembre 2004 –Villagrande Strisaili

(a)



15-18 Ottobre 1951- Gairo, Osini

(b)

Figura 3.13 Esempi di precipitazione cumulata totale dei soli giorni in cui è stata superata la soglia dei 200 mm in almeno una stazione.

Il valore del coefficiente di variazione per il settore est, in entrambe le giornate, è circa il 100%; ciò spiega come questi due casi di precipitazione intensa, presentino una bassa variabilità spaziale e dunque possiedano un carattere relativamente omogeneo.

Dunque, in presenza sia del cluster C1 che del cluster C2, emerge come sia la regione dell'Ogliastra la zona più colpita da eventi di precipitazione intensa e a carattere omogeneo, rispetto ad altre aree della Sardegna. Come mostrato in Figura 3.13, nella regione è presente una barriera orografica rappresentata dalla catena montuosa del Gennargentu (1834 m) che in determinate condizioni sinottiche risulta esposta a flussi umidi provenienti dai quadranti orientali, come verrà illustrato nel paragrafo 3.2.8 dedicato all'analisi del campo di vento medio. Tali flussi inducono frequentemente

eventi intensi ma a cui seguono, anche in brevi intervalli di tempo, periodi secchi nella stessa zona causando gravi danni all'ambiente e alle persone (Bodini e Cossu, 2008).

Durante le giornate tra il 15 e il 18 ottobre 1951 i paesi di Gairo e Osini, collocati sui due versanti contrapposti del rio Pardu, franarono a valle costringendo le popolazioni ad abbandonare il paese; il 6 dicembre 2004 a Villagrande Strisaili i danni provocati dall'alluvione furono permanenti tanto da modificare la morfologia del territorio lungo la costa del Golfo di Orosei (Cossu et al., 2007).

3.3 Analisi sinottica

In questo paragrafo verranno analizzati e discussi i risultati ottenuti per i campi medi delle variabili dinamiche e termodinamiche introdotte nella Tabella 1 e nel paragrafo 2.4 per le singole giornate in cui si è registrata la rilevazione più alta in assoluto di precipitazione in almeno una stazione (Tabella 2). L'obbiettivo è comprendere se le precipitazioni sopra la soglia dei 200 mm sono associate a configurazioni bariche e termodinamiche che presentano caratteristiche comuni.

3.3.1 Campo di geopotenziale medio a 500 hPa

In Figura 3.14 è mostrata la configurazione sinottica media per il cluster C1 e C2 per la superficie isobarica a 500 hPa di altezza di geopotenziale.

Per il cluster C1 si osserva che in sede atlantica è presente una profonda saccatura con asse nordovest-sudest, che dalle isole Britanniche si estende verso sud sulla penisola Iberica, raggiungendo valori di geopotenziale medi di 560 dam con deviazione standard tra i 7 e i 14 dam (Figura 3.14.a). A est della saccatura si estende un promontorio sull'Italia centrale e meridionale con valori di geopotenziale medi tra i 572 e i 568 dam con deviazione standard tra 7 e 10 dam (Figura 3.14.a).

Per il cluster C2 (Figura 3.14.c), sulla superficie isobarica a 500 hPa emerge invece una struttura chiusa e isolata, centrata tra Tunisia e Algeria e che interessa anche la Sardegna con valori di geopotenziale medi pari a 555 hPa e deviazione standard compresa tra 7 e 8 dam (Figura 3.14.d)

Alla luce dei risultati ottenuti dai campi medi di geopotenziale sulla superficie isobarica a 500 hPa emergono delle similitudini tra i due cluster. Innanzitutto, i valori bassi della deviazione standard; infatti, in corrispondenza della saccatura sulla penisola Iberica e del minimo chiuso tra l'Algeria e la Tunisia tali valori indicano che i valori medi in C1 e in C2 sono affetti da una incertezza

relativamente bassa. Questo è indice che tali campi medi sono rappresentativi delle effettive caratteristiche sinottiche che contraddistinguono un tipico cluster C1 e un cluster C2.

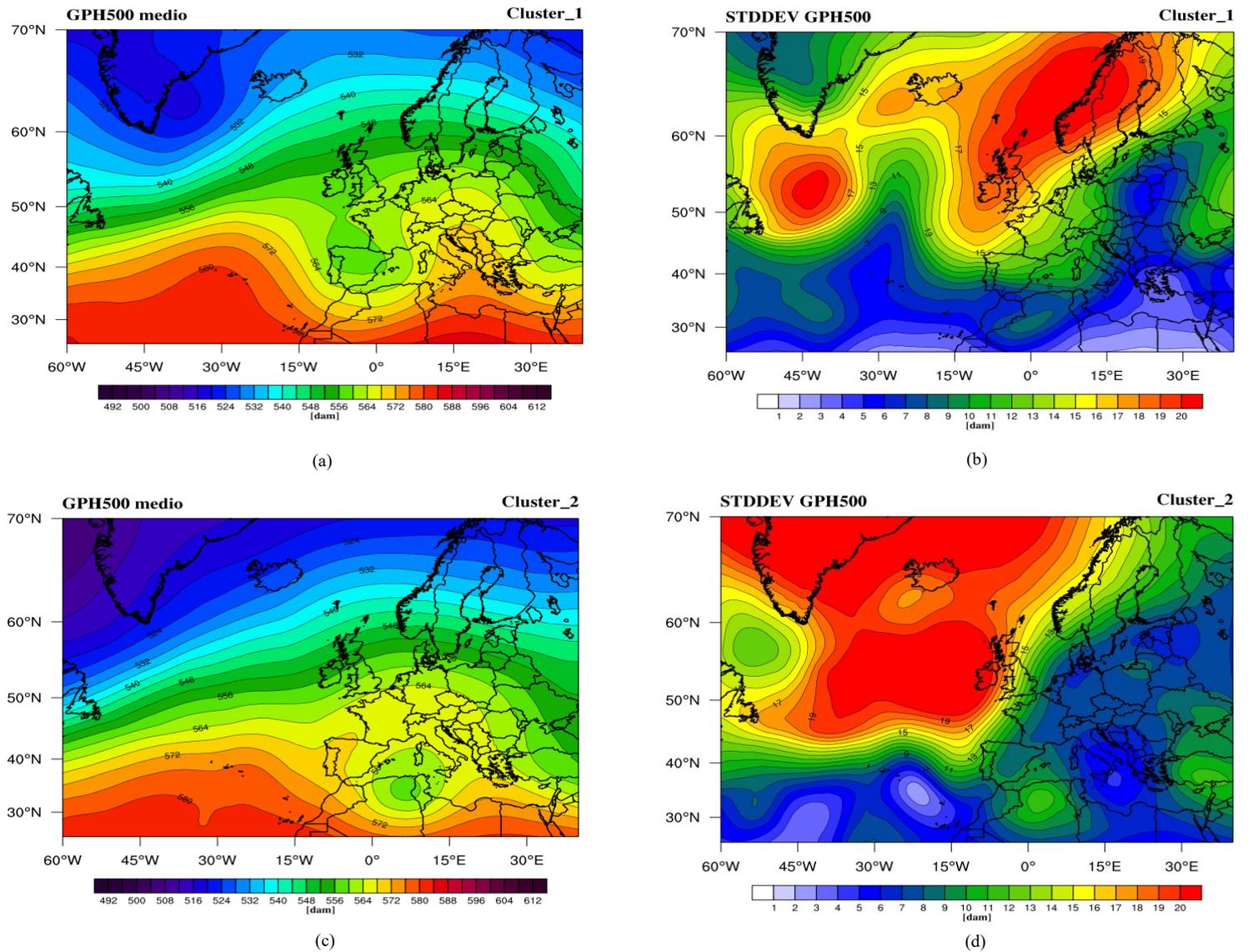


Figura 3.14 Nella colonna a sinistra (a) e (c) sono raffigurati il campo medio dell'altezza di geopotenziale calcolato per la superficie isobarica a 500 hPa per le 7 giornate (Tabella 2) appartenenti al cluster C1 e C2 relative al periodo 1979-2009 e misurata in dam. nella colonna destra (b) e (d) è mostrata la deviazione standard relativa al campo medio dell'altezza di geopotenziale calcolato a 500 hPa per il cluster C1 e C2 e misurata in dam.

3.3.2 Campo di pressione media al suolo

In Figura 3.15 sono mostrati i campi medi di pressione al suolo per i cluster C1 e C2 con le relative deviazioni standard.

Per quanto riguarda la MSLP media nel cluster C1 (Figura 3.15.a) si osserva un minimo chiuso che dalle isole Baleari si estende verso la Sardegna; il valore di pressione media centrale sulle isole Baleari è pari a 1009 hPa con una deviazione standard tra 3 e 4 hPa (Figura 3.15.b)

Nel cluster C2 (Figura 3.15.c), il minimo presenta valori di pressione centrale media più alta rispetto al minimo presente nel cluster C1. Tale minimo è situato tra la Tunisia e l'Algeria, con valori di pressione media centrale uguale a 1014 hPa con una deviazione standard uguale a 1 hPa (Figura 3.15.d).

Un risultato comune a entrambi i cluster è la presenza di due strutture anticicloniche nelle isole Azzorre, sulla Europa centrale e Balcanica. Quindi si osserva che i valori di pressione medi:

- sulle isole Azzorre sono uguali a 1024 hPa con una deviazione standard di 4 hPa (cluster C1) ed uguali a 1026 hPa con una deviazione standard di 5 hPa (cluster C2);
- sull'Europa centrale e parte dell'Europa orientale sono compresi tra 1022 e 1026 hPa con una deviazione standard tra 3 e 5 hPa (cluster C1) compresi tra 1022 e 1030 hPa tra 5 e 7 hPa (cluster C2).

Dai risultati emersi, si può dedurre che sebbene vi siano delle differenze sostanziali sia nella posizione dei minimi al suolo che nei loro valori medi tali valori presentano una incertezza bassa in entrambi i cluster. Un fattore che risalta maggiormente è l'incertezza più bassa nei valori di pressione medi che si riscontrano in corrispondenza del minimo chiuso nel cluster C2 rispetto all'incertezza, pur sempre contenuta, che si osserva in corrispondenza del minimo chiuso nel cluster C1.

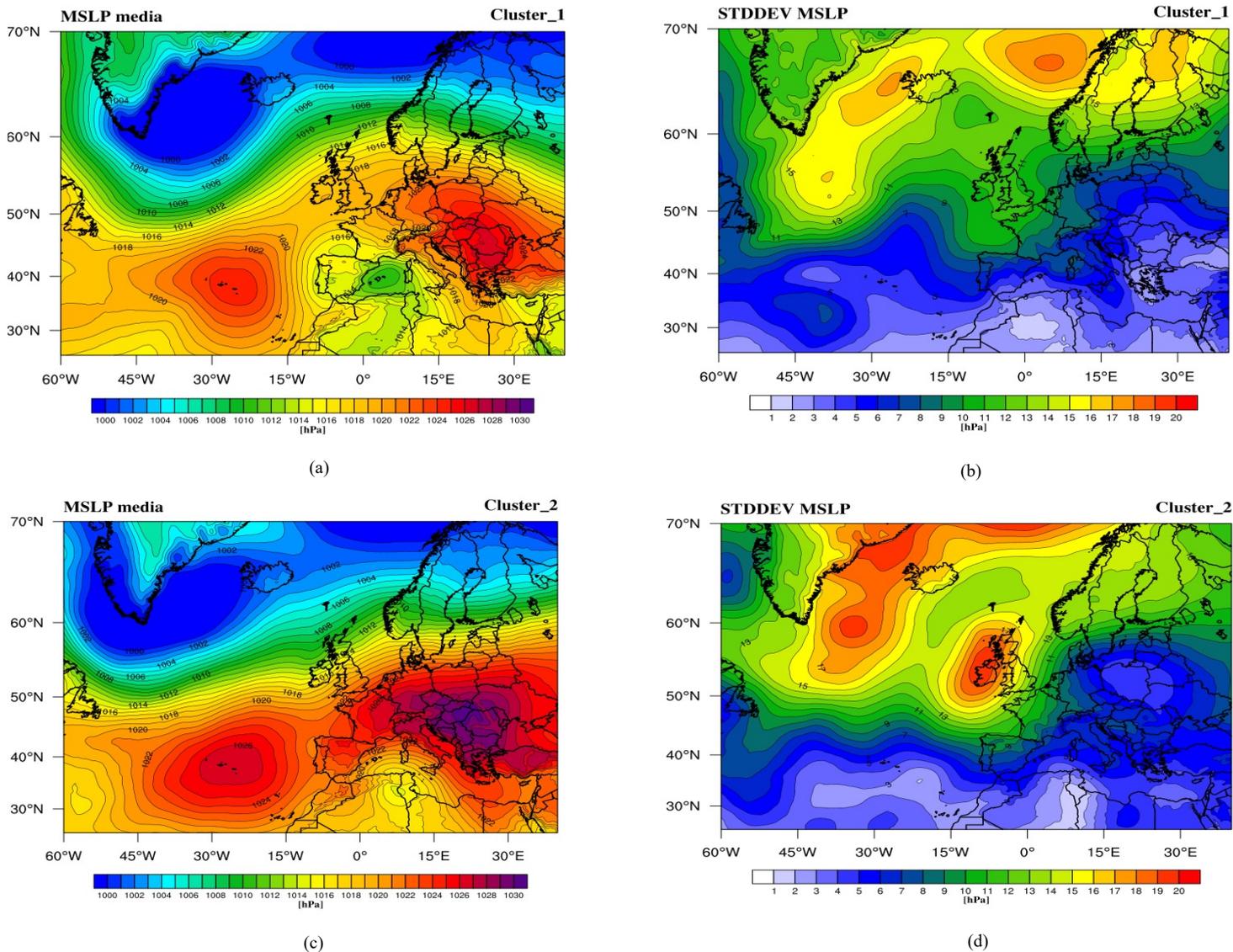


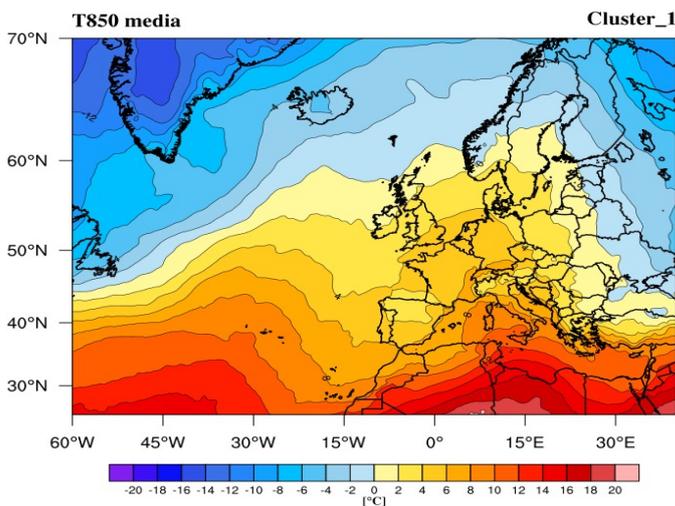
Figura 3.15 Nella colonna a sinistra (a) e (b) sono raffigurati il campo medio della pressione al suolo per le 7 giornate (Tabella 2) appartenenti al cluster C1 e C2 per il periodo 1979-2009; nella colonna destra (b) e (d) è mostrata la deviazione standard relativa al campo medio di pressione al suolo per i cluster C1 e C2 e misurata in hPa.

3.3.3 Campo di temperatura media a 850 hPa

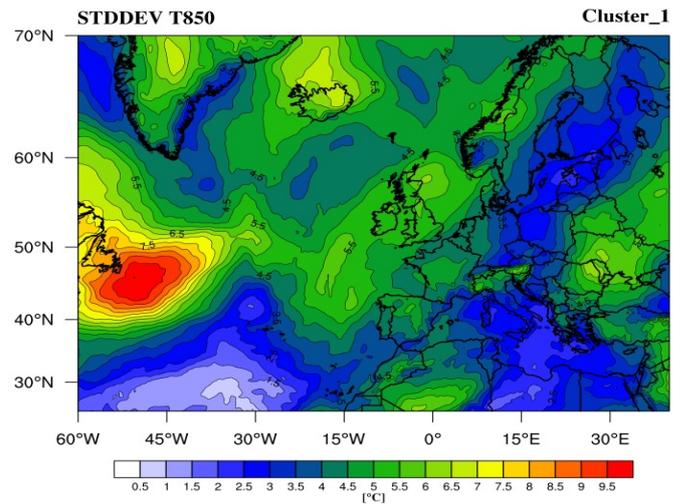
Per il cluster C1, il campo di temperatura medio a 850 hPa nell'area tra il canale di Sicilia e la Sardegna presenta valori alti in un intervallo compreso gli 8 e i 12°C (Figura 3.16.a) con una deviazione standard uguale a 2 °C (Figura 3.16.b).

Si osservano inoltre valori di temperatura medi compresi tra 2 e 6 °C con una deviazione standard di 4.5 °C e 5 °C sulla penisola Iberica; sulle isole Baleari la temperatura media risulta compresa tra 6 e 8 °C con una deviazione standard tra 3.5 e 4 °C.

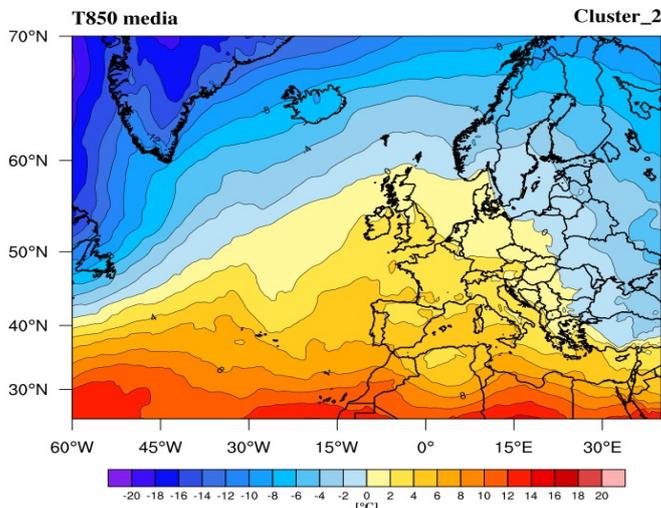
Per il cluster C2, il campo di temperatura medio a 850 hPa in (Figura 3.16.c) nell'area compresa tra il canale di Sicilia e la Sardegna, presenta valori medi tra 6 e 8°C con una deviazione standard tra 2 e 2.5°C (Figura 3.16.d).



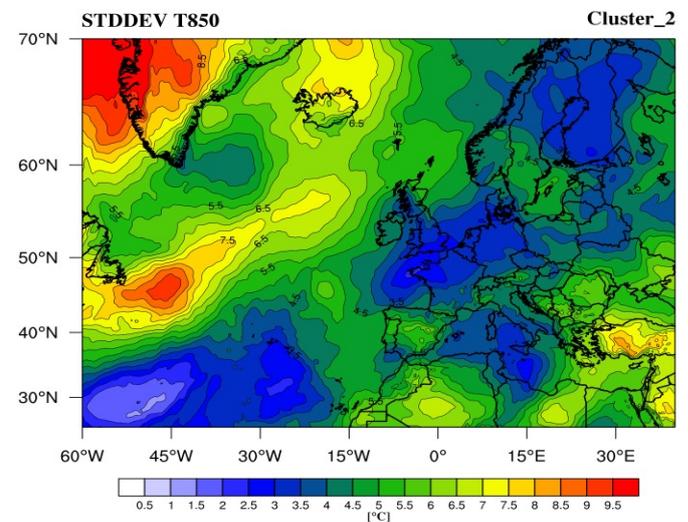
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.16 Nella colonna a sinistra (a) e (c) sono raffigurati il campo medio della temperatura calcolata a 850 hPa per le 7 giornate (Tabella 2) appartenenti al cluster C1 e C2 per il periodo 1979-2009 misurato in °C; nella colonna destra (b) e (d) è mostrata la deviazione standard relativa al campo di temperatura medio per il cluster C1 e C2.

Inoltre, le temperature risultano tra 2 e 6°C con una deviazione standard tra 4.5 e 5 °C sulla penisola Iberica e tra 2 e 6°C con una deviazione standard media di 3°C e di 3.5°C sulle isole Baleari.

Dall'analisi dei risultati, le differenze tra i due cluster consistono nella presenza di un elevato gradiente termico tra la Sardegna e le isole Baleari presente nel cluster C1 e che risulta assente nel cluster C2. Dai valori della deviazione standard relativa ai valori medi emerge, infatti, come vi sia una bassa incertezza in quest'area; dunque, i valori medi sono rappresentativi delle caratteristiche termiche che si riscontrano in questa area in presenza di un cluster C1.

Inoltre, i bassi valori della deviazione standard nel tratto compreso tra il canale di Sicilia e la Sardegna indicano che l'avvezione calda risulta un altro elemento caratteristico di C1 che si riscontra anche in C2 ma in modo meno marcato; i valori medi risultano più alti in C1 che non in C2 con un'incertezza che risulta bassa in entrambi i cluster a causa della stagionalità differente in cui questi cluster si sviluppano; difatti, le giornate che sono state considerate per le medie ricadono nei mesi di settembre, ottobre, novembre e dicembre per il cluster C1 e prevalentemente nei mesi di dicembre, gennaio, febbraio, esclusa una sola giornata a settembre, per il cluster C2.

3.3.4 Campo di vento medio tra 700-1000 hPa e 250-500 hPa

In Figura 3.17 e Figura 3.18 sono mostrate le componenti dei venti orizzontali medi per il cluster C1 e C2 tra le superfici isobariche 700-1000 hPa e 250-500 hPa.

Dall'analisi dei campi medi emerge che:

- i venti mediati tra le superfici isobariche di 700 e 1000 hPa (Figura 3.17.a) mostrano una rotazione ciclonica sulle isole Baleari, disponendosi con direzione sud-sud-est sulla Sardegna con una velocità media prossima a 30 km/h; la deviazione standard sulle isole Baleari è compresa tra 10 e 20 km/h mentre sulla Sardegna risulta tra 20 e 30 km/h (Figura 3.17.b)
- i venti mediati tra le superficie isobariche di 250 e 500h hPa (Figura 3.18.a) si dispongono da sud-ovest, mostrano una rotazione oraria rispetto ai venti medi calcolati in prossimità del suolo, con valori media tra 70 e 80 km/h sull'Algeria e sul canale di Sardegna con una deviazione standard tra 20 e 30 km/h (Figura 3.18.b)

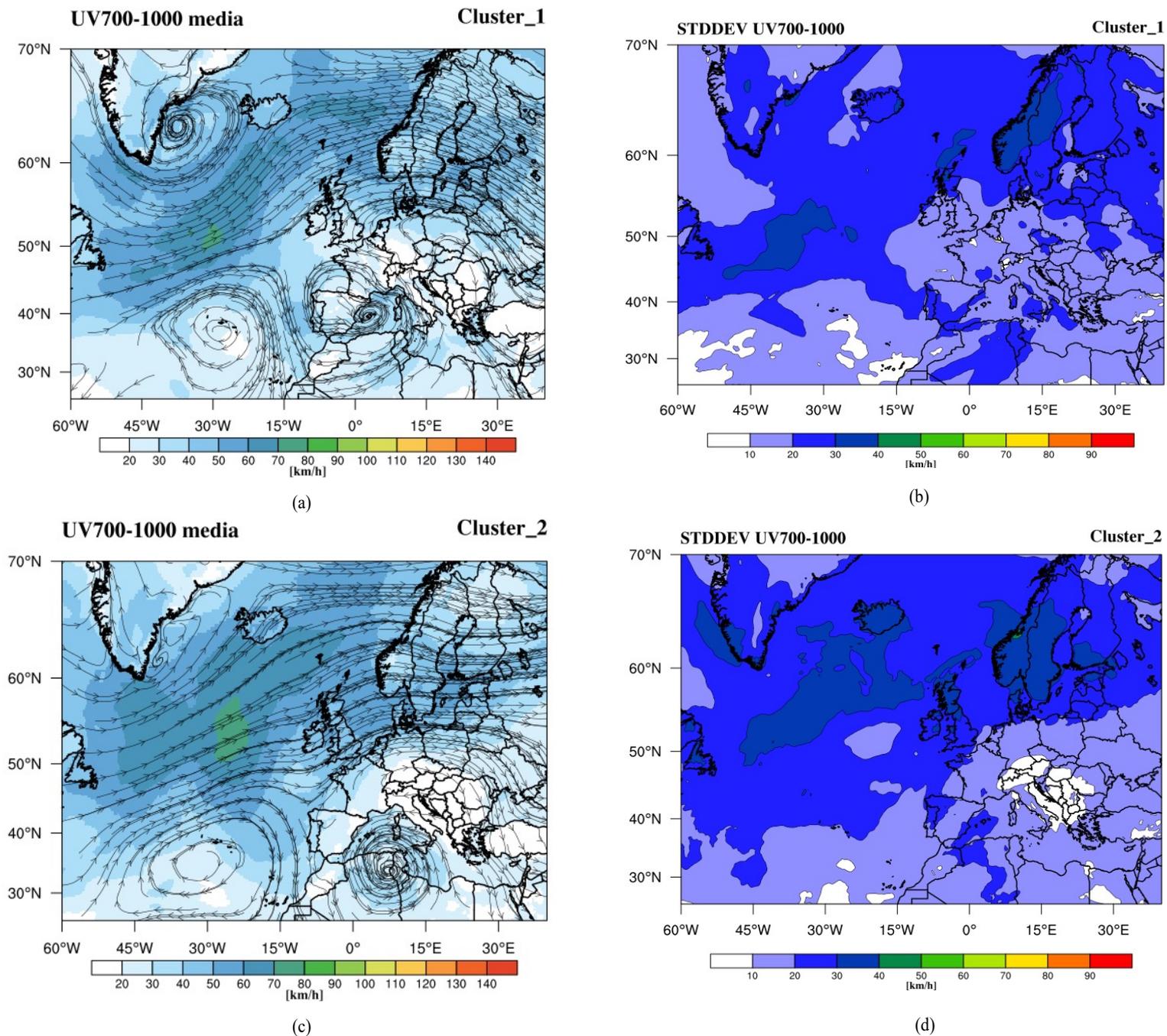


Figura 3.17 Nella colonna a sinistra (a) e (c) sono raffigurati il campo medio del vento calcolato alle superfici isobariche di 700-1000 hPa misurato in km/h per le 7 giornate (Tabella 2) appartenenti al cluster C1 e C2 nel periodo 1979-2009; nella colonna destra (b) e (d) è mostrata la deviazione standard relativa al campo di vento medio alle superfici isobariche di 700-1000 hPa per il cluster C1 e C2 misurata in km/h.

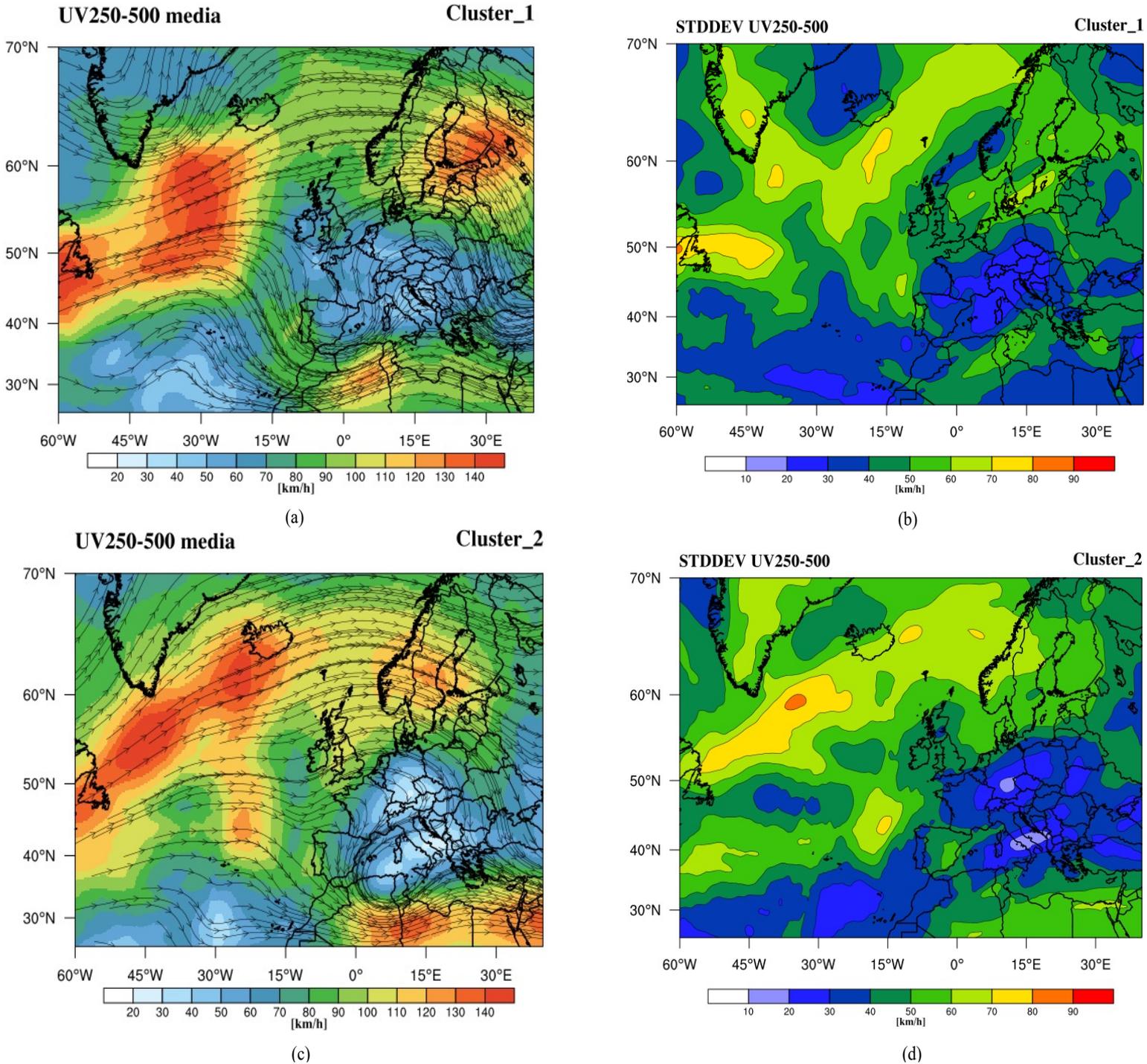


Figura 3.18 Nella colonna a sinistra (a) e (c) sono raffigurati il campo medio del vento calcolato alle superfici isobariche di 250-500 hPa misurato in km/h per le 7 giornate (Tabella 2) appartenenti al cluster C1 e C2 nel periodo 1979-2009; nella colonna destra (b) e (d) è mostrata la deviazione standard relativa al campo di vento medio alle superfici isobariche di 250-500 hPa per il cluster C1 e C2 misurata in km/h.

Sempre in Figura 3.17 sono mostrate le componenti dei venti orizzontali medi per il cluster C2, in cui si osserva che:

- i venti mediati tra le superficie isobariche di 700 e 1000 hPa (Figura 3.17.c) mostrano una rotazione ciclonica sulla Sardegna, con venti prevalenti da est-sud-est con velocità medie che non superano i 30 km/h tra 10 e 20 km/h (Figura 3.17.d)
- i venti mediati tra le superficie isobariche di 250 e 500 hPa (Figura 3.18.c) risultano da est o nord-est con una velocità media sulla Sardegna di circa 30 km/h con una deviazione standard tra 20 e 30 km/h. (Figura 3.18.d)

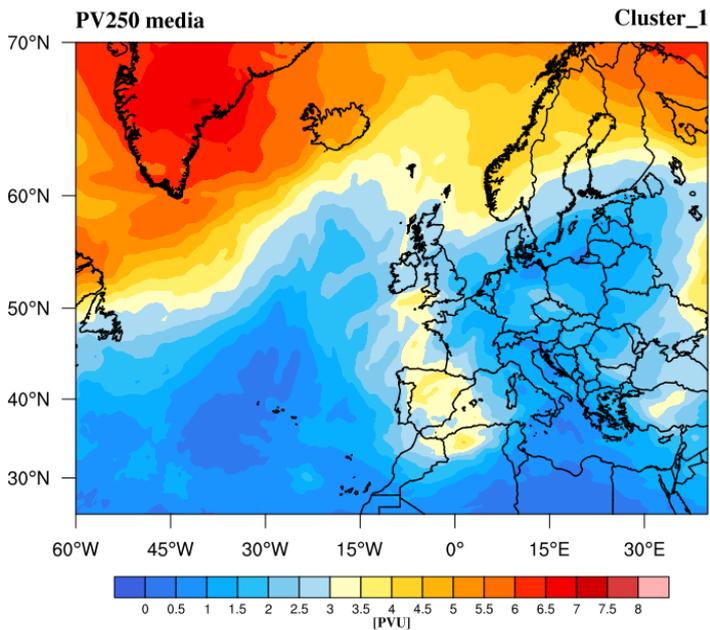
L'analisi dei campi medi delle componenti orizzontali del vento mostra come sia presente una rotazione oraria del vento con la quota (*wind shear*) sulla Sardegna nel cluster C1; anche il cluster C2 risulta presente ma risulta meno marcata.

3.3.5 Vorticità potenziale media a 250 hPa

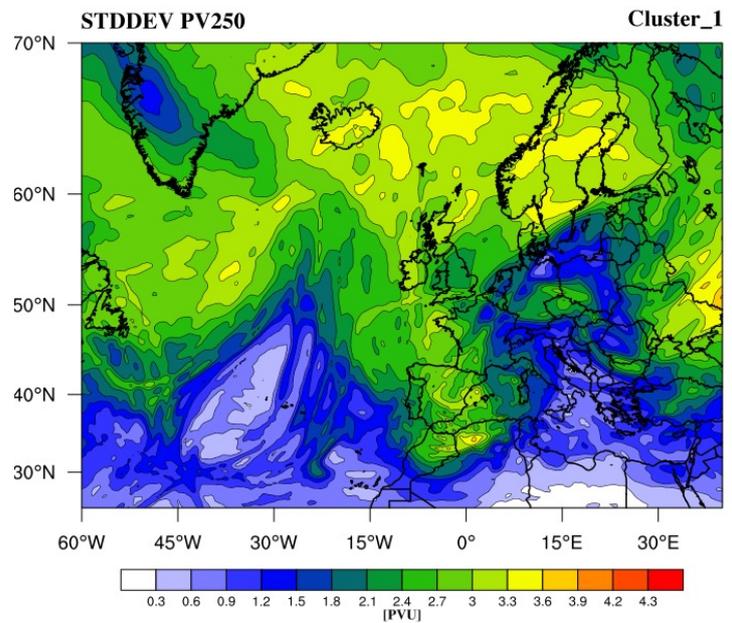
In Figura 3.19 è rappresentata la vorticità potenziale media calcolata a 250 hPa per il cluster C1 e per il cluster C2 rispettivamente.

Nel cluster C1 (Figura 3.19.a) si nota come in corrispondenza della saccatura e del minimo al suolo precedentemente osservati in (Figura 3.14), i valori risultano superiori a 3 PVU, nell'area tra la Penisola Iberica e le isole Baleari; nel cluster C2 si osserva invece come i valori sulla Sardegna, Algeria, Tunisia e isole Baleari siano oltre i 6 PVU (Figura 3.19.c). I valori medi di campo più alti in C2 intorno alla Sardegna, uniti anche al fattore stagionale, potrebbero indicare in ogni caso un maggiore contributo della vorticità potenziale di origine stratosferica che ha interessato l'area oggetto di studio.

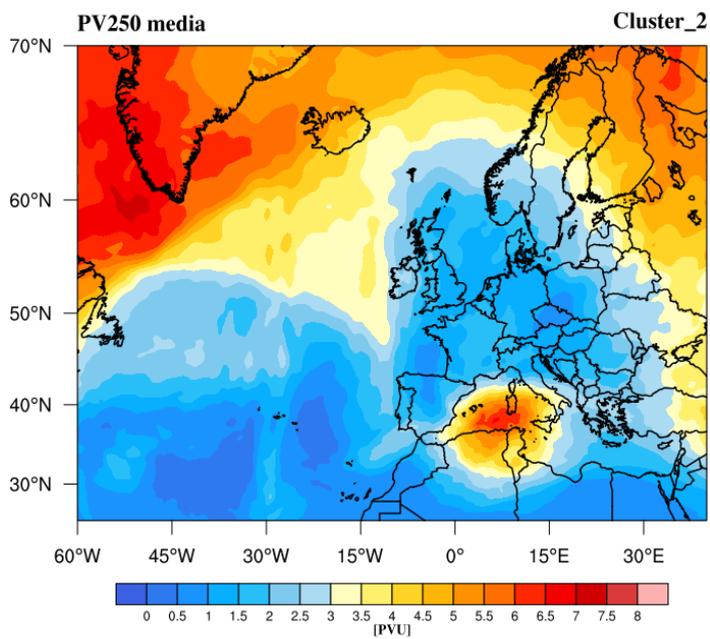
Per quanto riguarda i valori della deviazione standard in entrambi i cluster risultano confrontabili nelle aree in cui si osservano valori di vorticità potenziale superiori ai 2 PVU.



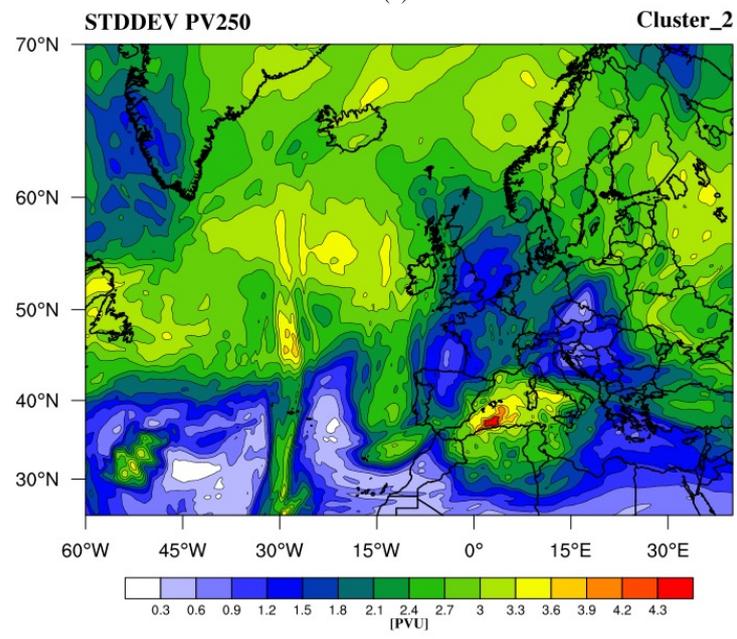
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.19 Nella colonna a sinistra sono (a) e (b) sono raffigurati il campo medio della vorticità potenziale a 250 hPa misurato in PVU per le 7 giornate (Tabella 2) appartenenti al cluster C1 e C2 relative al periodo 1979-2009; nella colonna destra (c) e (d) è mostrata la deviazione standard relativa al campo medio di vorticità potenziale a 250 hPa misurato in PVU.

3.3.6 Umidità relativa media a 250 hPa

In Figura 3.20 sono mostrati i campi medi per l'umidità relativa media a 250 hPa.

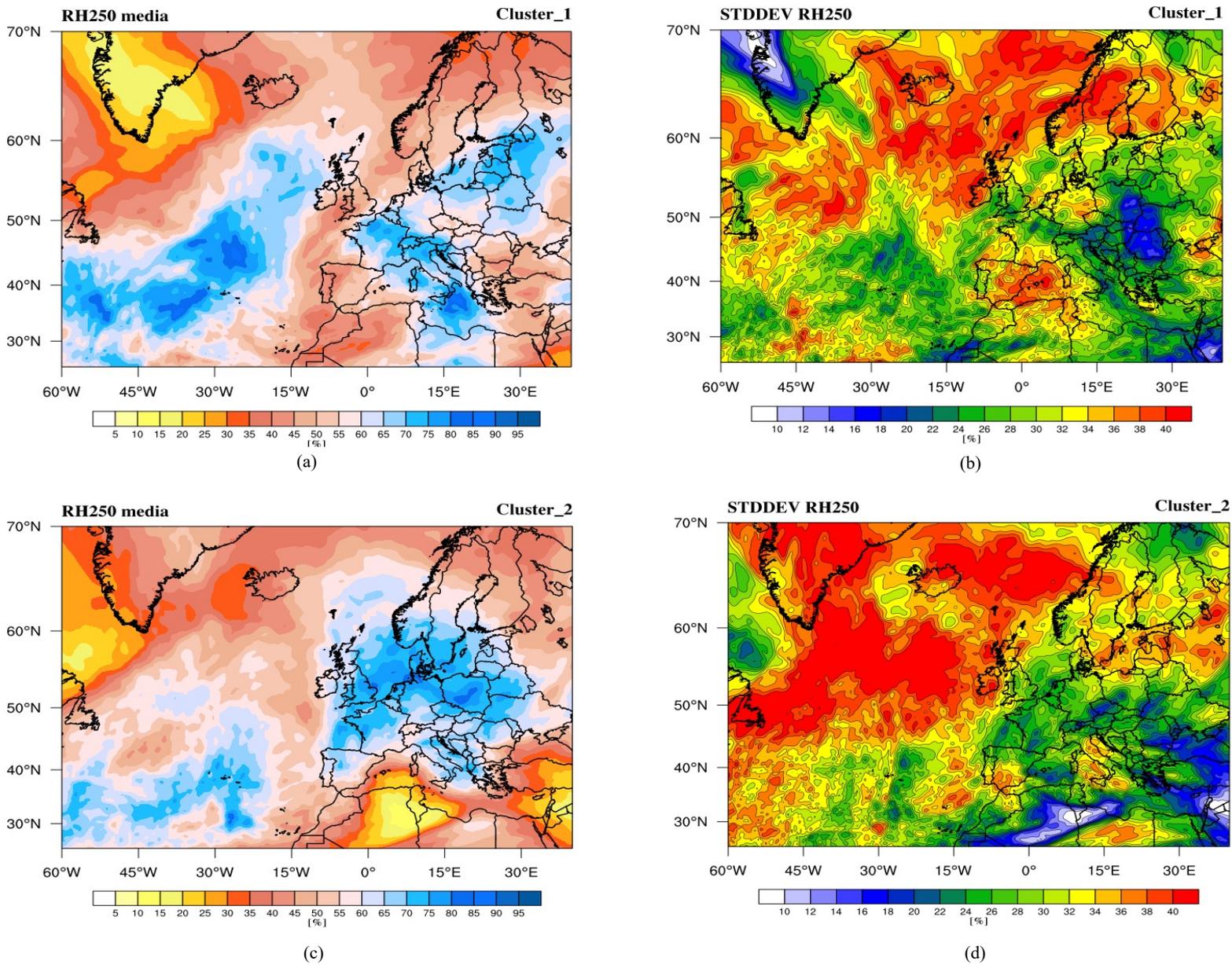


Figura 3.20 Nella colonna a sinistra sono (a) e (b) sono raffigurati il campo medio della umidità relativa a 250 hPa misurato in percentuale (%) per le 7 giornate (Tabella 2) appartenenti al cluster C1e C2 relative al periodo 1979-2009; nella colonna destra (c) e (d) è mostrata la deviazione standard relativa al campo medio di umidità relativa a 250 hPa misurato in percentuale (%).

Sempre nella stessa area interessata da alti valori di vorticità potenziale medi, si osservano nel caso del cluster C1 (Figura 3.20.a) valori di umidità relativa media a 250 hPa compresi tra il 35% e il 45%, con valori di deviazione standard elevati nell'area compresa tra la penisola Iberica e la Sardegna (Figura 3.20.b)

Nel cluster C2 sono presenti invece valori medi più bassi compresi tra il 15% e il 20% (Figura 3.20.c) con una deviazione standard molto bassa (Figura 3.20.d); ciò indica che la media rappresenta bene i valori tipici che si possono riscontrare in presenza di questo cluster, a supporto ulteriore all'ipotesi avanzata circa l'origine stratosferica della vorticità potenziale che interessa la Sardegna e i mari circostanti.

3.3.7 Anomalia di temperatura superficiale del mare

In Figura 3.21 è mostrata l'anomalia di temperatura superficiale media riferita al periodo 1979-2009 per i cluster C1 e C2. Essa è stata ottenuta calcolando dapprima la media della temperatura superficiale dei 16 giorni precedenti alla giornata in cui si è verificata la precipitazione più alta, inclusa la giornata stessa.

Successivamente, è stata calcolata la media dei 16 giorni considerati nel periodo di riferimento compreso tra il 1979 e il 2009 ottenendo 31 valori che sono stati nuovamente mediati per ottenere un unico valore rappresentativo dei 16 giorni considerati; tale valore verrà sottratto dalla temperatura media ricavata per i 16 giorni nell'anno di interesse in cui è avvenuta la giornata di precipitazione intensa, per ottenere l'anomalia di temperatura media. La procedura verrà ripetuta per tutte le 7 giornate del cluster C1 e del cluster C2.

Infine, mediando le anomalie così ottenute sulle 7 giornate di ciascun cluster, sono state ottenute le anomalie medie di temperature della superficie del mare (sea surface temperature, SST) rappresentative di C1 e C2.

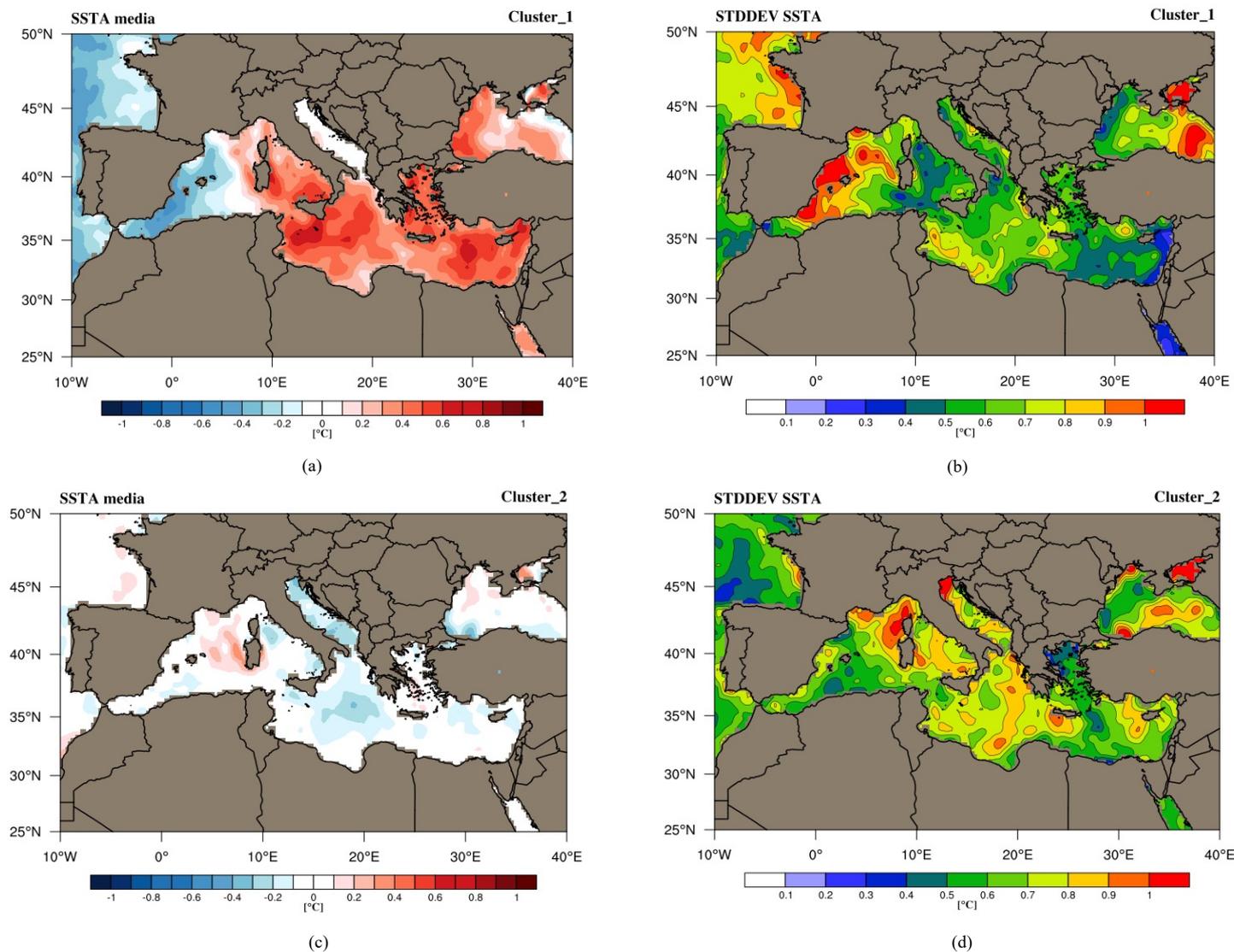


Figura 3.21 Nella colonna a sinistra (a) e (c) è raffigurata l’anomalia di temperatura superficiale media calcolata per le 7 giornate (Tabella 2) appartenenti al cluster C1e C2 relative al periodo 1979-2009; nella colonna destra: deviazione standard (b) e (d).

Si può osservare nel cluster C1 le aree interessate da anomalie positive sono su gran parte del Mediterraneo (orientale, centrale e parte di quello occidentale), con valori medi sul canale di Sardegna 0.4 e 0.6°C (Figura 3.21.a) con una deviazione standard tra 0.2 e 0.7°C (Figura 3.21.b); per il cluster C2 si osservano anomalie di temperatura medie positive solo sulla Sardegna comprese tra 0.2 e 0.4°C (Figura 3.21.c) con una deviazione standard alta compresa tra 0.9 e 1°C (Figura 3.21.d).

Dunque, in presenza del cluster C1 la deviazione standard risulta paragonabile all’anomalia media, segno che le anomalie positive medie sulla Sardegna risultano rappresentative del tipico comportamento termico della superficie del mare; nel cluster C2 ciò non si verifica in quanto i valori della deviazione standard risultano molto più alti dell’anomalia media.

3.4 Meccanismi fisici dei cicloni C1 e C2

3.4.1 Meccanismi fisici del cluster C1

Dal confronto tra i campi medi di geopotenziale alla superficie isobarica a 500 hPa, temperatura alla superficie isobarica a 850 hPa, campo di MSLP medio e soprattutto dal campo del vento medio si può osservare come in C1 sia presente una struttura media baroclina.

In C1 il minimo dell'altezza di geopotenziale sul livello di 500 hPa risulta posizionato a nord-ovest del minimo di pressione al suolo, come si osserva tipicamente in una configurazione baroclina. Questo tipo di struttura, in generale, determina avvezioni di aria fredda nordatlantica sul lato occidentale della saccatura (Oceano Atlantico e parte della penisola Iberica) e avvezioni di aria caldo-umida sui settori orientali (aree intorno alle isole Baleari e alla Sardegna), comportando la presenza di un elevato gradiente termico tra le due aree, in grado quindi di favorire l'instabilità potenziale della colonna atmosferica. L'effetto della configurazione baroclina si accompagna inoltre a uno shear verticale positivo, cioè il campo di vento medio aumenta in velocità all'aumentare della quota passando da valori medi compresi tra 20-30 km/h a valori compresi tra i 70-80 km/h ruotando in senso orario da sud-sud-est in prossimità del suolo e da sud-ovest nella medio-alta troposfera. Questo fenomeno assieme agli alti valori di vorticità potenziale positiva di circa 3.3 PVU nell'area interessata dalla rotazione oraria dei venti, indicano la presenza di moti ascendenti nell'area in cui si sviluppa il minimo chiuso e dunque di venti convergenti al suolo in direzione della Sardegna verso le isole Baleari.

In base al periodo considerato, cioè 1979-2009, i mesi in cui si verificano più di frequente i cluster C1 presentano caratteristiche tardo autunnali in cui il mare risulta generalmente più caldo rispetto ad altri mari alla stessa latitudine a causa dell'elevata inerzia termica dell'acqua. In presenza di un'anomalia di temperatura media particolarmente significativa sulla Sardegna di circa 0.6°C e in condizioni sinottiche tipiche del cluster C1 in cui viene favorita la discesa di masse d'aria più secche da nord verso sud, ciò può essere un ulteriore elemento di innesco di fenomeni di precipitazione intensa a causa del rapido raffreddamento della superficie del mare tramite la rimozione del calore nei primi strati superficiali. Lo scambio di calore latente tra massa d'aria e la superficie del mare apporterà una maggiore quantità di vapore alla massa d'aria che subirà i

processi di condensazione per moti ascensionali presenti nell'area depressionaria, con conseguente formazione di precipitazione sull'area interessata dall'avvezione calda.

3.4.2 Meccanismi fisici del cluster C2

Nel cluster C2 non si nota nessuna struttura baroclina in quanto dal confronto tra i campi medi di geopotenziale alla superficie isobarica di 500 hPa, temperatura alla superficie isobarica a 850 hPa e il campo di MSLP medio, si osserva che i due minimi risultano in media in asse o lievemente asimmetrici. Non si osservano inoltre gradienti di temperatura marcati come nel cluster C1 e l'avvezione calda risulta confinata nell'area di sviluppo del minimo al suolo tra la Tunisia e l'Algeria.

La rotazione dei venti è presente in quanto il vento medio tra le superfici isobariche a 1000 e 700 hPa e a 500 hPa e 250 hPa, mantiene una direzione prevalentemente dai quadranti orientali passando da sud-est in prossimità del suolo a nord-est nella media-alto troposfera.

Nel periodo considerato 1979-2009 i mesi in cui si verificano più frequentemente i cluster C2 presentano caratteristiche autunnali (come indicato dalla Figura 3.3 nel paragrafo 3.2.2).

Il fatto che tre eventi avvengano anche durante l'inverno (19 gennaio 1988, 26 gennaio 1992, 28 febbraio 2003) potrebbe essere spiegato con la posizione che assume il ciclone nella configurazione barica tipica di C2, cioè il minimo barico su tutti i livelli posizionato o sul Canale di Sardegna, o sul Nord-Algeria o sulla Tunisia, o sul Canale di Sicilia; in questo modo esso può far convergere verso la Sardegna masse d'aria provenienti dalle coste della Libia, dove la temperatura superficiale del mare raggiunge valori compresi tra i 16 e i 17 gradi a gennaio e febbraio (Figura 3.1.e Figura 3.1.f) che comportano un contenuto molto alto di vapore acqueo nei bassi strati atmosferici, benché in misura minore rispetto all'autunno. Negli strati medi e alti, invece, è presente un nucleo di aria fredda e secca come evidenziano gli alti valori di vorticità potenziale superiori a 4 PVU che indicano aria stabile e stratificata di origine stratosferica. La discesa di aria fredda, secca e molto stabile comporta il piegamento della tropopausa che può interagire con gli strati atmosferici inferiori; in presenza di questo forte gradiente verticale si determina una notevole instabilità, con un CAPE che può assumere valori molto elevati. Come descritto nell'introduzione, la Sardegna presenta un'orografia complessa e particolarmente ripida nella sua parte orientale (Chessa et al, 1999), dunque è sufficiente un sollevamento orografico sulle montagne dell'Ogliastra per innescare la convezione e produrre condensazione e piogge intense. Tutto ciò, prescinde dall'anomalia di

temperatura superficiale media in quanto questa risulta meno di 1 °C mentre la differenza tra la temperatura superficiale sulle coste Libiche e quella del Tirreno è oltre i 4 °C.

3.4.3 Confronto tra i meccanismi fisici tra il cluster C1 e il cluster C2

Dal confronto tra i campi emergono alcune differenze tra i due cluster.

Gli elementi sinottici significativi nel cluster C1 si osservano nell'area compresa tra le isole Baleari e la Sardegna in cui è presente in media un'asimmetria tra il minimo in quota e al suolo, l'avvezione calda nella bassa troposfera sulla Sardegna e un marcato gradiente di temperatura sulla superficie isobarica a 850 hPa nel mar di Sardegna; inoltre nella stessa area i venti ruotano in senso orario con la quota e ciò si accompagna ad alti valori di vorticità potenziale superiori ai 2 PVU e bassi valori di umidità relativa tra 40% e 45%.

Al contrario, il cluster C2 mostra degli elementi significativi differenti rispetto al cluster C1. L'area in cui si sviluppa in media questo tipo di cluster è compresa tra la Tunisia e il canale di Sardegna in cui il minimo in quota e al suolo risultano in media in asse o lievemente decentrati; rispetto al cluster C1 risulta presente un'avvezione calda sulla Sardegna anche se con temperature più basse e i gradienti di temperatura risultano meno marcati nell'area in cui si sviluppa il ciclone.

La variazione del vento con la quota è presente anche se in modo meno marcato rispetto a C1, in quanto i venti a tutte le quote subiscono lievi variazioni nella direzione, risultando in media dai quadranti orientali.

Inoltre, nel cluster C2 si osservano valori di vorticità potenziale che superano i 4 PVU con valori molto bassi compresi tra 20 e 30 %.

Anche l'analisi della temperatura superficiale media del mare attorno alla Sardegna differenzia il cluster C1 dal cluster C2

Nel cluster C1 la temperatura superficiale media risulta elevata nei mesi in cui si verifica più frequentemente questo tipo di cluster (ottobre e novembre) oltre che una anomalia positiva di temperatura superficiale particolarmente significativa di 0.6°C sulla Sardegna e su tutto il Mediterraneo orientale.

Nonostante il cluster C2 si verifichi più frequentemente durante il mese di novembre, vi sono tre casi in cui il cluster C2 si verifica durante mesi tipicamente invernali (2 casi a gennaio e uno a febbraio), in cui si osserva un forte gradiente di temperatura superficiale del mare tra le coste della Libia e il mar Tirreno che risulta di oltre 4°C. L'anomalia di temperatura media in questo caso

risulta poco significativa sulla Sardegna, tra 0.1 e 0.2°C ed è affetta da un'alta incertezza in quanto non confrontabile con il valor medio.

Gli elementi che accomunano i due cluster risultano dal confronto tra i campi medi di geopotenziale, di MSLP, di vorticità potenziale e umidità relativa.

Dal confronto tra i campi medi di geopotenziale e MSLP risulta evidente la presenza di due campi di alta pressione sulle isole Azzorre e sull'Europa centrale e Balcanica, sebbene nel cluster C2 risultino valori più alti al suolo rispetto al cluster C1. Una struttura barica simile, in particolare la disposizione meridiana dell'anticiclone delle Azzorre verso nord, può agevolare la discesa e il trasporto di masse d'aria fredde e dunque di strutture depressionarie in seno a saccature in quota (Bjerknes, 1918).

Dal punto di vista della temperatura superficiale media sia per il cluster C1 che per il C2 il gradiente di temperatura tra le coste Libiche e il Tirreno risulta inferiore ma comunque rilevante, di circa 3°C durante i mesi autunnali in cui entrambi i cluster avvengono più frequentemente.

Poiché la Sardegna possiede un'orografia complessa, si può inoltre ipotizzare che in presenza di entrambi i cluster questo elemento possa fungere da ulteriore fattore di innesco di fenomeni intensi di precipitazione e influenzare il pattern delle precipitazioni (Serra e Sollai, 1990; Bodini e Cossu, 2008); perciò il quadro sinottico interagendo con la geografia locale può portare a fenomeni alla mesoscala oppure anche alla microscala. Questo significa che vi può essere un'ulteriore instabilità dinamica locale dell'intera colonna d'aria a causa dei moti ascensionali provocati dalla marcata pendenza dell'orografica che si riscontra per esempio nella parte orientale della Sardegna (Chessa et al., 1998), quando risulta esposta ai flussi umidi.

Per quanto riguarda il confronto tra i campi medi della vorticità potenziale e dell'umidità relativa si osserva che in entrambi i cluster viene superata la soglia dei 2 PVU. Dalla definizione stessa della tropopausa dinamica fornita dal WMO (1985) e dalla letteratura (Holton et al., 1995) ciò potrebbe indicare la presenza di aria stabile e stratificata tipica della stratosfera con una discesa di aria fredda, secca e molto stabile che può portare a un *folding* della tropopausa che può interagire con gli strati atmosferici inferiori; se è presente un gradiente di temperatura verticale, come si osserva nel caso del cluster C2, questo può comportare un brusco sollevamento delle masse calde e umide.

In base ai risultati ottenuti, si può ipotizzare che gli elementi sinottici e termodinamici tipici del cluster C1 possano favorire maggiormente situazioni instabili e barocline rispetto al cluster C2 con conseguente aumento dei fenomeni di precipitazione intensa.

Tuttavia, sia nel caso del cluster C1 che del cluster C2 le precipitazioni con cumulate giornaliere così elevate hanno una componente convettiva dominante, favorita da aria calda con alto contenuto di vapore acqueo nei bassi strati e aria fredda in quelli medio alti. Le variabili ricavabili dal profilo di temperatura e umidità che possono fornire ulteriori elementi di analisi dal punto di vista termodinamico e dinamico come il CAPE, il Lifting Condensation Level (LCL), Level of Free Convection (LFC) non sono stati oggetto dello studio poiché esso si limita ai dati di rianalisi ERA5.

3.5 Casi di studio significativi

3.5.1 Caso rappresentativo per il cluster C1: 22 ottobre 2008

Un caso di studio scelto come rappresentativo del cluster C1 è quello della giornata del 22 ottobre 2008 avvenuto a Capoterra, in provincia di Cagliari.

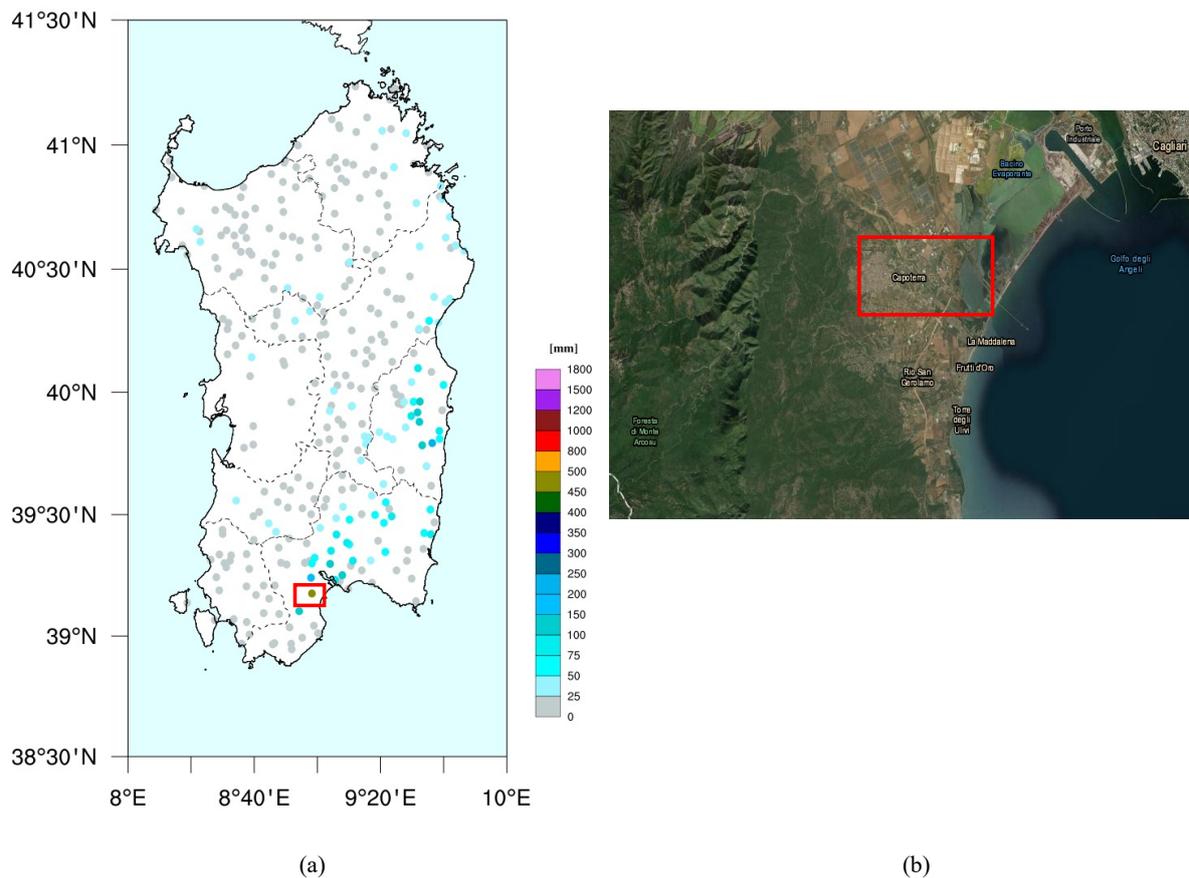
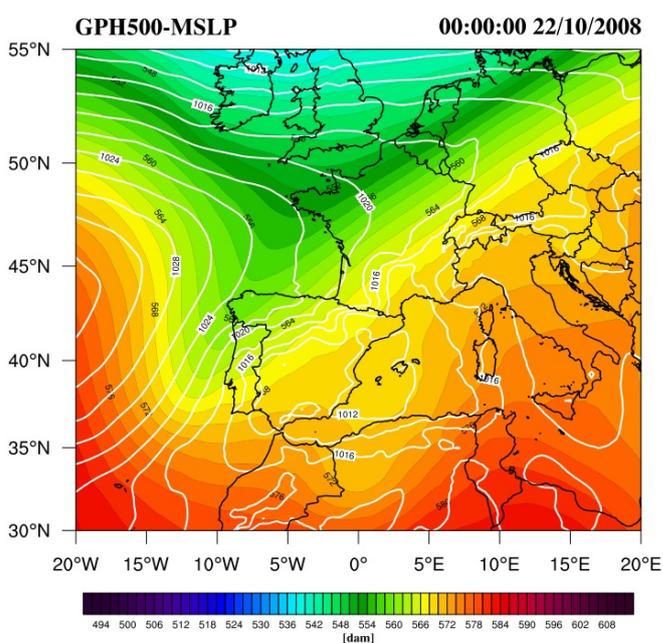
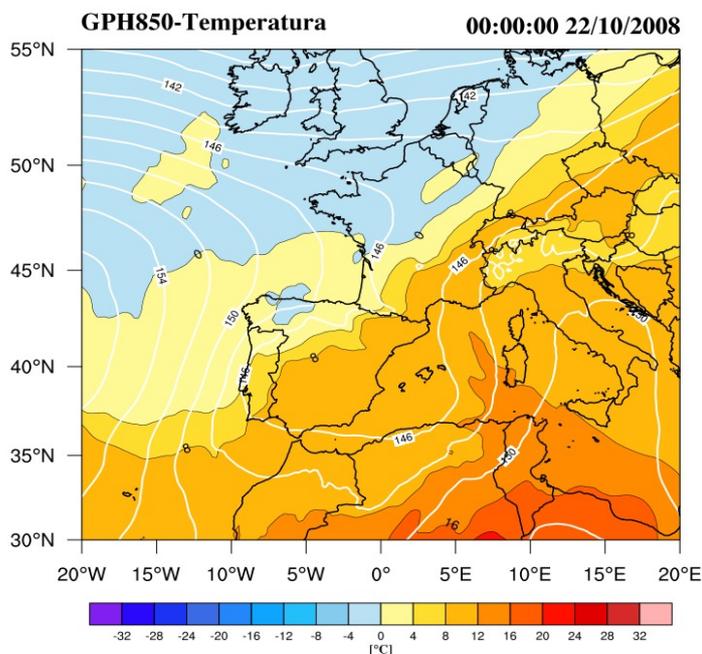


Figura 3.22 Ricostruzione della precipitazione totale dei soli giorni in cui è stata superata la soglia dei 200 mm in almeno una stazione (a). La precipitazione cumulata fu di circa 480 mm (area in rosso). Territorio di Capoterra interessato dalla precipitazione intensa del 22 ottobre 2008 (b).

Il paese si trova ai piedi del Monte Arcosu, una catena montuosa situata a sud-ovest della Sardegna a 5 km dal mare e a 165 m sul livello del mare (Figura 3.22.b). Secondo i dati della rete ARPAS, nella giornata del 22 ottobre 2008 fu registrata a Capoterra una quantità di precipitazione pari a 461 mm nell'arco di poche ore, che provocò intensi fenomeni alluvionali sia a Capoterra che nell'intera provincia di Cagliari.



(a)



(b)

Figura 3.23 Campo di geopotenziale sulla superficie isobarica a 500 hPa e di MSLP (a) e campo di geopotenziale e temperatura sulla superficie isobarica a 850 hPa (b) per la giornata del 22 ottobre 2008.

Come si può notare dalla Figura 3.23 sull'Atlantico è presente una profonda saccatura che dalle Isole Britanniche si estende verso sud sino a raggiungere la penisola Iberica; a est di tale saccatura il flusso perturbato principale si muove verso sud-est sul Mediterraneo occidentale.

La situazione sinottica è caratterizzata inoltre da baroclinicità, come si può osservare dalla Figura 3.23 che rappresenta la temperatura e il geopotenziale sulla superficie isobarica a 850 hPa.

Le temperature nella bassa troposfera risultano tra 12 e 16°C mentre sul Mediterraneo occidentale risultano tra 8 e 12°C. L'elevato gradiente termico proveniente da nord-ovest e sud-est e l'intersezione perpendicolare tra l'isoterma a 12°C e l'isoipsa 148 dam a sud-ovest della Sardegna, indica due tipi di avvezioni: una calda proveniente da sud-est e una fredda proveniente da sud-ovest con conseguente formazione di un sistema frontale.

Un elemento significativo che si nota dalla Figura 3.24 è legato alla presenza di una variazione del vento con la quota (*wind shear*) nell'area a sud-ovest della Sardegna. Si nota, infatti, che i venti al suolo si dispongono da sud-est (Figura 3.24.a) subendo una rotazione oraria verso i quadranti meridionali a 850 hPa (Figura 3.24.b), mentre a 500 e 250 hPa i venti si dispongono rispettivamente da sud-ovest a ovest (Figura 3.24.c e Figura 3.24.d).

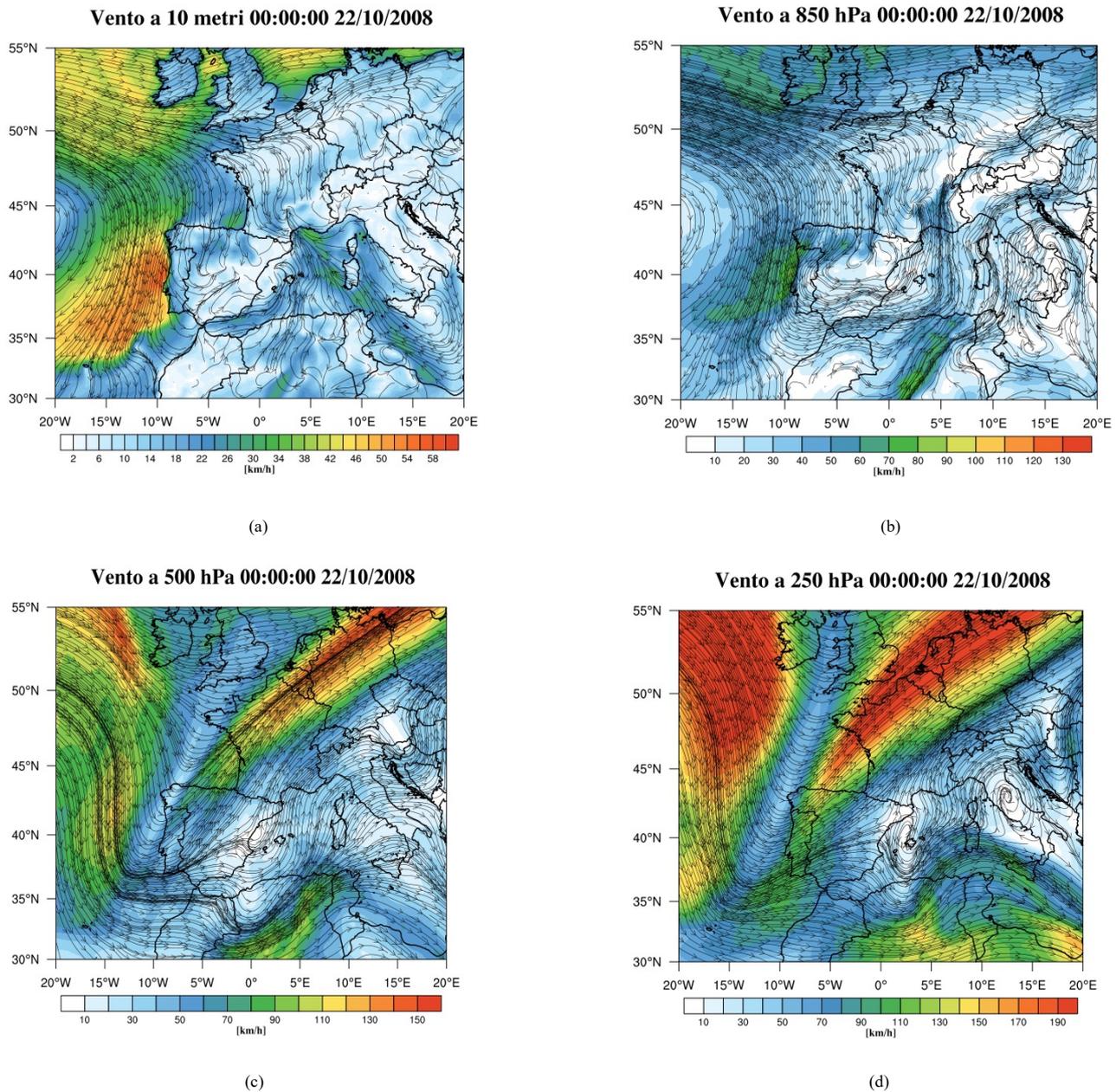


Figura 3.24 Campo di vento a 10 m (a), alla superficie isobarica a 850 hPa (b), 500 hPa (c) e 250 hPa (d) per la giornata del 22 ottobre 2008.

L'area caratterizzata da instabilità baroclina, dove si ha la rotazione del vento con la quota, si accompagna a un aumento della vorticità potenziale a 250 hPa con valori superiori a 6 PVU (Figura 3.25.a). Dunque, sul bordo orientale della saccatura secondaria si avrà una intrusione di aria stratosferica, indicata dai valori di umidità relativa bassi sulla superficie isobarica a 250 hPa, compresi tra il 15% e il 25%, (Figura 3.25.b). Qui si verifica il massimo della divergenza in quota con la generazione di moti ascendenti dal suolo, formazione del minimo barico e aumento dell'instabilità su tutta la colonna atmosferica. Di conseguenza si verificherà convergenza sia al suolo che in bassa troposfera che provoca il richiamo di aria umida da sud-est (850 hPa) proprio sul cagliaritano.

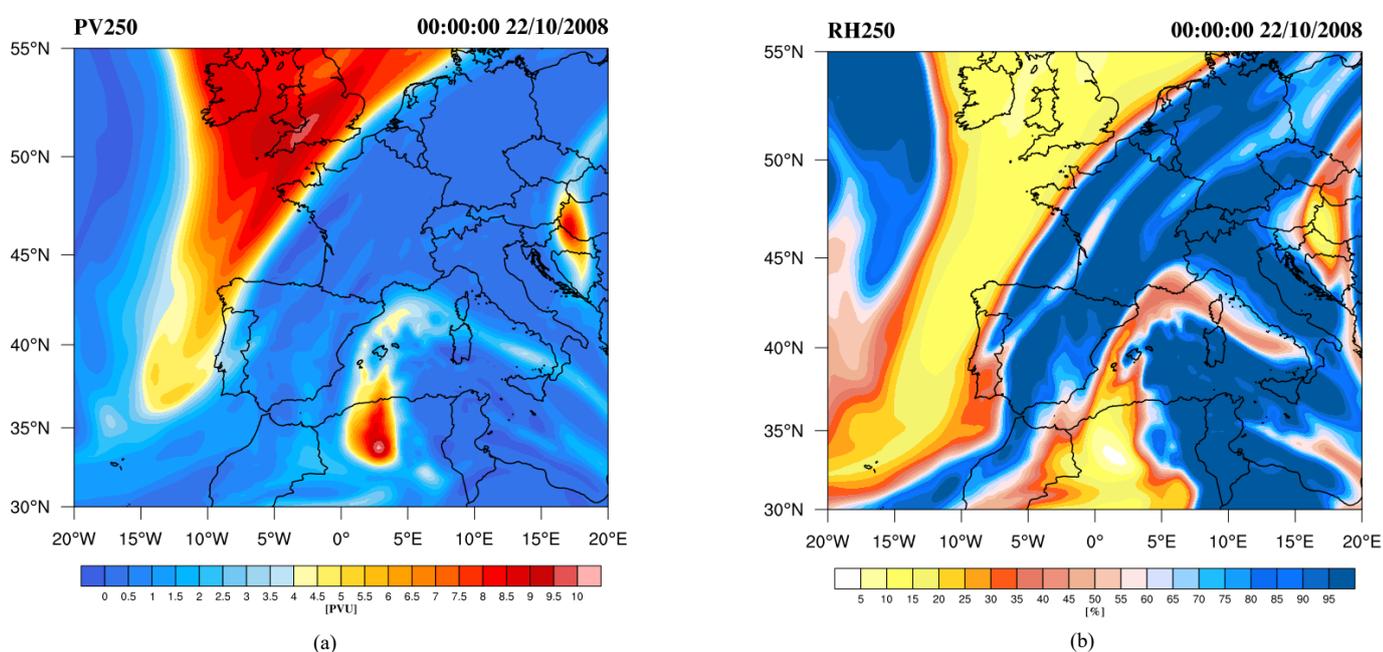


Figura 3.25 Campo di vorticità potenziale a 250 hPa (a) e campo di umidità relativa a 250 hPa (b) per la giornata del 22 ottobre 2008.

Si può ipotizzare che un fenomeno di precipitazione così intensa possa essere legato a una situazione sinottica che agevola l'ingresso di masse d'aria fredde e secche con alti valori di vorticità potenziale, su un'area del Mediterraneo in cui le temperature del mare in media risultano più alte rispetto ad altri mesi dell'anno, fattore che può aumentare l'instabilità della colonna atmosferica a causa degli scambi di calore latente tra massa d'aria e strati superficiali del mare.

Nella Figura 3.22.a è mostrata la ricostruzione della precipitazione cumulata totale dei soli giorni in cui è stata superata la soglia di 200 mm; si nota che a Capoterra il valore totale di precipitazione cumulata è di 480 mm.

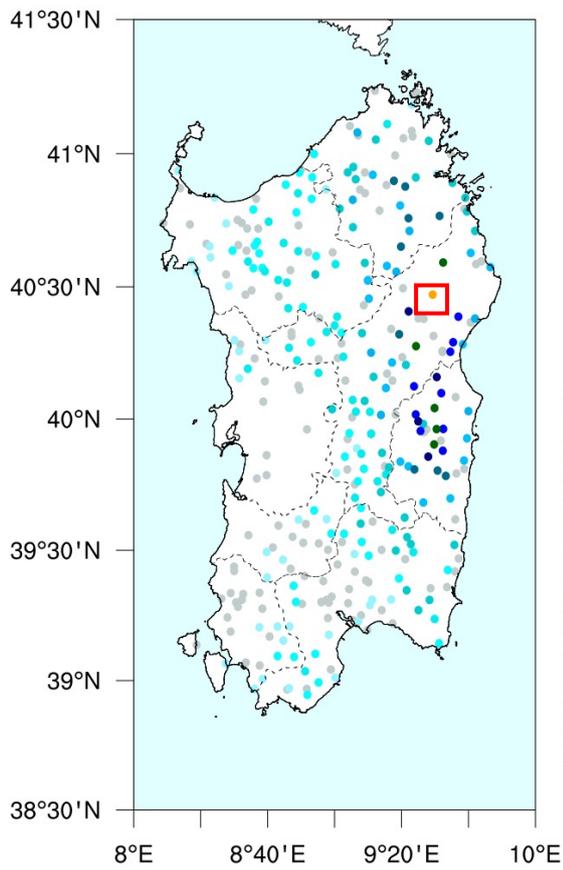
Dai risultati ottenuti nel paragrafo 3.2.3 emerge inoltre il carattere locale della precipitazione e che risulta un elemento caratteristico del cluster C1 per il settore ovest. Infatti, il coefficiente di variazione nel settore ovest è risultato alto ($CV= 486\%$) con una precipitazione totale areale media che non ha superato i 50 mm. Quindi la precipitazione è stata rilevata da poche stazioni distanti tra loro in cui in una sola è stata superata la soglia dei 200 mm/giornata (Figura 3.22b).

Durante questa giornata, la precipitazione intensa è legata a fenomeni convettivi, favoriti dalle condizioni sinottiche presenti e dalla convergenza al suolo; si può però ipotizzare che vi possa essere un contributo ulteriore alla convezione, dovuto al sollevamento orografico (effetto Stau) dei flussi umidi da sud-est a cui è esposta Capoterra, in quanto risulta situata ai piedi della catena montuosa di Monte Arcosu e affacciata su un bacino abbastanza piccolo come il Golfo di Cagliari. Le eventuali forzanti per la convezione non sono state comunque oggetto di studio poiché l'analisi si è basata su dati di rianalisi ERA5.

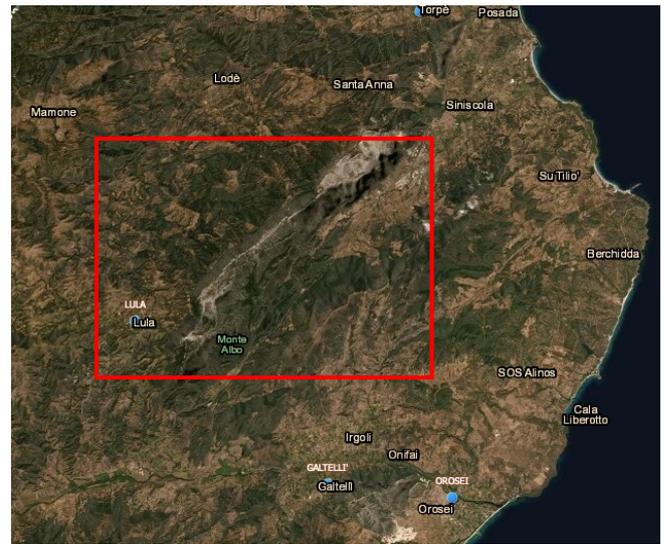
3.5.2 Caso rappresentativo del cluster C2: 26 gennaio 1992

Il caso di studio rappresentativo del cluster C2 scelto per l'analisi è quello della giornata del 26 gennaio 1992 verificatosi a Lula, in provincia di Nuoro. Il paese si trova a una distanza di 21 km dal mare a 521 m di quota sul livello del mare a sud-ovest del Monte Albo (1127 m) (Figura 3.26 b).

La precipitazione registrata dalla rete ARPAS durante questa giornata fu di 257 mm.



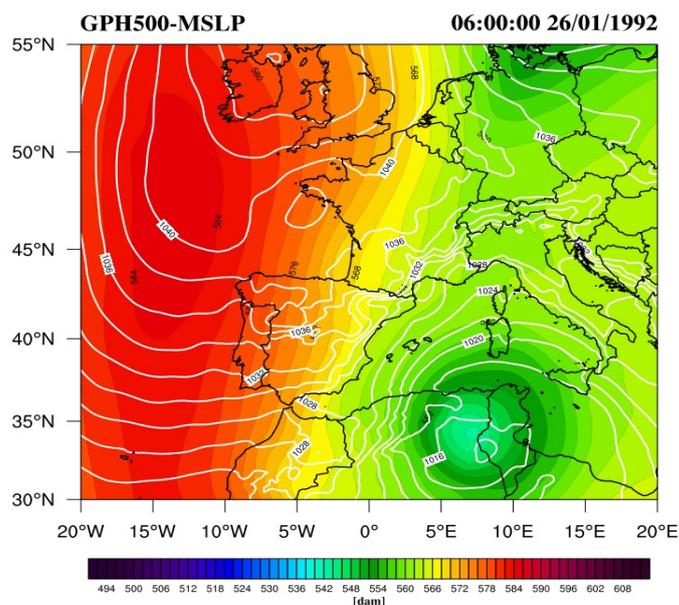
(a)



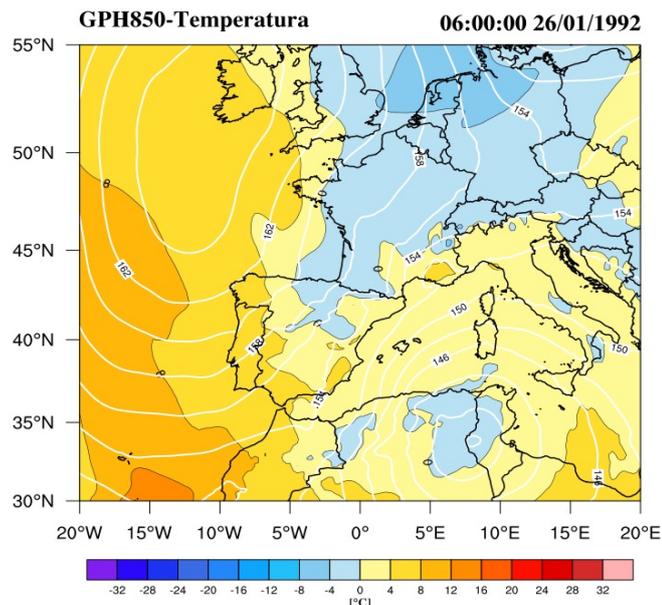
(b)

Figura 3.26 Ricostruzione della precipitazione totale dei soli giorni in cui è stata superata la soglia dei 200 mm in almeno una stazione (a). La precipitazione cumulata fu di circa 500 mm (area in rosso). Territorio di Lula interessato dalla precipitazione intensa del 26 gennaio 1992 (b).

La situazione sinottica è caratterizzata da un profondo minimo in quota e da un minimo al suolo lievemente decentrato rispetto al minimo in quota, con valori al suolo di circa 1014 hPa situati nell'entroterra tra Tunisia e Algeria (Figura 3.27.a)



(a)



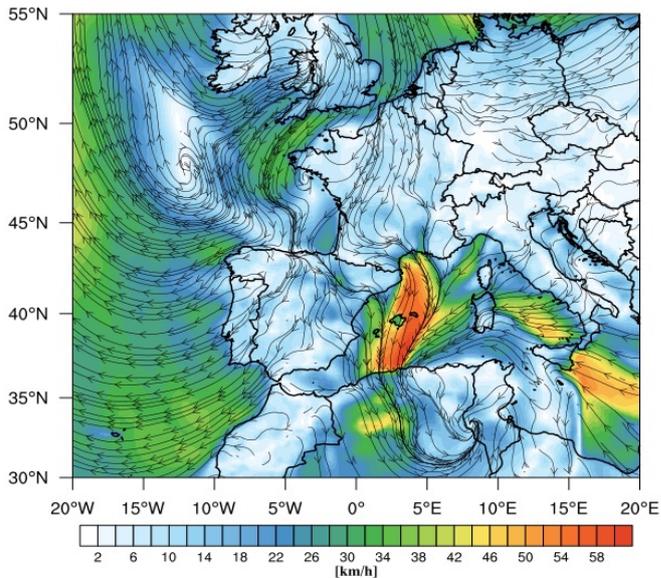
(b)

Figura 3.27 Campo di geopotenziale sulla superficie isobarica a 500 hPa e di MSLP (a) e campo di geopotenziale e temperatura sulla superficie isobarica a 850 hPa (b) per la giornata del 26 gennaio 1992.

Inoltre, è presente un debole gradiente termico (Figura 3.27.b) tra il nucleo freddo posizionato tra la Tunisia e l'Algeria (temperature tra -4 e 0°C) e l'area compresa tra il Golfo di Tunisi, Canale di Sicilia e basso Tirreno (temperature comprese tra 0 e 4°C). La presenza di un minimo sulla Tunisia comporta una circolazione ciclonica sulla Sardegna con venti al suolo provenienti da est oltre i 34 km/h sul nord-est della Sardegna (Figura 3.28.a)

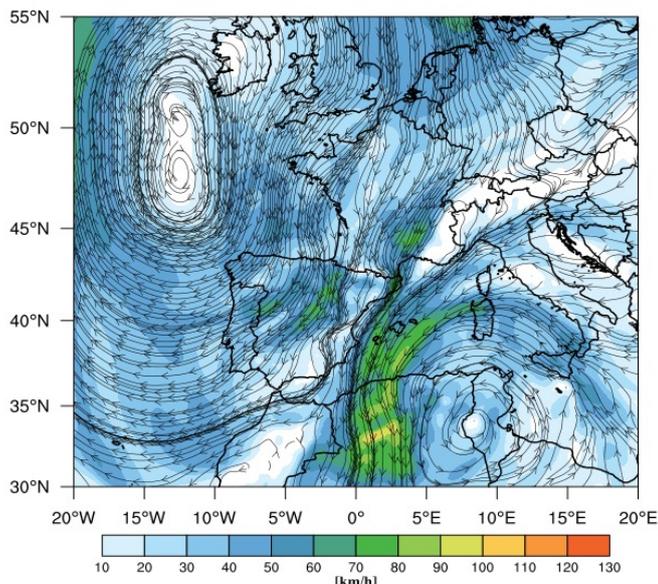
I venti mostrano in questo caso lievi variazioni con la quota, in quanto al suolo, a 850 hPa, 500 hPa e 250 hPa provengono in media da est (Figura 3.28.b, Figura 3.28.c e Figura 3.28.b)

Vento a 10 metri 06:00:00 26/01/1992



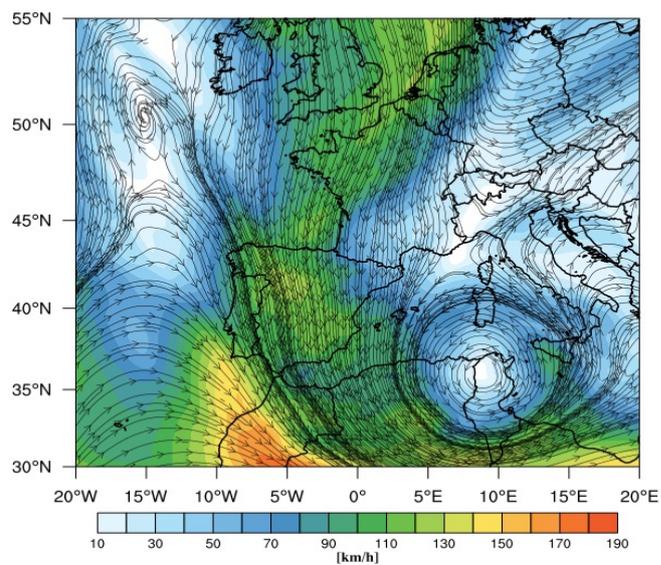
(a)

Vento a 850 hPa 06:00:00 26/01/1992



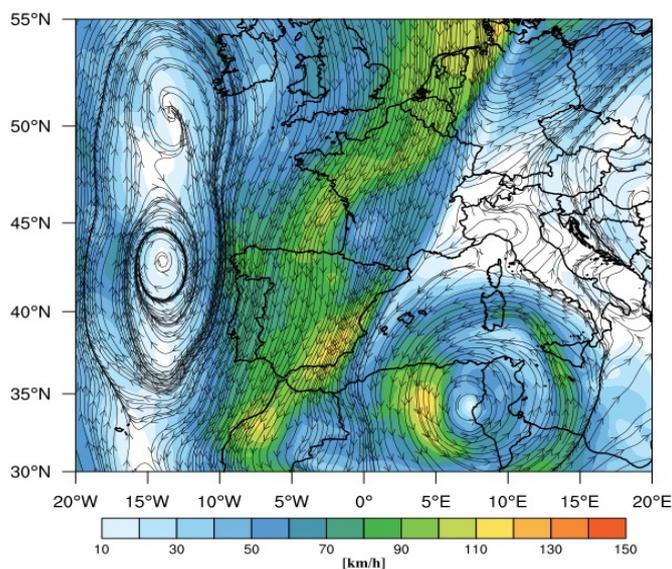
(b)

Vento a 250 hPa 06:00:00 26/01/1992



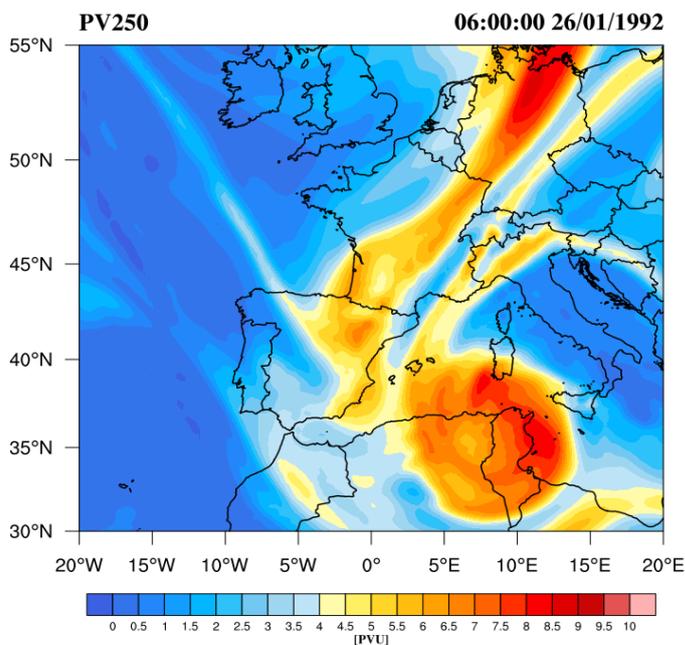
(c)

Vento a 500 hPa 06:00:00 26/01/1992

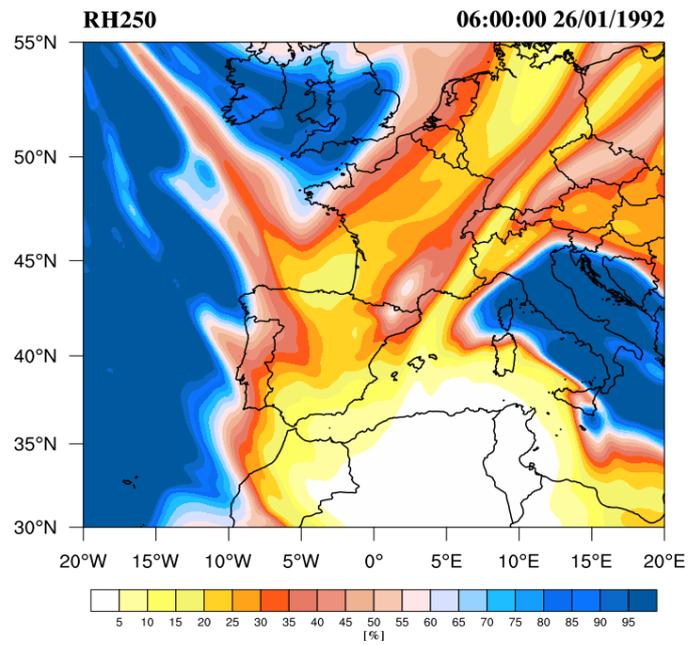


(d)

Figura 3.28 Campo di vento a 10 m (a), alla superficie isobarica a 850 hPa (b), 500 hPa (c) e 250 hPa (d) per la giornata del 26 gennaio 1992.



(a)



(b)

Figura 3.29 Campo di vorticità potenziale a 250 hPa (a) e campo di umidità relativa a 250 hPa (b) per la giornata del 26 gennaio 1992.

Un fattore rilevante in questa giornata è la presenza sull'intera area tra la Sardegna e il nord Africa di alti valori di vorticità potenziale superiori a 6 PVU sulla superficie isobarica a 250 hPa in corrispondenza del minimo chiuso su tutti i livelli (Figura 3.29.a). Questo può essere il segnale di una intrusione di aria stratosferica e di un *folding* della tropopausa, indicato anche dai bassi valori dell'umidità relativa compresa tra il 5 e il 10% (Figura 3.29.b).

Sulla base della discussione dei risultati ottenuti nel par.3.2.3 è emerso il carattere tipicamente omogeneo della precipitazione totale media associata al cluster C2 e calcolata nel settore est. Difatti, il coefficiente di variazione nel settore est è risultato basso ($CV \sim 100\%$) quindi la precipitazione totale è stata rilevata da molte stazioni vicine tra loro con un valore totale della pioggia cumulata di circa 506 mm (Figura 3.26.b).

In base ai risultati, si può ipotizzare che un fenomeno di precipitazione così intensa possa essere legata solo alla forzante sinottica e alla stagionalità tipicamente invernale in cui si è verificata. Il mare sembra non aver avuto un ruolo nello sviluppo del ciclone in quanto i valori medi della temperatura del mare risultano bassi rispetto ai restanti mesi dell'anno.

Inoltre, l'area in cui è stata registrata la precipitazione è situata sottovento rispetto ai flussi provenienti da est. Si può quindi ipotizzare che la forzante orografica non sia stata determinante nell'intensificazione della convezione; eventuali effetti alla microscala, che possano aver dato un

contributo, non stati tenuti in considerazione in quanto non possono essere apprezzati con dati di rianalisi ERA5.

3.6 Limitazioni delle analisi

Il lavoro di tesi si è posto come obiettivo lo studio dei cicloni che si sono verificati dal 1951 al 2009 durante i quali almeno una stazione ha registrato una precipitazione al suolo superiore ai 200 mm in un giorno. Una limitazione di questo studio è legata alla scelta della soglia che, come introdotto nei metodi, nasce da una valutazione di tipo empirico. Si è scelto un compromesso tra l'esigenza di concentrarsi su eventi particolarmente intensi o estremi e la numerosità del campione di cicloni disponibili con caratteristiche bariche simili. Non può essere escluso che altre soglie possano portare a frequenze delle caratteristiche bariche diverse da quelle trovate. L'analisi della dinamica dei cluster non dipende però da tali scelte ed è pertanto da ritenersi un risultato generale.

Una seconda limitazione è legata all'esclusione dallo studio dei cicloni inclusi nel gruppo C3. Per definizione stessa di cluster introdotta nei metodi, il gruppo C3 non presenta al suo interno cicloni con configurazioni bariche simili e risulta meno popolato di dati rispetto ai cluster C1 e C2. Per questo motivo non è stato oggetto dello studio; anche i cluster misti non sono stati considerati nello studio in quanto è stata considerata solo la precipitazione associata a cluster che mantengono le stesse configurazioni bariche per tutta la durata dell'evento, dove con evento si intende inizio e fine della precipitazione.

Infine, vi sono limitazioni legate all'utilizzo dei dati di rianalisi. Infatti, l'estensione della classificazione in cluster, dal 1951 al 1959 e dal 2000 al 2009, si basa su dati di rianalisi ERA5 a una risoluzione di $0.25^\circ \times 0.25^\circ$; una tale risoluzione non consente però lo studio di fenomeni alla mesoscala e alla microscala, inclusi i fenomeni convettivi che tipicamente generano precipitazioni intense e con durate brevi. Le variabili ricavabili dal profilo di temperatura e umidità che possono fornire ulteriori elementi di analisi dal punto di vista termodinamico e dinamico come CAPE, LCL e LFC, non sono stati oggetto dello studio proprio perché non sufficientemente apprezzabili con i dati di rianalisi ERA5.

Anche nello studio degli eventi significativi, non si sono potuti valutare eventuali processi dinamici legati all'orografia che possano aver dato un contributo significativo alla convezione. I modelli che possono risolvere esplicitamente gli effetti orografici sulla convezione sono modelli convection-permitting aventi risoluzione sotto i 5 km, che non sono stati oggetto di questo studio.

4 Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono stati presentati i risultati ottenuti dall'analisi dei cicloni suddivisi in cluster per il periodo dal 1951 al 2009 a cui sono associate precipitazioni intense oltre i 200 mm/giorno.

L'estensione della classificazione in uso ad ARPAS dal 1951 al 1959 e dal 2000 al 2009 ha permesso di verificare, tramite l'analisi statistica e sinottica, se vi sia una stagione in cui questi cicloni si verificano con più frequenza, il valore della precipitazione media totale associata ai cicloni durante tutto il periodo in cui questi permangono sulla Sardegna o nelle sue vicinanze e la sua distribuzione spaziale per valutare se vi siano delle zone più soggette a fenomeni di precipitazione intensa e se siano presenti degli elementi comuni nelle varie configurazioni sinottiche e termodinamiche associate.

Per il periodo di studio, compreso tra il 1951 e il 2009, i risultati ottenuti per la stagionalità dei cluster, mostrano che i cicloni appartenenti ai cluster C1 e C2 si verificano più frequentemente durante il mese di ottobre e novembre, durante i quali si hanno rispettivamente 15 e 21 giornate di precipitazione sopra la soglia di 200 mm, la cui durata più frequente in assoluto è pari a un giorno con 4 giornate per il cluster C1 e 5 giornate per il cluster C2. Perciò, non è risultata nessuna regolarità nella durata dei cicloni: vi è stato un solo caso in cui un ciclone appartenente al cluster C2 è durato 4 giorni (15-18 ottobre 1951, in occasione dell'alluvione di Gairo).

Anche nella frequenza decennale dei cluster C1 e C2 non è emersa alcuna regolarità.

L'analisi statistica sulla precipitazione media totale areale associata ai cluster C1 e C2, porta a risultati differenti tra il settore est e quello ovest in cui questa viene misurata.

In base ai risultati, la precipitazione totale media areale associata ai cluster C1 e C2, risulta superiore a 50 mm con più frequenza nel settore est rispetto al settore ovest. Nel cluster C1 la precipitazione ha un carattere più omogeneo nel settore est rispetto al settore ovest, dove si osservano più frequentemente eventi a carattere locale mentre nel cluster C2 la precipitazione mostra un carattere quasi omogeneo in entrambi i settori.

Per quanto riguarda lo studio della precipitazione totale areale media limitata ai soli giorni in cui si è superata la soglia dei 200 mm, sono stati ottenuti risultati simili. Si nota, infatti, che in entrambi i cluster viene superata con più frequenza la soglia dei 50 mm nel settore est. Per il cluster C1 la precipitazione totale media ha un carattere più frequentemente omogeneo sul settore est

rispetto al settore ovest, mentre nel cluster C2 la precipitazione ha un carattere quasi omogeneo in entrambi i settori.

Le ricostruzioni dei campi medi delle variabili meteorologiche analizzate per le 7 giornate del cluster C1 e del cluster C2 per il periodo 1979-2009, mostrano delle differenze nella configurazione sinottica tra i due cluster.

Nel cluster C1 si osserva che nell'area compresa tra le isole Baleari e la Sardegna è presente in media un'asimmetria tra il minimo in quota e al suolo, un'evidente avvezione calda nella bassa troposfera sulla Sardegna e un marcato gradiente di temperatura sulla superficie isobarica a 850 hPa nel mar di Sardegna. Nella stessa area si osserva una rotazione dei venti in senso orario con la quota, accompagnata da alti valori di vorticità potenziale superiori a 3 PVU e bassi valori di umidità relativa tra 40 e 45% sulla Penisola Iberica.

Al contrario, nel cluster C2 l'area in cui si sviluppano in media gli eventi associati a questo tipo di cluster è compresa tra la Tunisia e il canale di Sardegna in cui i minimi in quota e al suolo sono in media in asse o lievemente decentrati; è presente un'avvezione calda sulla Sardegna anche se con temperature più basse rispetto al cluster C1 e i gradienti di temperatura sono meno marcati nell'area in cui si sviluppa il ciclone.

La variazione del vento con la quota è presente anche se in modo meno marcato rispetto a C1, in quanto i venti a tutte le quote subiscono lievi variazioni nella direzione, in media provenienti dai quadranti orientali.

Inoltre, nel cluster C2 si osservano valori di vorticità potenziale che superano 6 PVU con valori di umidità molto bassi compresi tra 20 e 30%.

Sulla base del confronto tra i campi medi di C1 e C2 emerge il carattere baroclinico tipico dei cicloni del cluster C1 e che tende a osservarsi di meno nel cluster C2 dove emerge il contributo legato ad intrusione di aria stratosferica.

Anche dall'analisi della temperatura superficiale media del mare e dell'anomalia di temperatura media attorno alla Sardegna, emergono differenze sostanziali tra il cluster C1 e il cluster C2.

Nel cluster C1, la temperatura superficiale media è elevata nei mesi di maggiore frequenza (ottobre e novembre), con temperature tra 21 e 21.5°C nel mese di ottobre e tra 17.4 e 18°C durante il mese di novembre. L'anomalia positiva media di temperatura superficiale è particolarmente significativa sulla Sardegna e su tutto il Mediterraneo orientale assestandosi su circa 0.6°C ed è altamente rappresentativa, in quanto l'incertezza associata risulta confrontabile con il valor medio.

Per quanto riguarda il cluster C2, anche se si verifica più frequentemente durante i mesi autunnali, vi sono tre casi tipicamente invernali in cui esso si verifica (2 casi a gennaio e uno a febbraio), in cui si osserva un forte gradiente di temperatura superficiale del mare tra le coste della Libia e il mar Tirreno, che è di oltre 4°C. L'anomalia di temperatura media in questo caso risulta poco significativa sulla Sardegna, tra 0.1 e 0.2°C ed è affetta da un'alta incertezza in quanto non confrontabile con il valor medio.

Dal confronto tra i campi medi emergono dei punti in comune tra i due cluster.

Dall'analisi dei campi di geopotenziale medio e MSLP è evidente per entrambi i cluster la presenza di due campi di alta pressione sulle isole Azzorre e sull'Europa centrale e Balcanica, sebbene nel cluster C2 si ritrovino valori più alti al suolo rispetto al cluster C1.

Dal punto di vista della temperatura superficiale media, nei mesi autunnali in cui sia cluster C1 che il cluster C2 si verificano più frequentemente, si osserva che il gradiente di temperatura tra le coste Libiche e il Tirreno è di circa 3°C.

Alla luce dei risultati ottenuti, appare evidente quanto i due cluster associati a fenomeni intensi ed estremi, presentino notevoli differenze sia dal punto di vista della quantità e della distribuzione spaziale della precipitazione totale associata, sia dal punto di vista sinottico che termodinamico. Poiché lo studio si è basato interamente su una classificazione di tipo operativo in uso ad ARPAS, lo sviluppo futuro di questo lavoro può essere visto nell'ottica di una maggiore conoscenza e supporto a fini operativi di previsioni di eventi estremi sulla Sardegna, in particolare nei settori est dell'isola, in cui si è osservato una maggiore frequenza di fenomeni di precipitazione intensa soprattutto nei mesi autunnali.

Bibliografia

Bodini, A., Cossu, Q.A., *Analisi della piovosità in Ogliastra (Sardegna, Italia) nel periodo 1951-1999*, 2008.

Boi, P., and Marroccu, M., *Frequency, seasonal dependence and synoptic scale patterns of cyclones associated to very intense rainfall on Sardinia Island*, Geophysical Research Abstracts Vol. 1, 2011.

Chessa, P., Delitala, A.M.S., Cesari, D., *Mesoscale Precipitation and Temperature Regimes in Sardinia (Italy) and their Related Synoptic Circulation*, Theoretical And Applied Climatology, Springer-Verlag, 1999.

Cossu, Q.A., De Waele, J., Di Gregorio, F., *Coastal karst geomorphosites at risk? A case study: the floods of 6–11 December 2004 in central-east Sardinia*, 2007.

Cossu, Q.A., Bodini, A., Martina, M.L.V., *Vulnerability assesment of Sardinia (Italy) to extreme rainfall events*, “Flash Flood and Pluvial Flooding, 26th-28th May 2010, Cagliari, Italy, European Commission-WFD Common Implementation Strategy. WG F Thematic Workshop on Implementation of the Flood Directive 2007/60/EC.

Dameris, M., *Tropopause*, Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition, Vol. 5, Elsevier, 2015, pp 269, 270.

Formentini, G., Gobbi, A., Griffa, A., Randi, P., *Temporali e Tornado*, Alpha Test, 2012, cap. 10.7

Gumbel, E.J., *Statistics of Extremes*, Columbia Univ. Press, 1958, New York.

Hartmann, D., *Global Physical Climatology*, Elsevier, 2nd ed., 2016, p.195.

Holton, J.R., *Stratosphere / Troposphere exchange and structure*. Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition, Vol. 5 Elsevier, 2015, pp 257-258.

Holton, J.R., et al. 1995. *Stratosphere-troposphere exchange*, American Geophysical Union, 1995

Hoskins, B.J., James, I.N., *Fluid Dynamics of the Midlatitude Atmosphere*, John Wiley & Sons 2014, p.180.

La Rocca, T.F.A., Troisi, A., Bove, R., *Manuale di meteorologia sinottica*, CNMCA, Pratica di Mare, 2006, capp. 1-6.

Serra, A., Sollai, A., *Pluviometric pattern of the island of Sardinia with the regard to extreme precipitation related to meteorological and climatological conditions*, Il Nuovo Cimento, Vol. 13 C, N.4, 1990.

Stull, R. *Practical Meteorology, An algebra-based Survey of atmospheric science*, 2017, pp. 267

Talley, L.D, Pickard, G.L, Swift, J.H, *Descriptive Physical Oceanography, An Introduction*, Elsevier, 6th Edition, 2011, p.33.

Wallace, J.M. and Hobbs, P.V, *Atmospheric science an introductory survey*, 2nd Ed., Academic Press, 2006, pp. 69.

Wells, N., *The Atmosphere and Ocean: a physical introduction – 3rd ed.*, John Wiley& Sons, Ltd, 2012, pp. 79-81.

World Meteorological Organization (WMO). *Atmospheric Ozone. Assessment of our understanding of the processes controlling its present distribution and change. Global ozone research and monitoring project*, Report No. 16, Vol. 1, Cap. 5, 1985, pp. 152-153.

World Meteorological Organization (WMO). *Definition of the tropopause*, *Bulletin of the World Meteorological Organization*, Vol. 6,1957, pp.136–137.

Ringraziamenti

In quest'ultima pagina desidero ringraziare i miei genitori. Mi sono sempre stati accanto, anche se a distanza, e il loro sostegno mi ha permesso di raggiungere il mio obiettivo.

Grazie a Diego per la costante presenza in ogni fase di questa avventura bolognese, per le nostre scoperte nella città di Bologna, per la musica e per i viaggi all'avventura per le città d'arte.

Vorrei ringraziare Sofia per tutte le tisane e le chiacchierate infinite nelle nostre stanze della residenza universitaria, per la musica e i libri scoperti e condivisi assieme, per i racconti sulle nubi e sulla medicina, per la stima e il grande affetto che ha sempre per me.

Ringrazio la dott.ssa Pilia, per avermi dato gli strumenti migliori per affrontare le difficoltà e dare una svolta al mio percorso fuori dalla Sardegna.

Un sentito ringraziamento va al prof. Vincenzo Levizzani, per le conoscenze che mi ha trasmesso durante il corso di Fisica delle Nubi, per la gentilezza e la disponibilità che mi ha sempre dimostrato durante tutto il mio percorso, dandomi sin dagli inizi l'opportunità di portare avanti un lavoro a me molto caro.

Ringrazio il dott. Francesco Marra e il dott. Giulio Monte, per i loro consigli e insegnamenti con cui hanno arricchito profondamente le mie conoscenze, per la loro disponibilità, gentilezza e puntualità con cui abbiamo sempre interagito durante questi mesi.

Ringrazio l'ARPA Sardegna, in particolare il dott. Paolo Boi per i suggerimenti, i consigli e per aver cortesemente fornito i dati di precipitazione e la classificazione dei cicloni, fornendo un contributo importante per la realizzazione di questo lavoro.

Infine, un ringraziamento particolare va alla dott.ssa Elsa Cattani per i suoi utili suggerimenti durante la stesura del lavoro di tesi, a tutto il gruppo di ricerca del CNR-ISAC di Bologna e alla facoltà di Fisica del Sistema Terra per avermi dato la possibilità di realizzare il mio sogno di portare avanti i miei studi nell'ambito delle scienze atmosferiche.