



Università degli Studi di Udine

Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali

Corso di laurea in

Scienze per l' Ambiente e la Natura

TESI DI LAUREA

ANALISI STATISTICA DELLE PRECIPITAZIONI NEVOSE SULL'AREA MONTANA DELLA REGIONE FRIULI VENEZIA GIULIA

Relatore

Chiar.mo Prof. Paolo Ceccon

Laureando

Nicola Carlon

Correlatore

Chiar.mo Prof. Federico Cazorzi

Anno Accademico 2014/15

Indice

1. INTRODUZIONE.....	p 5
1.1 Cenni sul clima del Friuli Venezia Giulia.....	p 5
1.2 Genesi della precipitazione nevosa.....	p 8
1.3 Tipologie di precipitazione nevosa.....	p 9
1.4 Fenomeno dello Stau – Foehn.....	p 10
1.5 Il limite della nevicata.....	p 12
1.6 Configurazioni sinottiche in grado di generare precipitazioni nevose su Alpi e Prealpi Friulane.....	p 14
1.6.1 Depressioni atlantiche.....	p 15
1.6.2 Fronti nordatlantici.....	p 16
1.6.3 Fronti provenienti dal nord o nord-est Europa.....	p 16
1.6.4 Gocce fredde continentali.....	p 16
1.7 Cambiamenti climatici; osservazioni a livello globale.....	p 17
1.8 Evidenze dei cambiamenti climatici in Friuli Venezia Giulia.....	p 18
1.9 Prospettive future.....	p 21
1.10 Analisi statistica degli eventi nivologici.....	p 22
1.11 Obiettivi dell’elaborato.....	p 25
2. MATERIALI E METODI.....	p 26
2.1 Dati climatici.....	p 26
2.2 Metodologia.....	p 26
3. RISULTATI E DISCUSSIONE.....	p 31
3.1 Numerosità e ampiezza temporale delle serie storiche di precipitazione nevosa.....	p 31
3.2 Analisi dei dati elementari.....	p 32
3.2.1 Calcolo delle statistiche descrittive.....	p 32
3.2.2 Regressione lineare e test di Mann – Kendall sull’intera serie storica di dati....	p 38
3.2.3 Regressione lineare e test di Mann – Kendall per i dati dal 1990 al 2014.....	p 43
3.2.4 Omogeneità dei dati; test di Pettitt.....	p 44
3.3 Analisi dei quantili di Gumbel.....	p 45
3.4 Geostatistica.....	p 48

4. CONCLUSIONI.....	p 53
5. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	p 55

1. INTRODUZIONE

1.1. Cenni sul clima del Friuli Venezia Giulia

Il clima del Friuli Venezia Giulia risulta essere molto vario in relazione alla morfologia del territorio e la posizione occupata nel continente europeo. All'interno di un'area di dimensioni relativamente contenute si riscontra infatti la coesistenza di climi di tipo mediterraneo, continentale, di transizione e alpino.

➤ **Temperatura**

La regione complessivamente presenta un clima piuttosto mite. Si registrano i valori medi annui più elevati lungo la fascia costiera (compresi tra 14.5 e 15.5° C), leggermente più bassi in pianura (compresi tra 13 e 14° C). Per la zona montana e collinare risulta difficile calcolare una temperatura media che accomuni diverse località poiché la variabilità climatica lo impedisce.

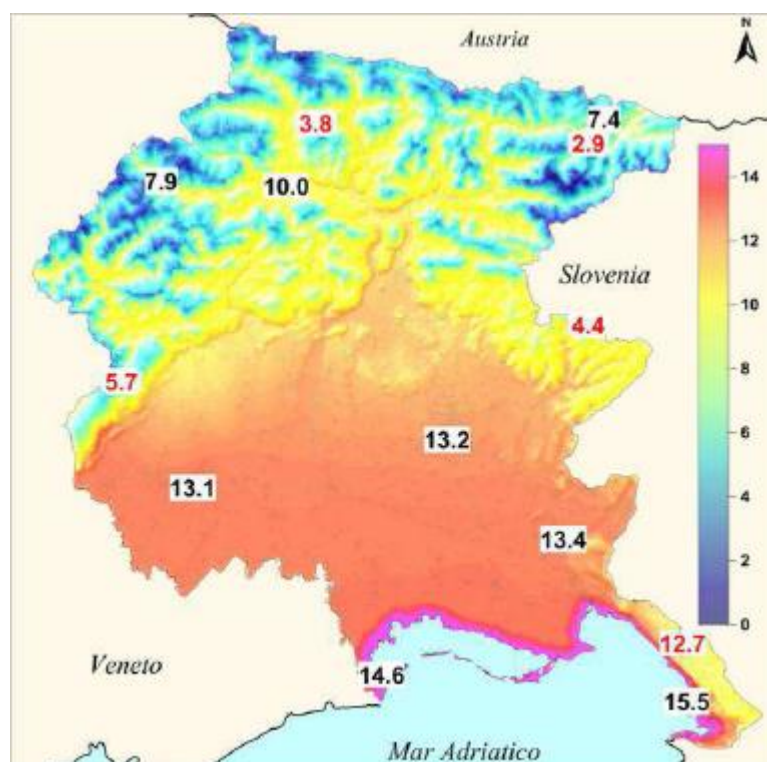


Figura 1. Temperature medie annue misurate dalla rete OSMER nel ventennio 1993-2013 (fonte: OSMER)

La temperatura, come del resto le altre variabili meteorologiche, variano molto in relazione all'esposizione e all'orientamento delle catene montuose e delle valli. In generale, durante tutto l'anno sulla regione non si registrano particolari eccessi. Le estati risultano calde, ma le temperature massime

in pianura raramente superano i 32-33° C e, specie lungo la costa, le calde giornate vengono mitigate da venti di brezza. Anche l'inverno non risulta particolarmente freddo, con temperature minime che difficilmente raggiungono valori inferiori a -5° C in pianura. Per quanto riguarda il settore montano, le Alpi Giulie vedono sicuramente un clima più continentale rispetto alle Carniche, con minime invernali a volte molto rigide, anche di molto inferiori a -15° C a fondovalle.

➤ **Precipitazioni**

La caratteristica principale del clima regionale è l'elevata piovosità annuale, sia in termini di frequenza che di intensità. Esaminando la media delle precipitazioni annue si possono distinguere quattro fasce:

- fascia costiera: è la zona meno piovosa della regione, con una media annua di 900-1000 mm;
- fascia di pianura, con una media annua compresa tra 1200 e 1800 mm; i valori più bassi sono relativi alla bassa pianura mentre quelli più elevati all'alta pianura;
- fascia prealpina: i valori medi annui variano tra 2700 e 3200 mm e risultano essere dei valori record a livello italiano ed europeo; Il dato di 2700 mm è riferito alla fascia prealpina occidentale (Piancavallo), mentre i 3200 mm a quella orientale (Musi);
- fascia delle Alpi interne: a causa dello sbarramento prealpino, si riscontrano valori medi più bassi rispetto alle Prealpi, che si attestano intorno ai 1400-1600 mm annui.

Durante l'anno le piogge sono generalmente ben distribuite, con massimi in primavera e in autunno. Il mese invernale più asciutto risulta essere febbraio, mentre luglio è il più arido tra i mesi estivi. La stagione autunnale risulta essere la più piovosa dell'anno con valori massimi a novembre, quando la media nella fascia costiera è di circa 100 mm mentre, nelle zone interne, il massimo spetta a Ucea, dove mediamente si registrano 400 mm. Per quanto riguarda l'intensità dei fenomeni, spesso la regione è soggetta a piogge intense specie sulle fasce pedemontane e prealpine a causa dello sbarramento costituito dalle Prealpi stesse ai venti meridionali. Si sono registrati in passato valori mensili molto elevati (fino a 300-400 mm sulla costa e 1200 mm sulle Prealpi), con valori giornalieri anche superiori ai 500 mm, come avvenuto a Oseacco, nelle Prealpi Giulie, il 14/11/1969 e a Barcis, nelle Prealpi Carniche, il 2/9/1965. Date le premesse numerose sono anche le giornate piovose in un anno. Tale valore oscilla tra 90 e 120 giorni, rispettivamente sulla costa e sulla zona pedemontana e montana. Nel periodo invernale il numero di giorni piovosi è simile in tutti i settori e normalmente si attesta intorno a 6-7 giorni. Negli altri mesi dell'anno, invece, spesso a causa della natura convettiva dei fenomeni, si hanno valori più bassi lungo la costa e più alti nella fascia montana.

Un altro elemento caratteristico del clima regionale sono i temporali, che risultano particolarmente frequenti nella stagione estiva. Le Alpi friulane, infatti, sono piuttosto basse e consentono l'infiltrazione dall'Europa centrale di aria fresca e umida in quota capace di provocare l'innescio di fenomeni convettivi. Annualmente si contano circa 40-45 giorni con temporali in pianura, la metà sulla costa. Spesso questi temporali risultano anche di forte intensità, con violente grandinate e trombe d'aria. Ogni anno si registrano circa 6-7 fenomeni violenti concentrati prevalentemente nell'alto pordenonese, nell'alto udinese e lungo la costa, soprattutto nel periodo marzo-novembre, con un massimo ad agosto. Possono accadere durante tutto l'arco della giornata, ma la massima frequenza si riscontra nel tardo pomeriggio.

Al contrario, la neve risulta essere un fenomeno meteorologico piuttosto raro nelle zone di pianura e di costa. I valori medi annui, infatti, parlano di 3 cm in 3 giorni lungo la costa e di 4 cm in 4 giorni sulla pianura. Spostandosi verso nord si incontrano i primi rilievi e si osserva un rapido incremento delle precipitazioni nevose. I valori massimi, come vedremo, si riscontrano sulle Alpi Giulie dove si registrano, a una media a 1500 m di quota, 500 cm annui.

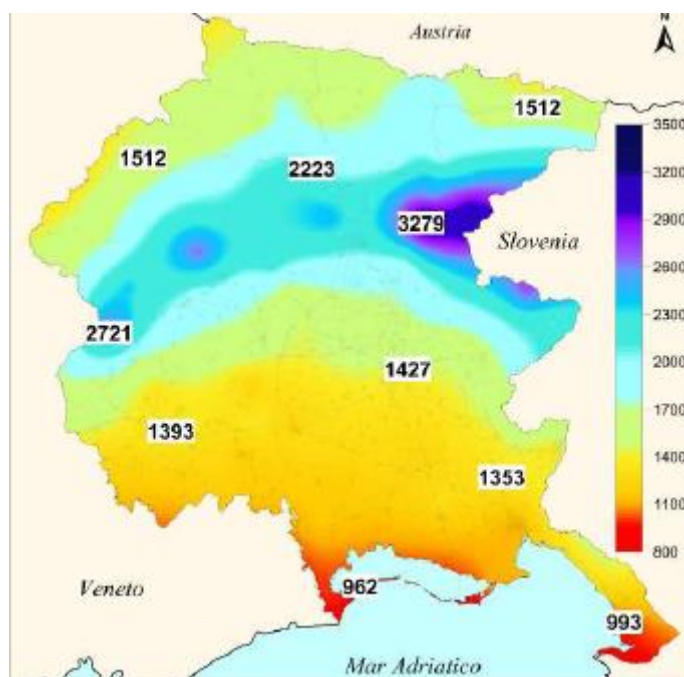


Figura 2. Precipitazioni medie annue calcolate nel periodo 1961 – 2013 (fonte: OSMER)

➤ Ventilazione

La direzione e intensità del vento al suolo è determinata prevalentemente dalle condizioni morfologiche del territorio. La presenza della catena alpina rende predominante il vento da est-nord est sia sulla pianura che lungo la costa. Nell'area montana i venti, come del resto anche le altre variabili meteorologiche, sono determinate soprattutto dalle condizioni morfologiche locali, rendendo difficile ogni generalizzazione. Oltre al vento orientale, le brezze sono il secondo elemento

caratterizzante della ventilazione regionale. Importanti però risultano essere i venti sinottici che soffiano prevalentemente da nord-est anche se non mancano episodi con venti settentrionali di Tramontana o meridionali di Scirocco. In particolare, la Bora è il principale vento dominante orientale e può raggiungere in provincia di Trieste valori anche superiori ai 40 m/s, prevalentemente nel periodo invernale; non mancano tuttavia episodi estremi anche durante l'estate, seppur di intensità più modesta.

1.2. Genesi della precipitazione nevosa

Il fiocco di neve ha origine all'interno di nubi fredde (altostrati o nembostrati), aventi una temperatura inferiore allo zero. Solo all'interno di queste nubi, intorno a impurità costituite da nuclei glaciogeni¹, per sublimazione inversa, il vapore acqueo sfuggito alle droplet² di nube si coagula formando dei piccoli cristalli di ghiaccio. I nuclei glaciogeni sono più rari rispetto ai nuclei di condensazione³ e risultano più attivi a temperature inferiori ai -10° C. All'interno di una nube la massima concentrazione di cristalli di ghiaccio si ritrova a temperature comprese tra -12 e -17° C e a temperature inferiori, caratteristiche di quote più elevate, poiché nella medio-alta troposfera le impurità divengono via via più rare. A queste quote, infatti, la formazione dei cristalli è affidata al congelamento spontaneo delle droplet di nube: a temperature inferiori a -40° C tutte le goccioline di vapore acqueo presente congelano.

Se all'interno della nube l'aria è sovrassatura, il cristallo comincia a crescere sottraendo vapore all'ambiente circostante; questo processo è tuttavia di breve durata, perché in poco tempo non si ha più vapore a disposizione. Il cristallo, diventato leggermente più pesante, comincia a scendere di quota arrivando nello strato di nube caratterizzato da temperature comprese tra -10 e 0° C, dove è presente una grande quantità di droplet soprafuse che alimentano la crescita del cristallo. Nella discesa, grazie anche ai moti turbolenti presenti all'interno della nube, il cristallo collide con le droplet le quali si congelano all'istante andando ad ingrossare ulteriormente il cristallo. Quando il cristallo, o meglio, il fiocco di neve non è più sostenuto dai moti turbolenti cade al suolo per effetto del proprio peso. Le modalità di accrescimento del cristallo, e quindi la sua forma finale, dipendono dalle

¹ Nuclei attivi a temperature inferiori allo zero che agevolano la formazione di cristalli di ghiaccio

² Piccole gocce all'interno della nube generate da vapore eccedente; nella salita le masse d'aria si raffreddano raggiungendo la saturazione. Qualora la salita prosegua si assiste ad un ulteriore raffreddamento e l'unione delle molecole di vapore eccedente che generano piccole goccioline di nube chiamate droplet. In realtà l'unione delle molecole vapore non è così semplice ed è legato alla presenza di nuclei di condensazione (costituiti da polveri di varia origine) di dimensioni da 0.1 a 4 micron

³ Nuclei attivi a temperature positive costituiti da microparticelle di varia natura fortemente igroscopiche che favoriscono la formazione di piccole gocce in seguito alla condensazione del vapore acqueo

condizioni di temperatura e umidità dell'atmosfera e non dalla forma del germe⁴ iniziale, che in partenza è sempre riconducibile ad un prisma esagonale.

1.3. Tipologie di precipitazione nevosa

A seconda delle condizioni fisiche dei vari strati dell'atmosfera possono generarsi le diverse tipologie di precipitazione nevosa di seguito elencate.

- Neve: è un composto eterogeneo costituito da acqua e aria, formato da cristalli di diverse dimensioni e forma legati tra loro. Un fiocco di neve è perciò un grappolo di cristalli con diametri che variano da 0,5 a 5 o più centimetri. Maggiore è la quantità di vapore acqueo all'interno della nube, maggiore è la grandezza del fiocco di neve.
- Cristalli di ghiaccio: si formano in zone molto fredde, con temperature al suolo inferiori ai -12° C e perciò contraddistinte dalla bassa umidità; hanno forma a piastrina, ago o colonna.
- Gragnola o Groupel: si tratta di palline di ghiaccio a bassa densità che si formano quando particelle di ghiaccio cadono nella parte di nube a temperature comprese tra 0 e -10° C: qui le piccole gocce di vapore ghiacciano al contatto con le particelle di ghiaccio formando una pallina dall'aspetto opaco. E' un tipo di precipitazione legata generalmente a fenomeni convettivi e quindi si ritrova più frequentemente in autunno e in primavera; può verificarsi anche con temperature al suolo positive.
- Neve tonda: si forma quando un fiocco di neve passa attraverso uno strato con temperatura superiore allo zero per poi raggiungere uno strato sottostante a temperatura nuovamente negativa. Nello strato a temperatura positiva la parte più esterna del fiocco di neve fonde per poi ghiacciare nuovamente nel sottostante strato più freddo. Si formano così, come nel caso della gragnola, delle palline rotonde che tendono a rimbalzare a contatto con il suolo.
- Grani di ghiaccio: sono una tipologia di precipitazione solida in cui gocce di pioggia o pioggia mista a neve congelano attraversando uno strato atmosferico più freddo. La caratteristica che li distingue dalla neve tonda e dalla gragnola è l'assenza del nucleo. Spesso sono legati a fenomeni di pioggia congelante.
- Nevischio: si tratta di una miscela costituita da neve e gocce di pioggia parzialmente ghiacciate con residue tracce di cristallizzazione. E' il risultato di una incompiuta fusione della neve durante la caduta. Spesso la sottrazione del calore ambientale per la fusione può raffreddare lo stesso strato caldo fino a tal punto che la neve non riesce più a sciogliersi. La mancata fusione può dipendere da uno strato atmosferico caldo ma non sufficientemente spesso o non sufficientemente

⁴ detto anche nucleo glaciogeno.

caldo, oppure da uno stato caldo sottile seguito da uno strato freddo a temperatura uguale o inferiore allo zero. Con questo stesso meccanismo si forma la neve tonda. Spesso però si confonde il nevischio con una nevicata molto leggera o dai fiocchi molto piccoli, un evento tipico delle neviccate da Stau nel caso in cui la massa d'aria sollevata sia di partenza molto fredda e quindi poco umida.

1.4. Fenomeno dello Stau – Foehn

Questo fenomeno si verifica quando una massa d'aria sufficientemente umida viene spinta dal vento contro un rilievo; è costretta perciò a sollevarsi di quota espandendo il proprio volume e raffreddandosi. Così facendo perde in parte la capacità di trattenere vapore acqueo che perciò condensa e dà origine a precipitazioni. Questo processo prende il nome di “Stau”, che in tedesco significa proprio sbarramento. Come accennato in precedenza, nella salita la massa d'aria si raffredda e perde circa 1°C ogni 100 metri fino al punto in cui comincia a verificarsi condensazione. Da qui in su, a causa della liberazione del calore latente di condensazione, la temperatura cala di circa 0.5°C ogni 100 metri e non più 1°C come in precedenza. Una volta superata la cima la massa d'aria normalmente non è più in grado di produrre precipitazioni. A questo punto scende sul versante opposto (sottovento) seguendo un moto turbolento e incontrando via via strati di aria più densa riscaldandosi perciò per compressione. Tuttavia nelle prime fasi della discesa l'aria, ancora satura di vapore acqueo, si riscalda di 0.5°C ogni 100 metri per intervento del calore latente di evaporazione. Una volta che tutta l'acqua liquida contenuta è evaporata, e di conseguenza le nubi si sono dissolte, la temperatura aumenta di 1°C ogni 100 metri seguendo il gradiente adiabatico secco. Poiché però questa fase parte da una quota superiore rispetto al versante sopravvento, alla base della montagna, a una certa distanza dal versante, la temperatura sarà più alta alla base del versante sottovento rispetto a quello sopravvento. Questo fenomeno di surriscaldamento per compressione delle masse d'aria prende il nome di Foehn mentre il limite in cui le nubi si dissolvono e non si hanno più precipitazioni viene chiamato in gergo “muro del Foehn”.

Più risulta alta una montagna, maggiore è la forza del vento e più il vento presenta una direzione ortogonale alla catena montuosa più i due processi di Stau, nel versante sopravvento, e di Foehn, nel versante sottovento, sono accentuati. Spesso infatti nelle regioni occidentali italiane, dove le Alpi superano anche i 4000m, può accadere che le temperature massime in pieno inverno superino i 20°C sulle pedemontane e sulle pianure limitrofe.

Inoltre, a causa dell'aumento di pressione sul versante sopravvento, su quello sottovento si creerà un campo di bassa pressione; tanto è maggiore la differenza di pressione tanto più forte sarà il vento di Foehn.

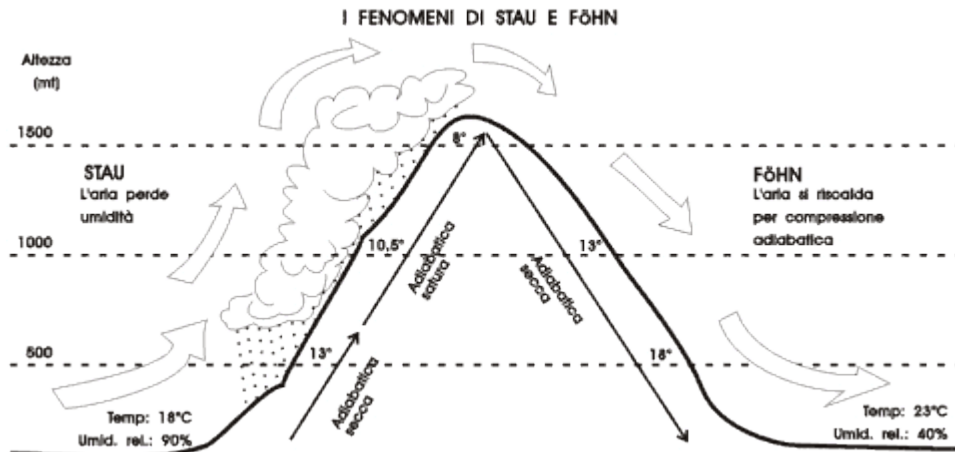


Figura 3. Descrizione schematica del fenomeno di Stau – Foehn (quest’ultimo anche chiamato Föhn)

Ovviamente in entrambi i versanti di una montagna, in tempi diversi, possono avvenire sia fenomeni di Stau che di Foehn.

Nella figura 4 è rappresentata l’immagine satellitare del fenomeno di Stau-Foehn avvenuto il 4 gennaio 2015 sulle Alpi.

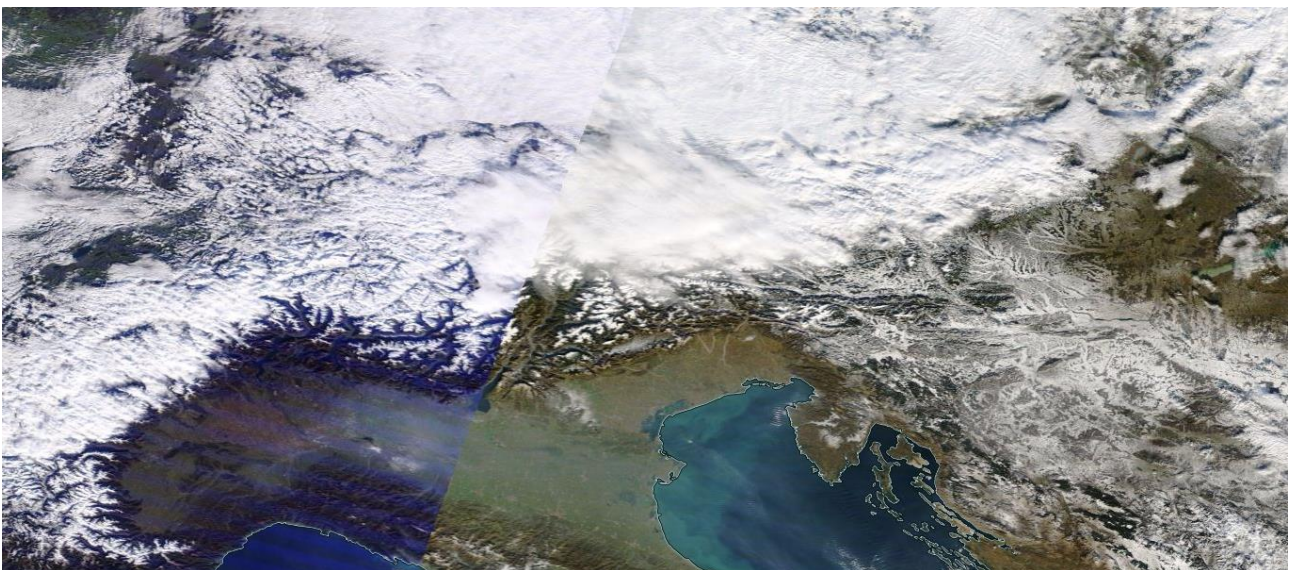


Figura 4. Fenomeno di Stau – Foehn avvenuto il 4 gennaio 2015 visto da satellite. Si noti la folta coltre di nubi addossate alle Alpi nel versante austriaco e la totale assenza di nuvolosità su tutto il nord Italia.

Come si può osservare sui versanti austriaci è presente una consistente copertura nuvolosa che si esaurisce sul confine con l’Italia. Quel giorno infatti, in seguito alla discesa di una massa d’aria fredda di origine polare in movimento dalla Scandinavia verso i Balcani, si sono registrate nevicate da stau sul settore meridionale dell’Austria mentre nelle fasce pedemontane e nelle vallate alpine della nostra

regione si sono registrati venti di Foehn fino a 50-60 km/h, con temperature fino a 15-16°C, valori considerevoli per il mese di gennaio.

1.5. Il limite della nevicata

Il limite della nevicata corrisponde alla quota in cui prevale, per oltre il 90%, precipitazione nevosa e, contrariamente a ciò che si pensa, non corrisponde alla quota in cui si registra accumulo al suolo; tale quota infatti generalmente è superiore a quella del limite della nevicata.

Essa dipende da diversi fattori, quali:

- dipendenza dallo zero termico: si definisce zero termico la quota al di sopra della quale la temperatura è costantemente inferiore a 0° C. Questa quota deve essere misurata nella libera atmosfera, cioè in una zona lontana da monti o versanti;
- dipendenza dall'intensità e durata della precipitazione: il limite della nevicata normalmente si attesta su quote inferiori rispetto all'altezza dello zero termico e ciò è in stretta correlazione con l'intensità della nevicata:
 - durante precipitazioni deboli (1-3 mm/h) il limite è più basso di 200-300 metri;
 - durante precipitazioni moderate (3-5 mm/h) il limite è più basso di 400-500 metri;
 - durante precipitazioni intense (>5 mm/h) il limite è più basso di 600-700 metri;
 - durante precipitazioni temporalesche a quote anche più basse.

Questo si verifica poiché il fiocco di neve cadendo arriva sotto la quota di zero termico e perciò comincia a fondere. Tuttavia, la fusione della neve assorbe il calore presente nell'aria, la quale perciò si raffredda; questo calore prende il nome di calore latente di fusione. Gradualmente dunque la temperatura al di sotto dello zero termico diminuisce e di conseguenza il limite della nevicata si abbassa. Quanto più intensa è la nevicata e quanto maggiore è la quantità totale di neve caduta, tanto più rapido è il processo di raffreddamento. Perciò, al di sotto dello zero termico si viene a creare una zona di isoterma spessa diverse centinaia di metri a patto che non vi siano moti turbolenti che rimescolino gli strati. Affinché tutto ciò accada, anche l'intensità della precipitazione deve rimanere costante almeno per qualche ora; in caso di attenuazione il limite tenderà rapidamente ad alzarsi;

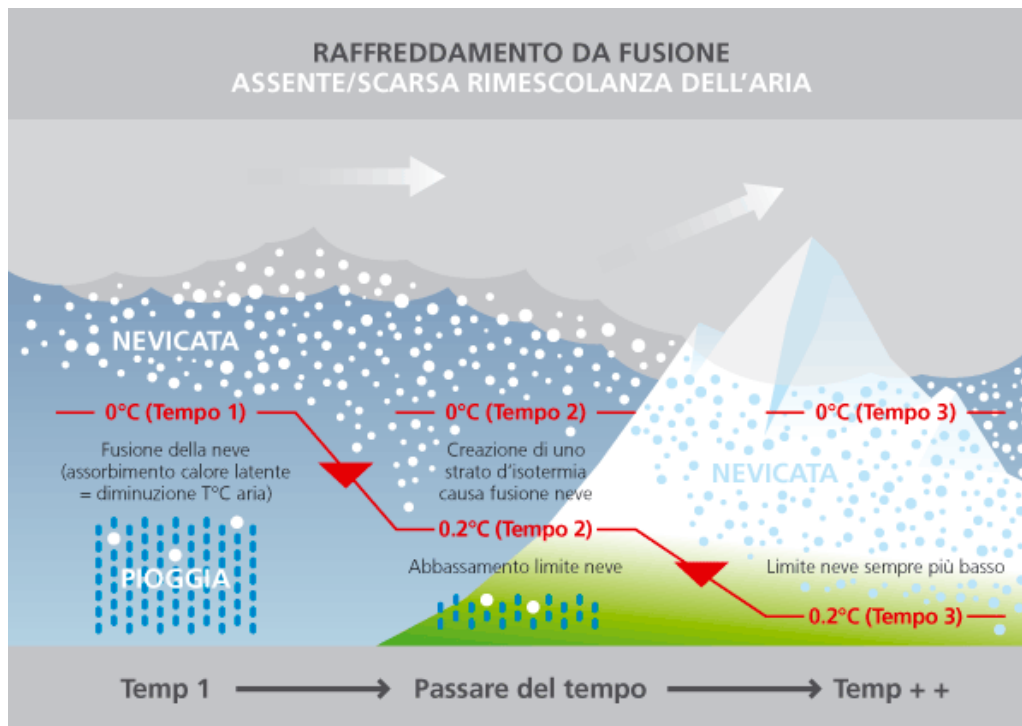


Figura 5. Rappresentazione schematica dell'abbassamento del limite della nevicata con il trascorrere del tempo in assenza di moti turbolenti.

- dipendenza da eventuali inversioni termiche: la presenza di inversioni termiche, cioè di situazioni in cui sono presenti masse d'aria fredda in prossimità del suolo e masse d'aria più calda in quota, può annullare quanto detto finora in merito alla relazione tra il limite della nevicata, lo zero termico e l'intensità della precipitazione. Infatti se si vengono a formare strati caldi (a temperature positive) molto spessi, il fiocco di neve, nella caduta, fonderà completamente e, qualora in seguito, incontri strati nuovamente a temperature negative sussiste il serio rischio di gelicidio (anche chiamata pioggia congelante). Lo spessore di aria calda che i fiocchi di neve sono in grado di superare senza fondere può arrivare al massimo a quello di discesa della neve sotto lo zero termico. Perciò una nevicata di debole intensità sarà in grado di superare, senza fondere, uno strato caldo di 200-300 metri, una di moderata intensità uno strato di 400-500 metri e così via. Spesso situazioni di inversioni termiche piuttosto diffuse si verificano dopo l'arrivo di una massa d'aria di origine continentale fredda, secca e perciò densa; in molte valli alpine, soprattutto su quelle interne, vengono a formarsi vaste aree con inversione termica;
- dipendenza dalla conformazione delle valli: nelle valli strette la massa d'aria che la neve deve raffreddare mentre fonde al di sotto dello zero termico è inferiore rispetto ad una valle larga.
- Perciò il limite della nevicata scende più rapidamente e in misura maggiore in una valle stretta rispetto a una valle aperta.

Anche in questo caso tutto ciò è valido nel caso in cui non intervengano moti turbolenti che rimescolino gli strati atmosferici andando a rompere l'isoterma;

- dipendenza dalla posizione geografica, intesa in termini di prossimità della catena alpina interna o esterna e quindi della pianura; spesso infatti le nevicate che si verificano sulla catena alpina avvengono con un flusso di correnti meridionali miti e umide. Se nella massa d'aria le correnti umide si mantengono deboli, le valli più interne non risentono del rimescolamento e conservano più a lungo lo strato di aria fredda. In questo modo, anche se in quota le correnti meridionali risultano più intense, il limite della nevicata può comunque mantenersi fino a fondovalle anche con un generale aumento dello zero termico. Nelle zone più esterne, e perciò prospicienti alla pianura, a causa della diretta interazione con le correnti miti di origine meridionale, gli strati freddi vengono facilmente rimossi e il limite della nevicata rapidamente si alza. In particolare se si ha a che fare con la risalita dall'Adriatico di venti sostenuti di Scirocco le Prealpi venete e friulane vedono intense precipitazioni per Stau con rapido aumento della temperatura e perciò la quota neve risulta essere molto elevata (superiore ai 1500-1800 metri). Al contrario, sulle Prealpi centro-occidentali (a ovest del lago di Garda), essendo il territorio più protetto dal flusso meridionale caldo-umido, le nevicate resistono a quote più basse.

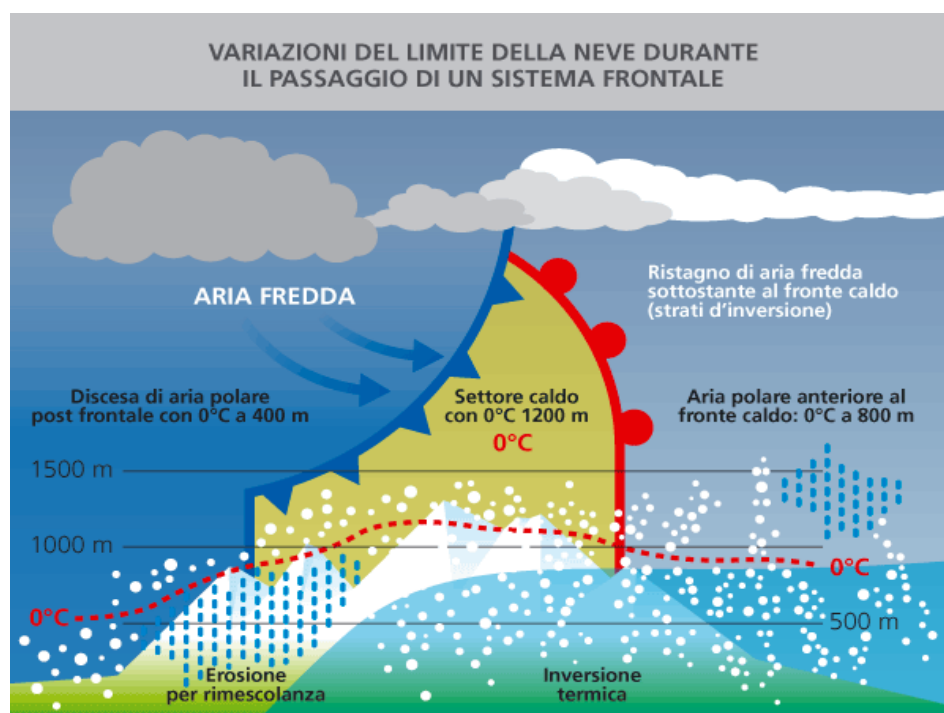


Figura 6. Passaggio frontale con rapido aumento della quota neve sui versanti meridionali più esposti alle correnti da sud che vanno a “scalzare” l’aria fredda presente in prossimità del suolo. Nelle zone interne invece, a causa della protezione della catena montuosa, nonostante l’innalzamento dello zero termico, resiste lo strato di aria fredda nei bassi strati consentendo alla neve di non trasformarsi in pioggia.

1.6. Configurazioni sinottiche in grado di generare precipitazioni nevose su Alpi e Prealpi friulane

1.6.1. Depressioni atlantiche

Le depressioni Atlantiche si generano in aperto Atlantico e procedono verso ovest spinte dalle correnti occidentali in quota. Generalmente, una volta arrivate a lambire le coste europee occidentali, riescono a penetrare nel Mediterraneo seguendo due strade. Qualora la depressione sia poco profonda tenderà ad isolarsi e, in seguito, ad assorbirsi sulle coste della Spagna mentre la parte più attiva presente più a settentrione tenderà a sfilare a nord le Alpi. Nel caso in cui la depressione sia piuttosto profonda, con un carico significativo di aria fredda in quota, tenderà a perdurare anche per molti giorni sul bacino del Mediterraneo spostandosi lentamente da ovest verso est. Le conseguenze che tutto ciò comporta in termini di precipitazioni sulla nostra regione dipendono dall'esatto posizionamento della saccatura. Nel caso in cui la saccatura si posizioni tra il Mediterraneo occidentale e le coste del nord-Africa, sulla regione si attiveranno, a tutte le quote, correnti umide e miti sciroccali con conseguenti abbondanti o intense precipitazioni tra alta pianura, pedemontane, Prealpi e, seppur in quantità inferiore, sulle Alpi. Sul settore montano si registrano perciò abbondanti nevicate ma, a causa dei venti meridionali miti, le quote risultano piuttosto alte, specie sulle Prealpi che in questi casi vedono nevicate solo oltre i 1500-1800m.

Contrariamente, nel caso in cui la depressione penetri più ad oriente, con un asse che va dal mare del Nord al Golfo del Leone, la maggior parte del flusso umido e mite interesserà i Balcani e per quanto riguarda le Alpi, in particolare quelle friulane, verranno interessate da correnti meridionali più fresche legate a fronti perturbati in grado di apportare abbondanti nevicate a quote medio-basse. Spesso, se la saccatura atlantica scende in prossimità delle Alpi cioè dalla valle del Rodano, il contrasto con il mare caldo genera depressioni mediterranee sul Golfo Ligure e, più raramente, sull'alto Adriatico. In questo caso si generano fronti in grado di portare maltempo, anche marcato, con nevicate abbondanti sulla zona montana regionale con maggiori accumuli per Stau sulle Prealpi rispetto alle Alpi interne.

1.6.2. Fronti nord atlantici

Nel caso in cui un fronte freddo provenga dall'Europa nord-occidentale o dall'Atlantico settentrionale, a sud della catena alpina si viene a formare una depressione orografica.

Queste depressioni si originano quando su una estesa catena montuosa vi giungono correnti perpendicolari. Nel versante sopravvento, su cui le correnti andranno a scontrarsi, si verrà a creare un campo di alta pressione mentre nel versante opposto, sottovento, un campo di bassa pressione. Prendendo in considerazione la catena alpina, nel caso in cui giunga un fronte nord-Atlantico, a sud delle Alpi, tra Pianura Padana e Golfo Ligure, si formerà un campo di bassa pressione mentre tra Svizzera e Austria un campo anticiclonico. Nella prima fase di formazione della depressione si

innescheranno venti da sud-ovest miti e umidi che sulla nostra regione apportano maggiore umidità su Prealpi e Alpi Giulie rispetto al settore carnico. Le depressioni orografiche tendono però a spostarsi rapidamente verso sud-est. Infatti una volta formatesi sul mar Ligure, per differenza barica tra la bassa pressione presente a sud e l'alta pressione presente a nord delle Alpi, si innescano, a partire dalle regioni di nord-ovest, venti forti di Foehn che trascinano la depressione stessa verso sud-est. Sui monti della nostra regione perciò, in queste situazioni, le precipitazioni risultano modeste con maggiori accumuli sulle Prealpi Giulie maggiormente interessate dalla correnti umide da sud-ovest. La durata del maltempo e quindi la consistenza degli apporti è comunque condizionata in modo significativo dall'esatto posizionamento dei minimi di pressione sul mar Ligure e dalla loro profondità. In seguito man mano che la depressione si muove verso sud-est aumentano i venti orientali al suolo specie su pianura e costa con annullamento delle precipitazioni a partire proprio dalle Alpi.

1.6.3. Fronti dal nord o nord-est Europa

Questa tipologia di fronti provocano fenomeni simili a quelli già descritti in precedenza per i fronti nord-Atlantici. In particolare un fronte freddo che si avvicina alle Alpi dal nord o nord-est Europa formerà una depressione orografica sul centro Italia. Queste situazioni sono tipiche per l'innescò, anche sulla nostra regione, di venti forti di Foehn forieri di cielo sereno e atmosfera secca. Tuttavia sui versanti alpini settentrionali, quindi di Austria e Svizzera, si vengono a creare le situazioni ideali per abbondanti nevicata da Stau che talvolta possono spingersi, in modo più attenuato, anche sulle Alpi confiniali regionali. In questo caso comunque gli accumuli di neve fresca risultano scarsi e relativi solo a questo settore; nel restante territorio montano regionale non si hanno precipitazioni.

1.6.4. Gocce fredde continentali

Quando le saccature bariche a 500 hPa sono molto strette e allungate in senso meridionale (tipica forma a V), tendono a rompersi nella parte più meridionale (cut-off), isolando vortici di bassa pressione colmi di aria fredda che raggiungono i 9-10 chilometri di altezza e sono noti, in gergo, come "gocce fredde" (Giuliaci et al., 2010). Le gocce fredde non seguono più il flusso principale occidentale ovest-est ma si muovono a zig zag nel continente europeo presentando spesso un "moto retrogrado" est-ovest. Sono situazioni piuttosto comuni che avvengono ogni anno e in tutte le stagioni. Difficilmente però, soprattutto nel periodo invernale, sono in grado di dare origine a precipitazioni sul Friuli Venezia Giulia. Nel caso in cui però una goccia fredda si muova con moto retrogrado procedendo dall'est Europa verso ovest passando sull'alto Adriatico ecco che si possono avere delle

precipitazioni. Come avvenuto il 13 dicembre 2001, una depressione con aria molto fredda e densa al suolo passando sull'alto Adriatico incontra un mare caldo. Si viene a creare perciò una situazione di instabilità con la formazione di rovesci di neve accompagnati da venti molto forti orientali. La neve sommata al forte vento e alle temperature negative origina un fenomeno comune negli USA chiamato "Blizzard". Sulla regione però i fenomeni in questo caso si concentrano sulla fascia prealpina e pedemontana in particolare del pordenonese. Le Prealpi Carniche infatti fanno da barriera ai venti da est generando precipitazioni da Stau. In ogni caso comunque le precipitazioni risultano modeste e concentrate prevalentemente sulle Prealpi Carniche. Il resto del territorio montano vede precipitazioni sporadiche o nulle.

1.7. Cambiamenti climatici; osservazioni a livello globale

Dando per assodato che le variazioni climatiche nel pianeta siano sempre esistite, la maggioranza della comunità scientifica internazionale è concorde nel ritenere che l'uomo sia, almeno in parte, causa dei cambiamenti climatici. E' scientificamente provato che i gas serra abbiano un potere riscaldante variabile a seconda del tipo di gas.

Il più noto tra i gas serra è il biossido di carbonio (CO₂): esso ha un potere riscaldante inferiore rispetto ad altri gas serra, come ad esempio il metano, ma esercita un impatto maggiore sul clima in quanto presente in grandi quantità. Ad oggi la concentrazione di CO₂ in atmosfera ha raggiunto le 400 ppm contro le 280 ppm del periodo preindustriale, un incremento del 40% equiparabile a un aumento della radiazione solare di 1.7 W/m². Le concentrazioni in atmosfera di questo gas, come dimostrano i rilevamenti delle stazioni al suolo, sono in costante aumento seguendo un andamento di tipo esponenziale. Oltre ai gas, serra altre particelle immesse dall'uomo in atmosfera possono alterare il clima, con effetti anche opposti. Gli aerosol, ad esempio, e in particolare gli aerosol solfati, derivati dal biossido di zolfo, determinano un raffreddamento al suolo capace di mitigare gli effetti del riscaldamento globale in quanto riflettono in parte la radiazione solare.

Parallelamente all'aumento dei gas serra si è registrato a livello globale un incremento delle temperature al suolo di 0.78° C nel periodo 1850-2012. In particolare, gli ultimi tre decenni sono stati i più caldi dal 1850 e l'ultimo decennio risulta il più caldo in assoluto. Infine il 2014, è risultato l'anno più caldo. Tutto ciò ha comportato una serie di conseguenze a livello globale, come ad esempio la perdita di copertura nevosa, perdita di banchisa artica, l'aumento del livello dei mari. Dall'ultimo rapporto dell'IPCC ecco alcuni dati:

La copertura nevosa primaverile nell'emisfero nord dal 1967 al 2012 è diminuito nel bimestre marzo-aprile dell'1.6% per decennio e in giugno del 11.7% per decennio. La banchisa artica è calata in media

del 3.5/4.1% dal 1970 al 2012. Gli oceani hanno assistito ad un riscaldamento nei primi 75 metri dalla superficie di oltre 0.11° C nel periodo 1971-2010. Infine il livello medio dei mari dal 1901 al 2010 è cresciuto di 0.19 metri; nel periodo 1901-2010 è cresciuto con un tasso di circa 1,7 mm all'anno mentre nell'ultimo ventennio si registra un incremento significativo con valori di crescita pari a 3.2 mm all'anno.

Per quanto riguarda le precipitazioni la trattazione è più complessa. Da ciò che si nota osservando i dati rilevati negli ultimi decenni si può affermare che le precipitazioni a livello globale sono tendenzialmente diminuite, anche se in modo non omogeneo. Grazie alla maggior energia disponibile aumenta infatti la frequenza dei fenomeni violenti e le piogge risultano meno frequenti ma più intense rispetto al passato. Le temperature più elevate fanno aumentare il tasso di evaporazione, e quindi l'umidità atmosferica, e la temperatura dei mari. Perciò, in particolare nei mesi caldi e autunnali, si vengono a creare le condizioni adatte per la formazione di sistemi perturbati violenti capaci di provocare forti piogge, grandinate e forti venti. Tali fenomeni sono influenzati da condizioni locali ed è pertanto a tale livello che va impostato ogni riflessione.

1.8. Cambiamenti climatici in Friuli Venezia Giulia

Una delle prove più evidenti del riscaldamento climatico globale riscontrabili sulla nostra regione è la progressiva scomparsa dei ghiacciai alpini; negli ultimi 50 anni, infatti, si è passati da un'estensione di 0,38 km² a 0,19 km², con una riduzione pari al 50%. Un esempio ne è il ghiacciaio del Monte Canin, ormai quasi scomparso.

Per quanto riguarda le temperature a livello regionale, si conferma l'incremento osservato a livello globale. Anzi, secondo le ultime analisi sembrerebbe che la nostra regione, assieme a tutto il nord-est Italia, le Alpi in genere e la vicina Slovenia, sia un "hot spot" climatico in quanto le temperature sono aumentate maggiormente e più rapidamente che nel resto del pianeta. Secondo uno studio condotto dall'UMFVG (Unione Meteorologica del Friuli Venezia Giulia), sul monte Canin la temperatura è aumentata di 1.7° C negli ultimi 50 anni.

Analizzando con maggior dettaglio i dati rilevati a Udine si riscontrano, nel periodo 1840-1990, temperature medie annuali comprese tra 11 e 13° C, mentre nell'ultimo ventennio le medie annuali variano da 12.5 a 14°C. Questi dati possono essere comparati con quelli misurati a Trieste e di cui si dispone un altrettanto ricca banca dati, anche in questo caso a partire dal 1840. Ciò che si osserva è un aumento delle temperature medie annuali passate, nel periodo 1840-1990, da 12.5 - 14.5° C a 14.5 - 15.5° C nel ventennio 1990-2010. Da queste analisi è stato calcolato negli ultimi due decenni un incremento medio della temperatura di 0.7° C.

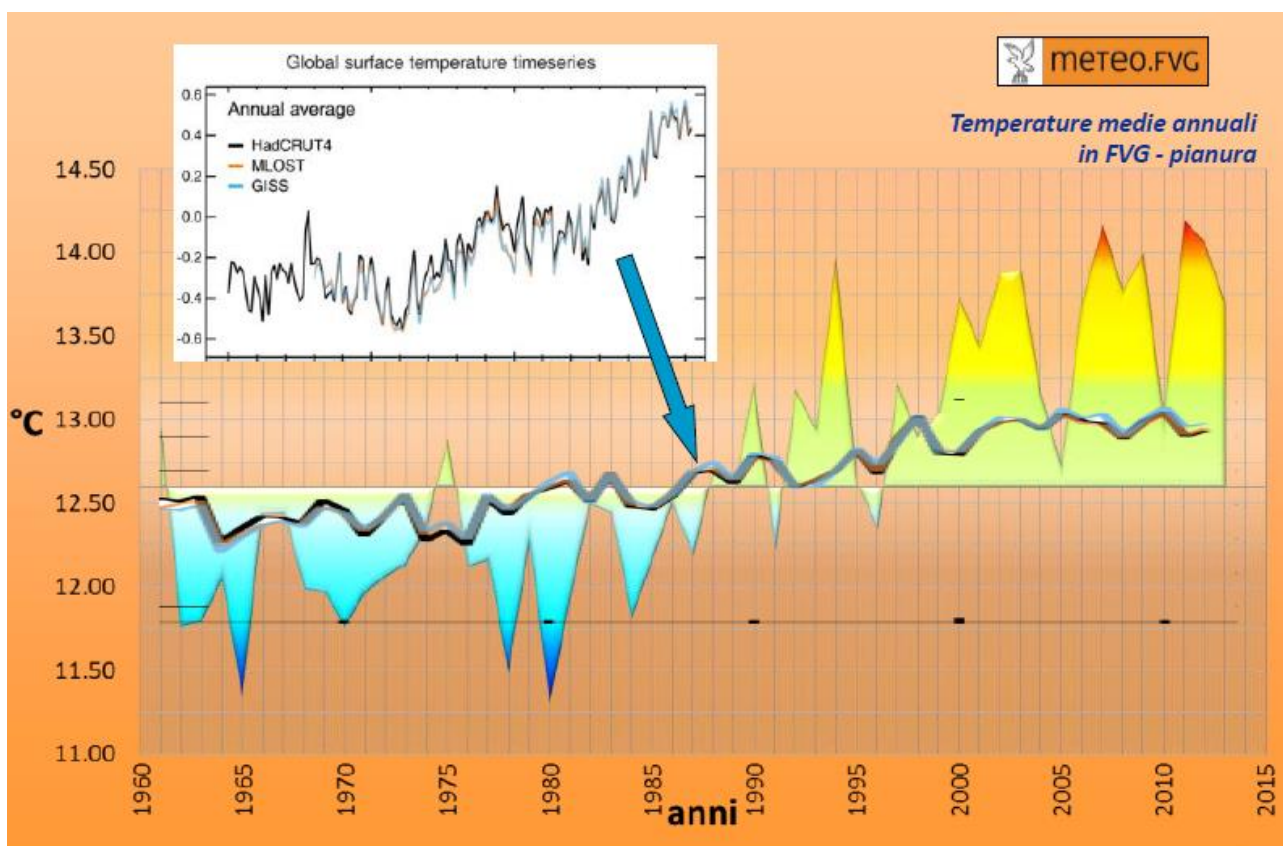


Figura 7. Andamento delle temperature medie annuali relative all'intera pianura friulana. Si noti il forte incremento a partire dagli anni ottanta.

Inoltre, dai dati raccolti dall'Osservatorio Meteorologico Regionale dell'OSMER-ARPA, il 2014 è stato, a livello regionale, il più caldo degli ultimi 100 anni, con una media annua che a Udine è stata di 14.5° C, 1.7° C oltre la media del periodo 1915-2014. Infine nell'ultimo ventennio, specie dal 2000 ad oggi, si è riscontrato un aumento delle ondate di calore sulla regione con maggior presenza nel periodo estivo dell'anticiclone africano. Infatti, mentre fino agli anni 2000 si riscontrava una media di 35 giorni con temperature massime estive oltre i 30°C, dal 2000 a oggi la media si è alzata a 50 giorni.

Analizzando invece le precipitazioni, dai dati raccolti si nota una tendenza, anche se esigua, alla diminuzione delle stesse. Mediamente infatti a Udine si è passati da 1500 mm annui a inizio '900 a 1400 mm negli ultimi anni e a Trieste da 1100 mm annui a inizio '900 ai 1000 mm annui degli ultimi anni.

Come si evince dalle analisi condotte dall'Osservatorio Meteorologico Regionale dell'OSMER-ARPA, in cinque stazioni regionali (Trieste, Fossalon, Cividale, Udine, Tarvisio) nel ventennio 1990-2010 le precipitazioni sono diminuite nei primi sei mesi dell'anno rispetto al trentennio di riferimento

1961-1990. In particolare per il mese di giugno si riscontra una forte diminuzione. Al contrario, nei restanti sei mesi dell'anno si registra un incremento delle precipitazioni nell'ultimo ventennio rispetto al periodo 1961-1990. Analogamente nell'ultimo ventennio si registra un incremento dei giorni di pioggia negli ultimi 4 mesi dell'anno.

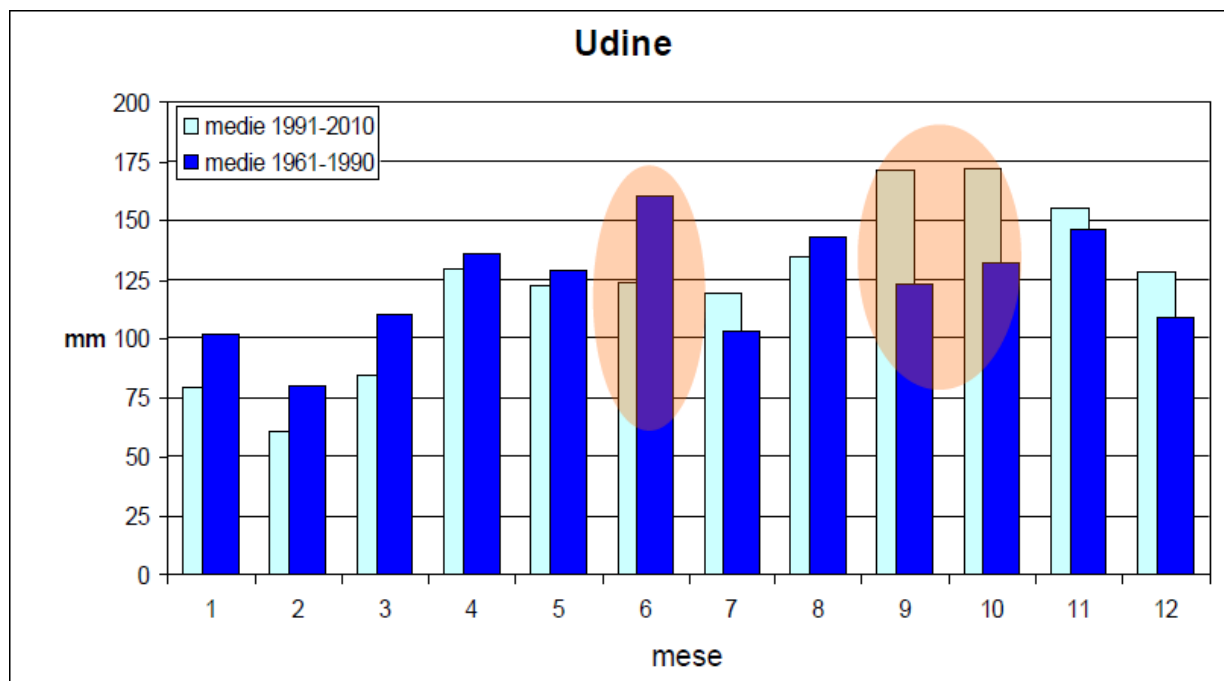


Figura 8. Precipitazioni medie secondo i periodi di riferimento 1991-2010 e 1961-1990 per la città di Udine. Si noti la diminuzione, nell'ultimo trentennio, dei valori medi nei primi 6 mesi e al contrario un aumento nella seconda metà dell'anno.

Complessivamente quindi negli ultimi decenni non si sono riscontrate variazioni significative nella piovosità regionale, ma si è osservato piuttosto una redistribuzione della stessa durante l'anno in termini sia di intensità che di frequenza. Sul territorio italiano aumentano infatti i fenomeni violenti che si concentrano in particolare tra la seconda parte dell'estate e l'autunno, momenti in cui è massima l'energia disponibile. Le estati sempre più calde inoltre vanno ad innalzare la temperatura dei nostri mari comportando un aumento dell'energia disponibile nei mesi autunnali quando si hanno le prime incursioni di aria fresca dal nord Europa. Il forte contrasto tra la massa d'aria calda e umida presente sul Mediterraneo e l'aria fresca proveniente dal nord Europa determina fasi di maltempo anche violento come dimostrano le recenti alluvioni che hanno interessato il territorio ligure. Tuttavia per quanto riguarda il territorio regionale al momento non esistono dati scientifici a sostegno di tale ipotesi.

1.9. Prospettive future

Secondo gli studi condotti dall'IPCC entro fine secolo la temperatura media globale è destinata ad aumentare ancora, anche nel caso in cui, fin da subito, l'uomo interrompesse totalmente le emissioni. Infatti l'inerzia del sistema climatico è tale per cui ci vorranno comunque diversi secoli affinché si ristabilisca un nuovo equilibrio naturale.

Gli scenari simulati sono molti in virtù dell'incertezza che ancora oggi esiste nel comprendere le dinamiche e le interazioni tra i diversi sistemi naturali. Secondo le simulazioni si va da un incremento minimo di temperatura al suolo di 2° C fino a valori massimi di 5-6° C entro fine secolo nel caso in cui l'uomo non attui alcuna riduzione delle emissioni di gas serra. Gli incrementi massimi sembrerebbero coinvolgere in particolare i poli rispetto alle zone equatoriali. In linea con questi scenari si sommano le simulazioni di innalzamento medio dei mari che vedono entro fine secolo valori compresi tra 0.4 e 1 metro. Con l'incremento dei fenomeni violenti aumenta anche il rischio di alluvioni, inondazioni ed erosione costiera. Sulle catene montuose si assisterà al continuo ritiro dei ghiacciai e alla riduzione della copertura nevosa. Per quanto riguarda le precipitazioni le simulazioni condotte sempre dall'IPCC a livello mondiale suggeriscono una possibile diminuzione in alcune aree del pianeta mentre in altre potrebbero mantenersi costanti o addirittura aumentare. Sulla nostra parte probabile un mantenimento delle stesse ai valori attuali seppur con un riassetto durante l'anno. Sembrerebbero probabili maggiori periodi secchi, specie durante l'estate, alternati da periodi particolarmente piovosi associati ad un incremento dell'intensità dei fenomeni.

1.10. Analisi statistica degli eventi nivologici

Durante lo studio dei fenomeni naturali, e in particolare nelle analisi meteo-climatiche, vengono solitamente raccolti, e in seguito elaborati, una grande mole di dati grezzi. In meteorologia, infatti, numerosi sono i parametri atmosferici continuamente monitorati e archiviati, e in misura crescente con l'avvento delle stazioni meteorologiche automatiche.

Tra i dati nivologici si è particolarmente interessati a quelli relativi alle misurazioni dell'altezza della neve fresca (indicata con la sigla HN) e dello spessore del manto (HS). In questo lavoro ci si concentrerà in particolare sul parametro HN, descrittivo di singoli eventi nevosi, studiando l'andamento delle nevicate a partire da quando si effettuano i rilevamenti (40 anni circa).

Preliminarmente è opportuno eseguire una elaborazione statistica dei dati grezzi, calcolando per ogni stazione le variabili statistiche fondamentali come media, moda, mediana, varianza, deviazione standard, massimo e minimo, in modo tale da essere già in grado di operare un sommario confronto tra le diverse stazioni.

Successivamente lo studio si focalizzerà sui valori cumulati di precipitazioni nevose registrate mensilmente o annualmente, quindi alla magnitudo e alla frequenza degli eventi. In generale, e indipendentemente dalla scala temporale di riferimento, fenomeni caratterizzati da elevata magnitudo risultano essere anche molto rari e perciò poco frequenti. L'analisi statistica si occupa di studiare il legame tra magnitudo e frequenza attraverso distribuzioni di probabilità. I dati considerati in analisi statistiche meteorologiche o nivologiche, come in questo caso, fanno riferimento a periodi minimi trentennali come da suggerimento dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale. E' stato scelto un periodo di almeno 30 anni per evitare due tipologie di rischio:

- considerare periodi troppo brevi che non consentano di descrivere adeguatamente il clima, in particolare per le variabili, come le precipitazioni, con una variabilità interannuale molto accentuata;
- considerare periodi eccessivamente lunghi ricadendo così in errori legati a fluttuazioni del clima verificatesi in un determinato arco temporale considerato.

Perciò un campione di dati si può ritenere rappresentativo per un intervallo di tempo uguale o superiore ai 30 anni. Oltre all'analisi del campione di dati, attraverso l'utilizzo di appropriate funzioni, è possibile estrapolare il comportamento statistico dei dati futuri. Dal campione si procede con l'analisi delle frequenze di accadimento giungendo infine all'analisi di probabilità.

L'elaborazione statistica di una variabile nivologica, come ad esempio l'altezza della neve fresca, ha lo scopo di definire la forma della funzione di probabilità della variabile stessa:

$$F = F(x)$$

che definisce il legame tra la variabile aleatoria x e la probabilità di non superamento (F).

La probabilità di non superamento viene definita attraverso la relazione:

$$F(x) = P[X \leq x]$$

dove $P[X \leq x]$ definisce la probabilità dell'evento. La funzione di probabilità descrive pertanto la frequenza di accadimento dei possibili valori della variabile considerata. La funzione inversa:

$$x = x(F)$$

esprime il valore della variabile in funzione della sua probabilità di non superamento.

La probabilità di superamento (P_s) e la probabilità di non superamento (P_{ns}) di un evento sono le grandezze che definiscono il tempo di ritorno secondo la relazione:

$$T_R = \frac{1}{P_s} = \frac{1}{1 - P_{ns}}$$

Il tempo di ritorno corrisponde perciò al numero di anni che in media separa il verificarsi di due eventi di intensità uguale o superiore a quella assegnata, ovvero rappresenta il numero di anni in cui l'evento di intensità assegnata viene eguagliato o superato in media una volta.

Il legame tra una variabile meteorologica e il tempo di ritorno viene individuata elaborando i valori massimi annuali registrati in una serie di annate, anche non consecutive, di adeguata numerosità. Inoltre, la stima della funzione di probabilità di una variabile meteorologica viene ottenuta elaborando il campione di dati relativi a una singola stazione.

La distribuzione di probabilità scelta deve rappresentare, anche se in modo approssimato, la vera distribuzione della variabile allo studio. La letteratura scientifica propone diverse distribuzioni di probabilità. Tra le più note si citano la distribuzione normale (o gaussiana) e la distribuzione log-normale. Per quanto riguarda la prima, essa viene scarsamente utilizzata nelle analisi di eventi meteorologici in quanto i dati non presentano andamenti simmetrici, mentre la seconda è solitamente applicata ai logaritmi naturali dei valori estremi.

Molto importante è valutare l'affidabilità della distribuzione adottata attraverso l'esecuzione di test di controllo, che, in base ai risultati, permettono di scegliere il modello più adatto per descrivere la rappresentazione della variabile. I più noti tra questi sono i test dell' R^2 , del χ^2 , il test di Kolmogorov – Smirnov, i test di Pettitt, Mann – Kendall e Durbin – Watson. Questi ultimi sono test utili per l'individuazione di trend nei dati delle serie temporali.

Le distribuzioni più frequentemente utilizzate in meteorologia e idrologia appartengono al gruppo Generalized Extreme Values (GEV). Esso è costituito da un'equazione-tipo che, al variare di un parametro, dà luogo a tre diverse distribuzioni di probabilità. Di seguito prenderemo in considerazione la distribuzione di tipo I, meglio conosciuta come distribuzione di Gumbel; l'equazione che la governa è la seguente:

$$p(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}$$

nella quale, con la sostituzione

$$\frac{x - \mu}{\alpha} = \omega$$

si ottiene

$$p(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\omega - e^{-\omega}}$$

dove $p(x)$ rappresenta la percentuale di superamento del valore.

La probabilità di non superamento è invece data da:

$$P(x) = e^{-e^{-\omega}}$$

I parametri dell'equazione da stimare sono α e μ , che variano da popolazione a popolazione; la stima viene eseguita utilizzando il metodo dei momenti, che consiste nell'attribuire a ciascun momento della popolazione il valore del corrispondente momento del campione estratto dalla popolazione. Si procede ipotizzando che la media e la varianza della popolazione siano uguali alla media e alla varianza del campione, e, sui valori del campione, si effettua una stima dei parametri α e μ utilizzando la media \bar{x} e la varianza s del campione secondo le seguenti relazioni:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6 s}}{\pi}$$

$$\mu = \bar{x} - 0.5772\alpha$$

Utilizzando questi due parametri è possibile conoscere il tempo di ritorno di un dato evento e, soprattutto in campo progettuale, conoscere l'intensità di evento associato a un determinato tempo di ritorno.

Nell'analisi statistica degli eventi estremi si utilizza un campione rappresentato dai valori massimi della variabile in oggetto registrati in ciascun anno idrologico. Nel caso di analisi nivologiche si analizzano solitamente eventi di una sola durata (giornaliera) mentre nel caso di studi su fenomeni intensi, si procede con analisi su eventi di durate pari a 15, 30, 45 minuti, 1, 3, 6, 12, 24 ore e 1, 2, 3, 4 e 5 giorni.

Dalle serie, una volta scelta la distribuzione di probabilità più idonea si possono ricavare le precipitazioni per il tempo di ritorno prescelto; i più usati sono 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 200 anni.

1.11. Obiettivi dell'elaborato

La tesi nasce con lo scopo di eseguire un'analisi statistica delle serie storiche nivologiche relative al territorio montano della Regione Friuli Venezia Giulia al fine di valutare l'eventuale presenza di trend associabili ai cambiamenti climatici in atto. A tale scopo sono state svolte analisi su serie di dati di nevicate massime annuali e mensili e sui quantili di Gumbel di diversi tempi di ritorno estratti da tali dati elementari. Infine per verificare la distribuzione spaziale delle tendenze verrà eseguita un'analisi geostatica grazie all'utilizzo di un programma GIS.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Dati climatici

Lo studio qui eseguito è basato sull'analisi delle serie nivologiche registrate manualmente o automaticamente dal Servizio Neve e Valanghe della Regione Friuli Venezia Giulia. A partire dagli anni '70 del secolo scorso, in diverse località del territorio montano regionale, personale del Corpo Forestale, o gestori di impianti di risalita, hanno effettuato registrazioni manuali dello spessore del manto, dell'altezza della neve fresca e di altri parametri atmosferici inviandole al centro operativo di Udine. A fianco alla registrazione manuale, ancor oggi effettuata, è attualmente presente una rete di stazioni automatiche dotate di nivometri a ultrasuoni. Negli ultimi anni, grazie anche all'affiancamento della rete OSMER, le stazioni sono aumentate e risultano essere una quarantina distribuite omogeneamente su tutto il territorio montano della Regione.

2.2. Metodologia

Delle quaranta stazioni disponibili, in base alla numerosità delle serie storiche (almeno 30 anni di dati) e alla distribuzione territoriale, ne sono state selezionate dodici, con un periodo di attività di quarant'anni circa a partire dal 1972 fino al 2014 (Tabella 1 e Figura 9).

#	Codice	Località	Comune	Prov	Lat	Long	Quota slm [m]
1	7CLA	Claut - staz. forestale	Claut	PN	5127012	308429	650
2	7FSN	Fusine	Tarvisio	UD	5149554	398148	850
3	7RVO	Ravaschetto fondovalle	Ravaschetto	UD	5153894	340200	880
4	7CAV	Cave del Predil	Tarvisio	UD	5143890	390112	910
5	7FSO	Forni di Sopra	Forni di Sopra	UD	5143901	313725	910
6	7SNE	Sella Nevea	Chiusaforte	UD	5138166	382487	1190
7	7COL	Collina	Forni Avoltri	UD	5161462	334436	1250
8	7PIA	Piancavallo	Aviano	PN	5108896	307839	1280
9	7SAU	Sauris di Sopra	Sauris	UD	5148784	321859	1425
10	7PPR	Passo Pramollo	Pontebba	UD	5157485	368015	1500
11	7RAV	Monte Zoncolan	Ravaschetto	UD	5152412	341355	1750
12	7RG2	Rifugio Gilberti	Chiusaforte	UD	5136577	381623	1850

Tabella 1. Elenco delle stazioni utilizzate nell'analisi con relativo codice, altitudine e coordinate geografiche secondo il sistema Gauss – Boaga (Fuso Est).

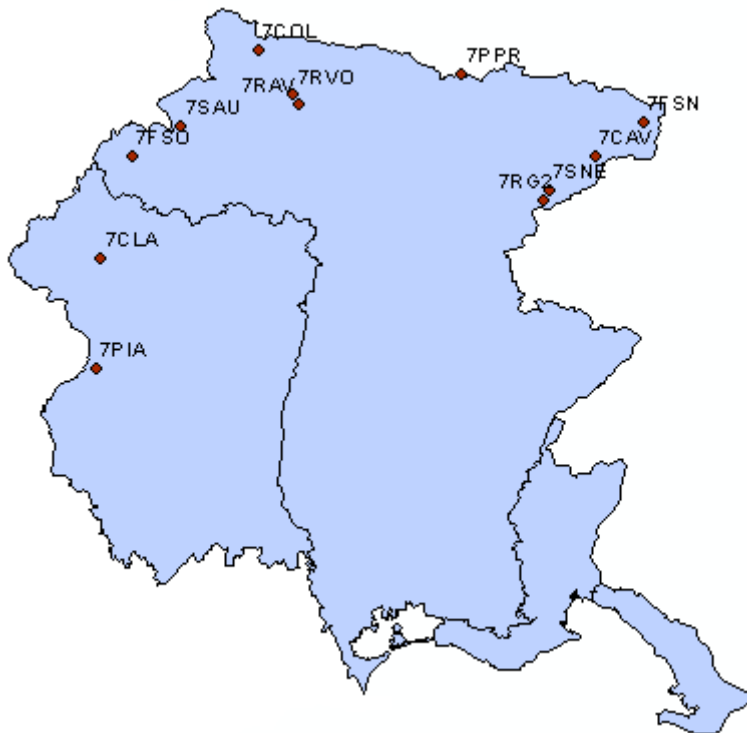


Figura 9: Distribuzione nel territorio regionale delle stazioni considerate nell'analisi.

Preliminarmente, per ogni stazione, è stata calcolata la statistica descrittiva sia per l'intera serie storica che per intervalli di dieci anni. Nello specifico, oltre ad essere stati estratti i valori massimi e minimi di precipitazione nevosa, sono state calcolate le seguenti statistiche:

- media: E' il valore centrale di un campione di dimensione N estratto dalla popolazione della variabile casuale x secondo la seguente formula:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

- moda: è definita come il valore dell'osservazione che compare più frequentemente;
- mediana: tra i valori osservati e ordinati, quello presente in posizione centrale corrisponde alla mediana;
- varianza; è il quadrato della deviazione standard. Per il campione la varianza è la media del quadrato degli scarti;

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

- deviazione standard, chiamata anche scarto quadratico medio, indica la dispersione dei dati attorno ad un indice di posizione come ad esempio la media. Per questo motivo ha la stessa unità di misura dei valori osservati. La funzione è la seguente:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

dove $(x_i - \bar{x})$ rappresenta lo scarto cioè la differenza tra un valore del campione e il suo valore medio;

Nel caso in cui siano presenti valori elevati di deviazione standard e varianza significa che è presente una grande dispersione dei dati, cioè la maggior parte dei valori del campione sono lontani dal valor medio mentre, contrariamente, valori bassi suggeriscono che i valori del campione sono molto vicini al valore medio.

Successivamente, per ogni stazione è stata calcolata la regressione lineare tra il valore massimo di precipitazione nevosa (in centimetri) all'anno e il tempo. Dai dati è stato poi estratto il coefficiente angolare (b), che rappresenta la pendenza della retta interpolante, ossia il tasso medio annuo di variazione della variabile considerata. L'adattamento dei dati rispetto al modello lineare è stato valutato attraverso il calcolo del coefficiente di determinazione R^2 . Questo coefficiente rappresenta il rapporto tra la devianza spiegata dal modello statistico utilizzato e la devianza totale. Qualora ci si riferisca a una regressione lineare, come in questo caso, corrisponde al quadrato del coefficiente di Pearson⁵, un indice che esprime una eventuale relazione di linearità tra due variabili.

Ecco in formula il coefficiente R^2 :

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

dove:

$$ESS = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

è la devianza del modello (Explained Sum of Squares)

$$TSS = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

⁵ Definito come il rapporto tra la covarianza di due variabili e il prodotto delle loro deviazioni standard.

è la devianza totale (Total Sum of Squares)

$$RSS = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

è la devianza residua (Residual Sum of Square).

In tutte le equazioni sopra descritte, y_i rappresenta i dati osservati; \bar{y} la media dei dati osservati e \hat{y}_i i dati stimati dal modello della regressione.

I valori di R^2 variano da 0 a 1; quanto più il valore si avvicina a 1 tanto più il modello interpreta bene i dati.

Un ulteriore parametro statistico calcolato è il P-value, che rappresenta il livello di significatività, ossia la probabilità di ottenere un risultato pari o più estremo di quello osservato, supposta vera l'ipotesi nulla⁶. Il P-value quindi indica il minimo livello di significatività per il quale l'ipotesi nulla viene accettata o rifiutata. L'ipotesi nulla viene rifiutata se il test fornisce un P-value inferiore al valore di significatività del test, oppure contrariamente viene accettata. Proprio per queste ragioni è importante fissare il livello di significatività del test che solitamente è del 95%. Perciò una serie di dati viene ritenuta statisticamente significativa se il P-value è minore o uguale a 0.05.

Come ulteriore analisi si è proceduto, a partire dai dati elementari relativi alla massima nevicata annuale (indicata con HN max), al calcolo dei valori di precipitazione critica per i tempi di ritorno di 5, 10, 20, 50, 100, 200 anni utilizzando il metodo di Gumbel. Il calcolo è stato effettuato su finestre mobili di 10 anni contigui considerando valide finestre minime di 5 anni. I valori ottenuti di precipitazione critica, in questo caso neve, sono stati usati per eseguire ulteriori regressioni lineari con i tempi di ritorno di 5, 10, 20, 50, 100, 200 anni per tutte le 12 stazioni. Attraverso la regressione lineare è stato possibile calcolare il valore di pendenza della retta di interpolazione e il coefficiente R^2 .

La presenza di trend, crescenti, decrescenti o stazionari è stata perciò calcolata sia sui dati elementari che attraverso i quantili Gumbel per i tempi di ritorno di 5, 10, 20, 50, 100, 200 anni.

In entrambe le analisi sono stati utilizzati due test statistici:

- il test di Mann – Kendall è il risultato dello sviluppo del test non parametrico delle tendenze suggerito da Mann nel 1945 e in seguito studiato da Kendall nel 1975. Questo test è spesso utilizzato per individuare trend monotonici in serie storiche climatiche; si tratta di un test non

⁶ E' un'affermazione sulla distribuzione di probabilità di una o più variabili aleatorie da verificare in termini probabilistici.

parametrico, in quanto non assume alcuna distribuzione a priori per i dati, il che porta di solito ad una maggior robustezza rispetto a metodi parametrici (Mariani, 2006). L'ipotesi nulla nega la presenza di un trend nella serie di dati mentre l'ipotesi alternativa sostiene la presenza di una tendenza nella serie; tre sono le possibili varianti: un trend positivo, nullo o negativo. La presenza di trend positivi o negativi viene valutata attraverso il calcolo della statistica τ di Kendall: nel caso di trend crescenti essa assume valori positivi, nel caso di trend decrescenti valori negativi;

- il test di Pettitt (1979) è anch'esso un test non parametrico e perciò non richiede ipotesi particolari sulla distribuzione dei dati. Esso viene utilizzato per individuare, qualora esistano, cambiamenti repentini nelle serie di dati a un istante t non noto a priori; questi eventuali cambiamenti prendono il nome di *break point* oppure *change point*. Inoltre, se esiste un break point, il test individua anche l'istante t della serie in cui è avvenuto e il livello di significatività statistica, individuata attraverso il P-value. L'ipotesi nulla postula l'assenza di break point, mentre l'ipotesi alternativa afferma la presenza di una repentina variazione nella serie.

Il calcolo delle distribuzioni di probabilità sono state eseguite con l'algoritmo di Gumbel, mentre l'estrazione dei valori critici di precipitazione per i tempi di ritorno predefiniti e l'attuazione di alcuni test statistici sono state eseguite eseguite con un software a tale scopo predisposto.

Le altre analisi invece sono state eseguite attraverso l'ausilio del software XLStat, un componente aggiuntivo operante in ambiente Microsoft Excel.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. Numerosità e ampiezza temporale delle serie storiche nivologiche

Generalmente l'ampiezza delle serie storiche nivologiche è piuttosto contenuta rispetto alle serie pluviometriche, risalenti già ai primi anni '20. In Friuli Venezia Giulia le serie storiche nivologiche partono dai primi anni '70 con un numero di stazioni pari a 10 ben distribuite sul territorio regionale, aumentate a 12 nei primi anni '80. In seguito la raccolta dei dati è proseguita, seppur con parziali lacune, in un numero di stazioni via via crescente (oggi circa 46 tra manuali e automatiche).

Nel presente studio sono state considerate significative serie storiche di circa trent'anni e per questa ragione sono state selezionate le 12 stazioni riportate in Tabella 2.

Le stazioni che risultano avere maggiori lacune sono Ravascletto, Collina di Forni Avoltri e Sauris di Sopra; ad eccezione di Cave del Predil e di Collina di Forni Avoltri, tutte le stazioni coprono un arco temporale almeno trentennale. Complessivamente la media e la mediana delle numerosità è di 34 anni. Come accennato in precedenza, la stazione con il numero inferiore di dati è Cave del Predil con 26 annate mentre quella con la maggiore numerosità è Forni di Sopra con ben 43 anni di dati.

#	STAZIONE	INIZIO	FINE	MANC	n
1	Cave del Predil	1985	2014	3	26
2	Claut - staz. forestale	1973	2014	2	40
3	Collina di Forni Avoltri	1973	2014	13	29
4	Forni di Sopra	1972	2014	0	43
5	Fusine	1983	2014	0	32
6	Monte Zoncolan	1975	2014	4	35
7	Passo Pramollo	1978	2014	6	30
8	Piancavallo	1974	2014	4	37
9	Ravascletto fondovalle	1972	2014	13	30
10	Rifugio Gilberti	1972	2014	1	42
11	Sauris di Sopra	1972	2014	11	32
12	Sella Nevea	1972	2014	7	36
	media				34
	mediana				34
	minimo				26
	massimo				43

Tabella 2. Elenco delle stazioni con relativo periodo di attività e numerosità delle serie.

3.2. Analisi dei dati elementari

3.2.1. Calcolo delle statistiche descrittive

Dopo aver selezionato le stazioni idonee, la prima operazione svolta è stata il calcolo delle statistiche descrittive relative all'intera serie storica e, successivamente, a intervalli di dieci anni. Tutto ciò per evidenziare le caratteristiche di ogni stazione con particolare attenzione alla media delle nevicate e ai record storici relativi alla massima precipitazione nevosa registrata. Così facendo è possibile procedere con un preliminare confronto sia in merito alle serie storiche complete che per gli intervalli di dieci anni con lo scopo di valutare eventuali variazioni nel corso dei decenni attribuibili ai cambiamenti climatici in atto.

Osservando la media delle precipitazioni nevose delle varie stazioni (Tabella 3a), trascurando $HN = 0$, si può notare come i valori più elevati si riferiscano a stazioni a quote superiori ai 1400 m (vedi Tabella 1), collocate prevalentemente sul settore alpino. Spiccano infatti il rifugio Gilberti con una media di 16.2 cm seguito da Passo Pramollo con 13.8 cm, Monte Zoncolan con 12.5 cm, Sella Nevea con 11.5 cm e infine Sauris di Sopra, Piancavallo e Forni di Sopra con circa 10 cm. Con i valori più bassi ritroviamo invece le stazioni di bassa quota (comprese tra 600 e 900 m s.l.m.) come Claut, Ravascletto, Fusine e Cave del Predil con una media tra compresa 8.5 e 9 cm. Fa eccezione Collina di Forni Avoltri che, nonostante sia ad una quota superiore (1250 m s.l.m.), vede una media più contenuta e pari a 8.6 cm, 1.5 – 2 cm circa più bassa rispetto alle stazioni poste alla sua stessa quota ma in altri settori della regione. Anche i valori più elevati di precipitazione massima registrata in un unico evento spettano a stazioni in quota come i 135 cm di Passo Pramollo o i 120 cm del Rifugio Gilberti.

Studiando attentamente i dati relativi agli intervalli decennali (Tabelle 3b, 3c, 3d, 3e) si può osservare un leggero incremento delle altezze medie di precipitazione nel periodo 1985-1994 rispetto al decennio precedente, seguito poi da una forte diminuzione su quasi tutte le stazioni nel decennio 1995-2004, fatta eccezione per Passo Pramollo dove si osserva un incremento medio pari a 2 cm proprio in questo decennio. Significativa è la diminuzione della nevosità media nelle stazioni di Sella Nevea e Ravascletto, passate rispettivamente da 12.7 e 11.1 cm nel decennio 1985-1994 a 9.1 e 7.3 cm nel periodo 1995-2004. Nell'ultimo decennio, dal 2005 al 2014, si è invece registrato un incremento, talvolta significativo, in 11 stazioni su 12 ad esclusione di Piancavallo dove si registra un lieve decremento. L'aumento medio più rilevante spetta al Rifugio Gilberti, passato da un valore medio pari a 15.5 cm nel decennio 1995-2004 a 17.9 cm nell'ultimo decennio.

Questo andamento altalenante, con tendenza finale all'incremento, è riportato nella Figura 10.

Inoltre va segnalata la costanza dei valori di deviazione standard che risultano compresi tra 10 e 13 cm ad eccezione che a Passo Pramollo, Rifugio Gilberti e Monte Zoncolan dove la deviazione standard è più elevata e compresa tra 14 e 18. Ciò denota, in questo caso, che la maggior parte dei valori del campione sono lontani dal valor medio.

Relativamente al numero di eventi di precipitazione nevosa, analogamente a quanto osservato sul valore medio, si nota nel corso dei decenni una progressiva diminuzione con un minimo attorno agli anni '90 e una successiva ripresa fino ai giorni nostri, come si può osservare dalle Figura 11.

La maggiore numerosità di eventi riguarda le stazioni in quota rispetto a quelle di fondovalle. Tuttavia appare piuttosto significativa la differenza tra il Monte Zoncolan, nelle Alpi Carniche e il Rifugio Gilberti, nelle Alpi Giulie, che, pur trovandosi a quote analoghe, vedono un numero di eventi molto diverso tra loro. Per quanto riguarda il Rifugio Gilberti, il numero delle nevicate è di molto superiore a quello del Monte Zoncolan come si può osservare nelle Tabelle 3a, 3b, 3c, 3d, 3e e in Figura 11.

	STAZIONE	min (cm)	max (cm)	\bar{x}	mediana	moda	σ	n
1	Cave del Predil	1	80	9.3	5	1	12.0	751
2	Claut - staz. forestale	1	80	8.5	4	2	10.6	501
3	Collina di Forni Avoltri	1	85	8.6	5	2	10.2	589
4	Forni di Sopra	1	106	10.4	5	1	13.6	960
5	Fusine	1	78	9.1	5	2	11.6	807
6	Monte Zoncolan	1	105	12.5	7.5	5	14.4	1004
7	Passo Pramollo	1	135	13.8	7	5	16.0	951
8	Piancavallo	1	85	10.7	5	2	12.2	998
9	Ravaschetto fondovalle	1	93	9.0	5	5	11.2	321
10	Rifugio Gilberti	1	120	16.2	10	5	18.1	1662
11	Sauris di Sopra	1	105	10.7	6	1	12.8	1023
12	Sella Nevea	1	85	11.5	6	2	13.2	1102

Tabella 3a. Statistiche descrittive relative all'intera serie di dati. Tutti i calcoli sono stati effettuati prendendo in considerazione solo le giornate in cui si è registrata precipitazione nevosa.

	STAZIONE	min (cm)	max (cm)	\bar{x}	mediana	moda	σ	n
1	Cave del Predil							
2	Claut - staz. forestale	1	65	7.9	4	2	9.1	135
3	Collina di Forni Avoltri							
4	Forni di Sopra	1	82	11.3	5	1	14.6	304
5	Fusine							
6	Monte Zoncolan	1	90	12.2	8	5	13.9	294
7	Passo Pramollo							
8	Piancavallo	1	80	11.9	8	5	11.5	238
9	Ravaschetto fondovalle							
10	Rifugio Gilberti	1	120	17.8	10	1	22.0	399
11	Sauris di Sopra							
12	Sella Nevea	1	79	14.0	9	2	14.5	286

Tabella 3b. Statistiche descrittive relative al decennio 1975 – 1984; tutti i calcoli sono stati effettuati prendendo in considerazione solo le giornate in cui si è registrata precipitazione nevosa. Le stazioni in cui non sono riportati i valori presentano serie di dati mancanti o lacunose.

	STAZIONE	min (cm)	max (cm)	\bar{x}	mediana	moda	σ	n
1	Cave del Predil	1	60	10.5	5	1	12.6	156
2	Claut - staz. forestale	1	80	10.7	5	2	13.0	102
3	Collina di Forni Avoltri							
4	Forni di Sopra	1	80	11.8	5	1	15.5	187
5	Fusine	1	68	9.8	5	2	12.1	209
6	Monte Zoncolan	1	70	13.9	7.5	5	17.6	186
7	Passo Pramollo	1	80	12.3	6	1	16.4	269
8	Piancavallo	1	85	12.1	5	2	15.4	124
9	Ravaschetto fondovalle	1	60	11.1	5	5	12.2	77
10	Rifugio Gilberti	1	82	18.4	10	5	23.7	331
11	Sauris di Sopra							
12	Sella Nevea	1	76	12.7	6	1	15.4	259

Tabella 3c. Statistiche descrittive relative al decennio 1985 – 1994; tutti i calcoli sono stati effettuati prendendo in considerazione solo le giornate in cui si è registrata precipitazione nevosa. Le stazioni in cui non sono riportati i valori presentano serie di dati mancanti o lacunose.

	STAZIONE	min (cm)	max (cm)	\bar{x}	mediana	moda	σ	n
1	Cave del Predil	1	60	8.9	5	1	10.3	266
2	Claut - staz. forestale	1	48	8.0	4	1	9.8	114
3	Collina di Forni Avoltri	1	40	6.8	5	2	7.0	199
4	Forni di Sopra	1	53	8.6	5	1	10.0	182
5	Fusine	1	68	8.1	4	2	9.9	245
6	Monte Zoncolan	1	60	11.7	8	5	11.4	201
7	Passo Pramollo	1	80	14.4	10	5	14.4	177
8	Piancavallo	1	65	10.2	5	1	12.5	279
9	Ravaschetto fondovalle	1	30	7.3	5	2	7.2	95
10	Rifugio Gilberti	1	100	15.5	10	10	17.2	380
11	Sauris di Sopra	1	66	9.1	5	1	10.8	271
12	Sella Nevea	1	45	9.1	5	1	9.8	225

Tabella 3d. Statistiche descrittive relative al decennio 1995 – 2004; tutti i calcoli sono stati effettuati prendendo in considerazione solo le giornate in cui si è registrata precipitazione nevosa.

	STAZIONE	min (cm)	max (cm)	\bar{x}	mediana	moda	σ	n
1	Cave del Predil	1	80	9.1	4	1	12.9	329
2	Claut - staz. forestale	1	68	8.0	4	2	10.3	140
3	Collina di Forni Avoltri	1	65	8.8	5	5	9.5	230
4	Forni di Sopra	1	106	9.6	5	1	12.8	247
5	Fusine	1	78	9.7	5	2	12.8	284
6	Monte Zoncolan	1	105	13.2	7	2	16.4	325
7	Passo Pramollo	1	100	15.2	5	5	16.6	304
8	Piancavallo	1	65	9.6	5	2	11.0	337
9	Ravascletto fondovalle	1	60	8.5	5	2	10.7	107
10	Rifugio Gilberti	1	120	17.9	10	2	21.5	497
11	Sauris di Sopra	1	105	11.1	6	1	13.7	347
12	Sella Nevea	1	85	10.4	5	2	13.0	309

Tabella 3e. Statistiche descrittive relative al decennio 2005 – 2014; tutti i calcoli sono stati effettuati prendendo in considerazione solo le giornate in cui si è registrata precipitazione nevosa.

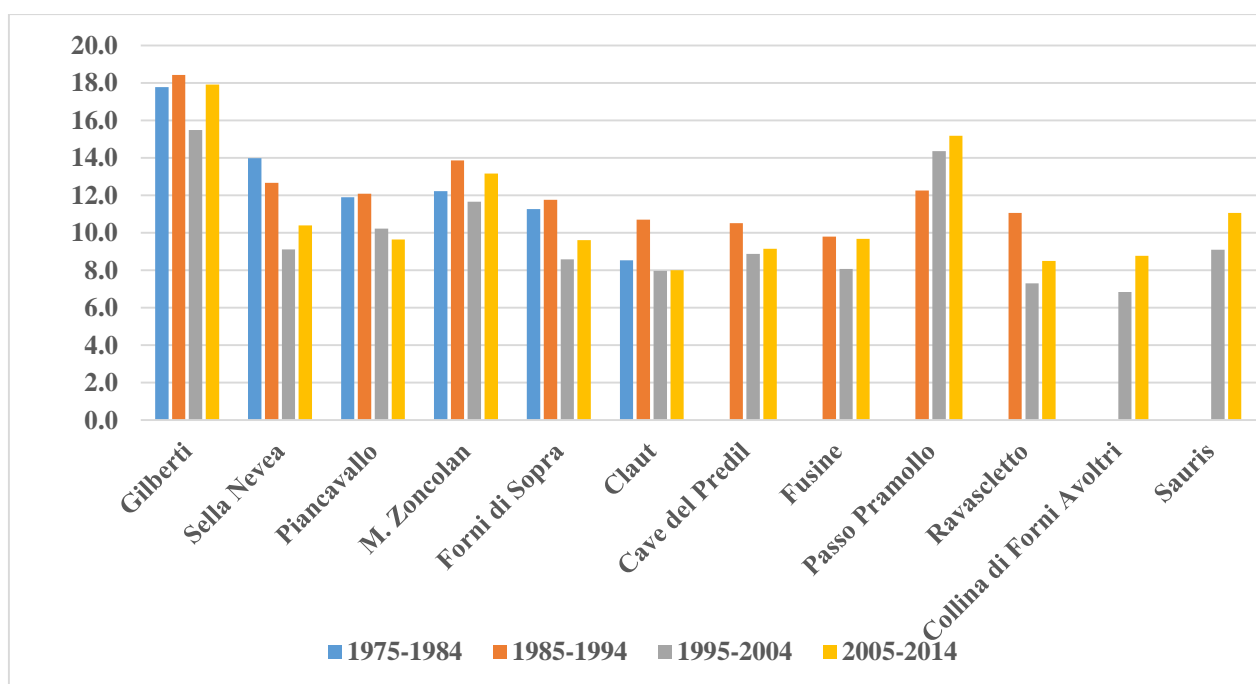


Figura 10. Grafico raffigurante la media delle precipitazioni nevose (cm) per intervalli decennali. Da notare il calo attorno agli anni '90 - 2000 e il successivo incremento fino ai giorni nostri per quasi la totalità delle stazioni ad esclusione di Piancavallo e Claut.

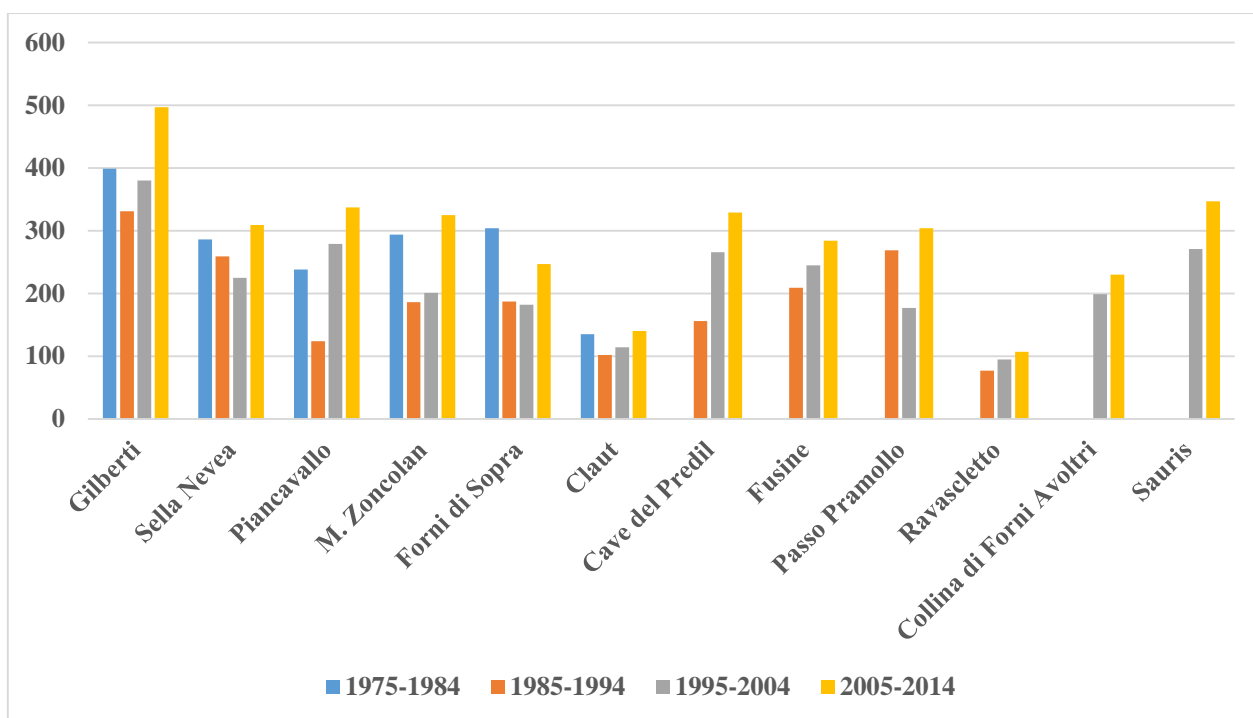


Figura 11. Rappresentazione grafica del numero di nevicate calcolata per intervalli decennali e per ogni stazione

E' stata infine analizzata la frequenza, nel corso dei decenni, delle nevicate di debole intensità prendendo in esame gli accumuli al suolo da 1 a 4 cm. E' emerso come anch'esse subiscano una riduzione attorno agli anni novanta e poi una successiva ripresa fino ai giorni nostri ad eccezione della stazione di passo Pramollo dove si riscontra una tendenza alla diminuzione. I dati sono riportati in Tabella 4 e in Figura 12.

STAZIONI	DECENNI			
	1975-1984	1985-1994	1995-2004	2005-2014
Cave del Predil		68	125	177
Claut - staz. forestale	64	43	64	76
Collina di Forni Avoltri			98	88
Forni di Sopra	148	89	89	118
Fusine		103	123	140
Monte Zoncolan	86	58	62	124
Passo Pramollo		102	46	38
Piancavallo	75	50	132	155
Ravascletto fondovalle		23	42	51
Rifugio Gilberti	120	89	85	157
Sauris di Sopra			139	158
Sella Nevea	81	97	110	132
tot	574	722	1115	1414

Tabella 4. Frequenza degli eventi nevosi da 1 a 4 cm conteggiati per ogni stazione e per intervalli decennali. Le caselle vuote sono relative a dati mancanti.

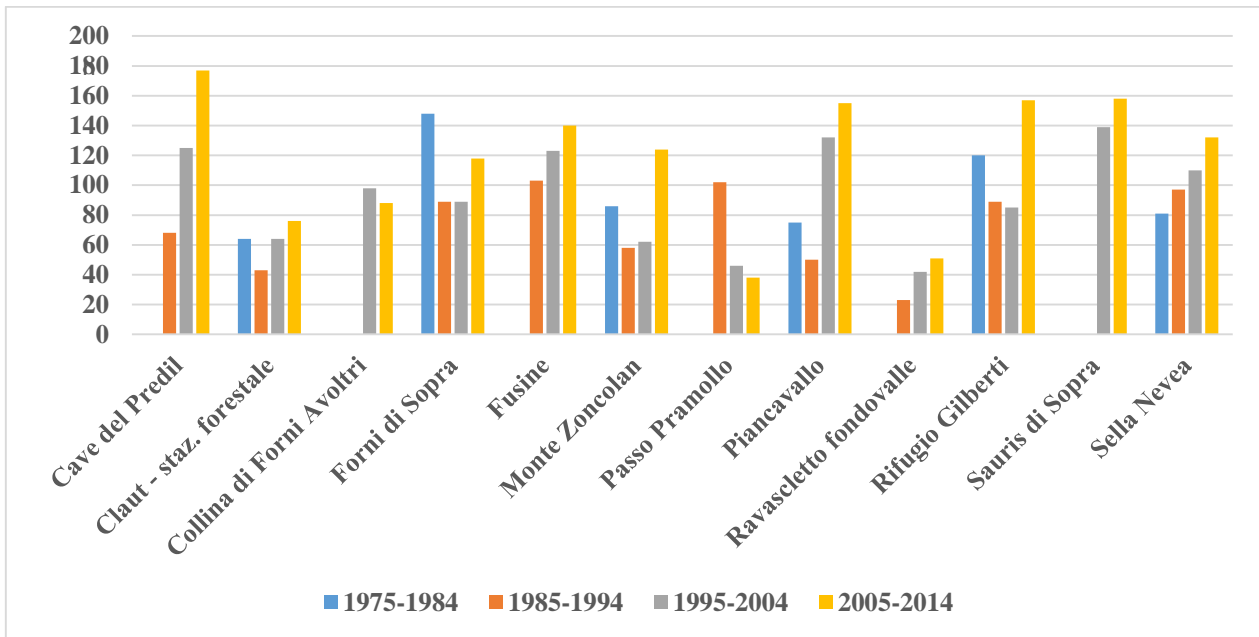


Figura 12. Rappresentazione grafica della frequenza delle nevicate con accumuli da 1 a 4 cm per le 12 stazioni e per intervalli decennali.

3.2.2. Regressione lineare e test di Mann – Kendall sull'intera serie storica di dati

Uno degli obiettivi dell'analisi è verificare la presenza e l'entità di eventuali trend nelle serie storiche nivologiche. A tal fine sono state eseguite le regressioni lineari sui dati elementari relativi ai massimi annuali per ciascuna stazione. In aggiunta è stato eseguito il test di Mann – Kendall, test non parametrico. La tendenza all'incremento o al decremento delle precipitazioni nevose è subito evidenziata dai coefficienti b e τ riportati in Tabella 5.

I valori di b e τ risultano simili proprio in virtù della natura dei coefficienti stessi.

Dall'elaborazione dei dati notiamo segnali contrastanti; mentre per alcune stazioni il trend è leggermente positivo, per altre è leggermente o molto negativo come nel caso di Forni Avoltri e di Ravascletto. Tuttavia nel complesso si ha una sostanziale parità tra stazioni con trend positivo e negativo.

Come mostrano i dati riportati in tabella, tutte le stazioni presentano valori elevati di P-value, superiori al livello di significatività del test pari a 0.05. Valori di P-value superiori al livello di significatività del test implicano l'accettazione dell'ipotesi nulla e il rifiuto dell'ipotesi alternativa; è assente perciò una tendenza significativa.

Tuttavia per due stazioni (Collina di Forni Avoltri e Ravascletto) il P-value è molto vicino al livello di significatività pur restando superiore al limite.

	STAZIONE	b	P	R ²	τ	P
1	Cave del Predil	0.158	0.6947	0.007	0.031	0.8423
2	Claut - staz. forestale	-0.409	0.5267	0.011	-0.069	0.5524
3	Collina di Forni Avoltri	-3.501	0.0726	0.119	0.019	0.9053
4	Forni di Sopra	-1.187	0.2825	0.029	-0.142	0.1929
5	Fusine	0.432	0.5159	0.014	0.075	0.5589
6	Monte Zoncolan	0.120	0.7314	0.003	0.026	0.8337
7	Passo Pramollo	0.184	0.3747	0.028	0.082	0.5428
8	Piancavallo	0.517	0.4766	0.014	0.096	0.4125
9	Ravascletto fondovalle	-3.979	0.0558	0.124	-0.144	0.2928
10	Rifugio Gilberti	-0.451	0.5061	0.012	-0.112	0.3210
11	Sauris di Sopra	0.253	0.6189	0.009	0.074	0.5798
12	Sella Nevea	-0.964	0.3330	0.027	-0.141	0.2282
	b; $\tau < 0$		6			5
	b; $\tau > 0$		6			7
	P > 0.05			12		12
	P < 0.05			0		0

Tabella 5. Valori di b , R^2 , P ottenuti dalle regressioni lineari sull'intera serie di dati elementari e valori di τ e P ottenuti dal test di Mann – Kendall.

Successivamente sono state effettuate le regressioni lineari sulle nevicate massime mensili, separatamente per i mesi in cui si sono verificate nevicate.

Dall'analisi si riscontrano tendenze discordanti sia tra le stazioni che tra i diversi mesi.

Esaminando i dati relativi al mese di dicembre, si conferma, come a livello annuale, una leggera predominanza di stazioni con trend positivo (7) rispetto a quelle con trend negativo (5). Tuttavia dall'analisi dei P-value si escludono tendenze significative (Tabella 6°).

	STAZIONE	Dicembre				
		b	P	R ²	τ	P
1	Cave del Predil	-1.529	0.2277	0.058	-0.207	0.1381
2	Claut - staz. forestale	0.074	0.7866	0.002	0.044	0.7131
3	Collina di Forni Avoltri	1.030	0.3196	0.038	0.043	0.7661
4	Forni di Sopra	-0.076	0.7844	0.002	-0.025	0.8279
5	Fusine	-0.241	0.6273	0.008	-0.092	0.4748
6	Monte Zoncolan	1.972	0.1692	0.053	0.171	0.1509
7	Passo Pramollo	0.496	0.4872	0.017	0.031	0.8295
8	Piancavallo	-0.042	0.8393	0.001	-0.045	0.7131
9	Ravaschetto fondovalle	1.030	0.3191	0.037	0.115	0.4048
10	Rifugio Gilberti	1.724	0.1970	0.043	0.097	0.3936
11	Sauris di Sopra	0.190	0.6663	0.007	0.044	0.7479
12	Sella Nevea	-2.990	0.0926	0.079	-0.182	0.1192
	b; τ < 0		5			5
	b; τ > 0		7			7
	P < 0.05			0		0
	P > 0.05			12		12

Tabella 6a. Valori di b, P, R² ottenuti dalla regressione lineare sui dati mensili relativi al mese di dicembre per le intere serie storiche e i valori del τ e P ottenuti dal test di Mann – Kendall.

Nel mese di gennaio invece sembra predominare una tendenza all'incremento delle nevicate sulla maggioranza delle stazioni a esclusione di Ravaschetto e Sella Nevea, dove è presente un trend negativo.

	STAZIONE	Gennaio				
		b	P	R ²	τ	P
1	Cave del Predil	1.132	0.2976	0.043	0.092	0.1577
2	Claut - staz. forestale	0.000	0.9837	0.000	0.065	0.5759
3	Collina di Forni Avoltri	0.049	0.8262	0.002	0.238	0.0814
4	Forni di Sopra	0.010	0.9218	0.000	-0.014	0.9049
5	Fusine	2.470	0.1265	0.076	0.192	0.1317
6	Monte Zoncolan	0.489	0.4889	0.014	0.046	0.7039
7	Passo Pramollo	1.608	0.2152	0.054	0.063	0.6415
8	Piancavallo	0.270	0.6064	0.007	0.081	0.4881
9	Ravascletto fondovalle	-1.142	0.2943	0.039	-0.102	0.4506
10	Rifugio Gilberti	3.688	0.0621	0.086	0.142	0.1997
11	Sauris di Sopra	0.412	0.5261	0.015	0.141	0.2839
12	Sella Nevea	-0.839	0.3659	0.023	-0.128	0.2769
	b; $\tau < 0$	2				3
	b; $\tau > 0$	10				9
	P < 0.05		0			0
	P > 0.05		12			12

Tabella 6b. Valori di b, P, R² ottenuti dalla regressione lineare sui dati mensili relativi al mese di gennaio per le intere serie storiche e i valori del τ e P ottenuti dal test di Mann – Kendall.

La stessa cosa si può dire per il mese di febbraio dove prevale nettamente un trend di crescita su 10 stazioni su 12; anche in questo caso le due stazioni con trend negativo sono Ravascletto e Sella Nevea.

	STAZIONE	Febbraio				
		b	P	R ²	τ	P
1	Cave del Predil	2.275	0.1440	0.083	0.289	0.0386
2	Claut - staz. forestale	0.075	0.7862	0.002	0.051	0.6620
3	Collina di Forni Avoltri	0.373	0.5467	0.014	0.306	0.0253
4	Forni di Sopra	0.117	0.7344	0.003	0.009	0.9395
5	Fusine	0.172	0.6811	0.006	0.069	0.5923
6	Monte Zoncolan	0.440	0.5115	0.012	0.097	0.4153
7	Passo Pramollo	0.175	0.6792	0.006	0.082	0.5431
8	Piancavallo	2.149	0.1513	0.056	0.212	0.0644
9	Ravascletto fondovalle	-0.013	0.9111	0.000	-0.009	0.9570
10	Rifugio Gilberti	0.138	0.7127	0.004	0.097	0.3958
11	Sauris di Sopra	0.745	0.3953	0.026	0.215	0.1004
12	Sella Nevea	-0.446	0.5085	0.013	-0.074	0.5297
	b; $\tau < 0$	2				2
	b; $\tau > 0$	10				10
	P < 0.05		0			2
	P > 0.05		12			10

Tabella 6c. Valori di b, P, R² ottenuti dalla regressione lineare sui dati mensili relativi al mese di febbraio per le intere serie storiche e i valori del τ e P ottenuti dal test di Mann – Kendall. Sono evidenziati i P < 0.05.

Con marzo invece la tendenza si inverte riscontrando una predominanza di trend negativi, nello specifico su 8 stazioni, mentre solo 4 mostrano ancora un trend in crescita, seppur contenuta. Spiccano i trend negativi di Collina di Forni Avoltri e Ravascletto con un coefficiente angolare significativamente negativo.

	STAZIONE	Marzo				
		b	P	R ²	τ	P
1	Cave del Predil	0.174	0.6814	0.007	0.037	0.8022
2	Claut - staz. forestale	0.761	0.3385	0.020	-0.125	0.2794
3	Collina di Forni Avoltri	-5.191	0.0308	0.161	-0.025	0.8651
4	Forni di Sopra	-2.805	0.1022	0.069	-0.136	0.2251
5	Fusine	0.532	0.4716	0.017	0.035	0.7949
6	Monte Zoncolan	0.028	0.8686	0.001	0.014	0.9164
7	Passo Pramollo	-0.019	0.8909	0.001	-0.063	0.6420
8	Piancavallo	-1.923	0.1741	0.051	-0.140	0.2267
9	Ravascletto fondovalle	-5.975	0.0211	0.176	-0.137	0.3187
10	Rifugio Gilberti	-0.547	0.4634	0.014	-0.059	0.5967
11	Sauris di Sopra	-0.050	0.8250	0.002	0.037	0.7887
12	Sella Nevea	-0.782	0.3825	0.022	-0.112	0.3389
	b; $\tau < 0$		8			8
	b; $\tau > 0$		4			4
	P < 0.05			2		0
	P > 0.05			10		12

Tabella 6d. Valori di b, P, R² ottenuti dalla regressione lineare sui dati mensili relativi al mese di marzo per le intere serie storiche e i valori del τ e P ottenuti dal test di Mann – Kendall. Sono evidenziati i P < 0.05.

Il trend negativo riscontrato sulla maggioranza delle stazioni a marzo risulta ancora più evidente nel mese di aprile dove è presente su ben 11 stazioni su 12, ad eccezione di Piancavallo dove è presente una lieve tendenza positiva. Talvolta la diminuzione è molto pronunciata come nel caso di Forni di Sopra, Sauris e Sella Nevea.

	STAZIONE	Aprile				
		b	P	R ²	τ	P
1	Cave del Predil	-2.955	0.0985	0.110	-0.275	0.0561
2	Claut - staz. forestale	-0.837	0.3661	0.022	-0.214	0.0893
3	Collina di Forni Avoltri	-1.400	0.2479	0.053	-0.130	0.3661
4	Forni di Sopra	-5.708	0.0217	0.125	-0.247	0.0243
5	Fusine	-0.562	0.4592	0.018	-0.055	0.6820
6	Monte Zoncolan	-2.026	0.1637	0.056	-0.110	0.3601
7	Passo Pramollo	-1.557	0.2225	0.053	-0.218	0.0997
8	Piancavallo	0.114	0.7381	0.003	0.006	0.9686
9	Ravascletto fondovalle	-3.347	0.0788	0.144	-0.284	0.0495
10	Rifugio Gilberti	-0.598	0.4440	0.016	-0.061	0.5914
11	Sauris di Sopra	-4.345	0.0464	0.234	-0.232	0.0770
12	Sella Nevea	-8.532	0.0062	0.201	-0.347	0.0032
	b; τ < 0		11			11
	b; τ > 0		1			1
	P < 0.05			3		3
	P > 0.05			9		8

Tabella 6e. Valori di b, P, R² ottenuti dalla regressione lineare sui dati mensili relativi al mese di marzo per le intere serie storiche e i valori del τ e P ottenuti dal test di Mann – Kendall. Sono evidenziati i P < 0.05.

Perciò da questa analisi condotta a livello mensile appare evidente una tendenza all'incremento delle nevicate nei mesi invernali, in particolare tra gennaio e febbraio, mentre risultano sempre più scarse le nevicate primaverili, in particolare quelle relative ad aprile.

Evidenti sono i trend negativi riscontrati attraverso le regressioni lineari condotte sulle stazioni di Sella Nevea e Forni di Sopra per il mesi di aprile e riportate in Figura 13 e 14.

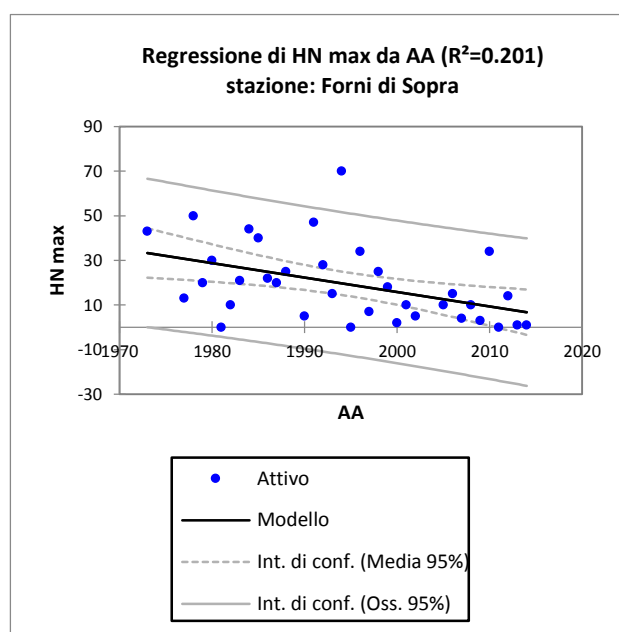
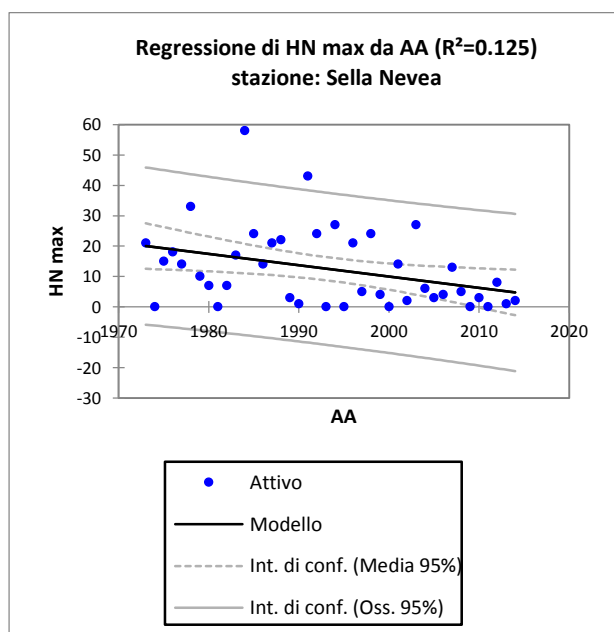


Figura 13 e 14. Regressione lineare per la stazione di Sella Nevea e Forni di Sopra.

3.2.3. Regressione lineare e test di Mann – Kendall per i dati dal 1990 al 2014

Alla luce dei risultati ottenuti dal calcolo delle statistiche descrittive, eseguite per gli intervalli decennali, e delle regressioni lineari condotte a livello mensile, si è voluto procedere con una regressione lineare e con il test di Mann – Kendall per gli ultimi 25 anni delle serie storiche di ogni stazione. Dalle statistiche descrittive emerge, nell'ultimo decennio, un incremento della nevosità media e del numero di eventi nevosi, confermato in parte dalle regressioni lineari mensili condotte sull'intera serie di dati elementari, le quali mostrano un aumento della nevosità nei mesi invernali (gennaio e febbraio) e una diminuzione, talora marcata, nei mesi primaverili.

Si è voluto perciò, per verifica, eseguire una regressione lineare, assieme al test di Mann – Kendall, per il periodo 1990-2014; i risultati sono riportati in Tabella 7. Negli ultimi 25 anni prevale una tendenza all'incremento della nevosità su tutte le stazioni, particolarmente significativa a Forni Avoltri e Piancavallo, stazioni in cui risulta inoltre particolarmente basso il P-value inferiore al livello di significatività del test.

	STAZIONE	b	P	R ²	τ	P
1	Cave del Predil	0.837	0.3698	0.035	0.094	0.5276
2	Claut - staz. forestale	3.770	0.0645	0.141	0.212	0.1468
3	Collina di Forni Avoltri	6.642	0.0180	0.249	0.322	0.0146
4	Forni di Sopra	2.315	0.1418	0.091	0.176	0.2324
5	Fusine	0.480	0.4953	0.020	0.101	0.4974
6	Monte Zoncolan	3.554	0.0733	0.145	0.258	0.0950
7	Passo Pramollo	0.183	0.6741	0.011	0.042	0.8331
8	Piancavallo	5.327	0.0308	0.195	0.305	0.0415
9	Ravaschetto fondovalle	2.419	0.1348	0.103	0.185	0.2477
10	Rifugio Gilberti	2.251	0.1477	0.093	0.191	0.2046
11	Sauris di Sopra	1.521	0.2505	0.065	0.175	0.2431
12	Sella Nevea	1.428	0.2454	0.064	0.103	0.5086
	b; τ < 0	0			0	
	b; τ > 0	12			12	
	P > 0.05		10			10
	P < 0.05		2			2

Tabella 7. Valori di b, P, R² ottenuti dalla regressione lineare sull'intervallo di dati dal 1990 al 2014 e i valori del τ e P ottenuti dal test di Mann – Kendall. Sono evidenziati i P < 0.05.

2.3.4. Omogeneità dei dati: test di Pettitt

Il test di Pettitt è stato eseguito sui dati elementari con lo scopo di valutarne la loro omogeneità e l'eventuale presenza di *break points* che vanno ad individuare intervalli di tempo con medie statistiche simili al loro interno ma diverse tra loro. L'individuazione di eventuali *break points* può essere utile per trarre conclusioni climatologiche su eventuali variazioni nelle serie storiche relative alle precipitazioni. Oltre all'esecuzione del test è stata verificata la significatività attraverso il calcolo del P-value. In questo test l'ipotesi nulla, rappresentata con un P-value maggiore di 0.05, sostiene l'omogeneità dei dati, mentre l'ipotesi alternativa, rappresentata da un P-value inferiore a 0.05, sostiene la presenza di almeno un *break point*, cioè uno o più anni nella serie in cui è presente uno scostamento dei dati dalla media di partenza.

Dalle analisi condotte, riportate in Tabella 8, non si riscontrano *break points* significativi. Per tutte le stazioni il P-value mostra valori superiori al livello di significatività del test e perciò va confermata l'ipotesi nulla; tutto ciò implica una buona omogeneità dei dati analizzati. L'unica stazione che si avvicina maggiormente al livello di significatività è Forni di Sopra con un P-value pari a 0.0839.

	STAZIONE	Inizio	Fine	Break	P	m
1	Cave del Predil	1985	2014	2002	0.7741	40.58
2	Claut - staz. forestale	1973	2014	2008	0.5246	50.43
3	Collina di Forni Avoltri	1973	2014	1987	0.1284	29.92
4	Forni di Sopra	1972	2014	1978	0.0839	35.50
5	Fusine	1983	2014	2005	0.8432	40.25
6	Monte Zoncolan	1975	2014	1986	0.4953	49.48
7	Passo Pramollo	1978	2014	1984	0.3731	56.00
8	Piancavallo	1974	2014	2001	0.3371	42.42
9	Ravascletto fondovalle	1972	2014	1989	0.1252	30.27
10	Rifugio Gilberti	1972	2014	1980	0.1271	72.80
11	Sauris di Sopra	1972	2014	2008	0.5246	50.43
12	Sella Nevea	1972	2014	1987	0.1919	46.87
	P > 0.05					12
	P < 0.05					0

Tabella 8. Valori ottenuti dal calcolo del test di Pettitt sui dati elementari di ciascuna stazione.

3.3. Analisi dei quantili di Gumbel

La regressione lineare è stata infine applicata anche ai quantili di Gumbel calcolati su finestre mobili decennali con l'obiettivo di estrarre il coefficiente b utilizzando i quantili che rappresentano le neviccate critiche per i tempi di ritorno di 5, 10, 20, 50, 100 e 200 anni.

Per i quantili di Gumbel non è possibile calcolare il test di Mann – Kendall poiché quest'ultimo richiede dati non correlati tra loro. In questo caso infatti, poiché i valori di precipitazione critica sono stati calcolati con finestre mobili decennali che traslano perciò di anno in anno, si ha una forte autocorrelazione dei dati e pertanto non risulta possibile eseguire questo test.

Dai dati riportati nelle Tabelle 9 e 9b si può notare come i valori del coefficiente b , per tutti i tempi di ritorno considerati, siano tendenzialmente negativi. Per tempi di ritorno di 5 e 10 anni le stazioni con coefficiente $b > 0$ sono pari a 5 mentre, con $b < 0$ pari a 6. I calcoli eseguiti per i restanti tempi di ritorno, 20, 50, 100 e 200 anni mostrano un numero di stazioni con trend positivo ($b > 0$) pari a 4, e di conseguenza un numero superiore di stazioni con trend negativo ($b < 0$) pari a 8.

Complessivamente le regressioni condotte sui quantili di Gumbel mostrano dei valori simili alle regressioni effettuate sui dati elementari. In quest'ultimo caso si riscontrava un ugual numero di stazioni con trend crescente e decrescente, mentre, nel caso dei quantili, prevale una tendenza alla decrescita.

	STAZIONE	TR 5			TR 10			TR 20		
		n	b	R ²	n	b	R ²	n	b	R ²
1	Cave del Predil	22	-0.017	0.001	23	0.007	0.000	23	-0.042	0.004
2	Claut - staz. forestale	33	-0.598	0.309	34	-0.605	0.218	34	-0.760	0.224
3	Collina di Forni Avoltri	21	-0.858	0.300	22	-0.678	0.194	22	-0.834	0.207
4	Forni di Sopra	34	-0.725	0.404	34	-0.922	0.443	34	-1.105	0.458
5	Fusine	28	0.055	0.020	29	0.101	0.044	29	0.122	0.035
6	Monte Zoncolan	33	-0.435	0.270	34	-0.490	0.288	34	-0.610	0.317
7	Passo Pramollo	32	0.330	0.175	33	0.406	0.236	33	0.504	0.262
8	Piancavallo	33	0.102	0.029	34	0.119	0.025	34	0.106	0.012
9	Ravascletto fondovalle	25	-0.339	0.137	25	-0.205	0.030	25	-0.303	0.042
10	Rifugio Gilberti	33	0.123	0.013	34	0.231	0.037	34	0.332	0.054
11	Sauris di Sopra	25	0.182	0.049	25	-0.119	0.018	25	-0.194	0.031
12	Sella Nevea	34	-0.267	0.114	34	-0.435	0.239	34	-0.500	0.225
	b > 0		5			5			4	
	b < 0		7			7			8	

Tabella 9a. Valori di numerosità n, pendenza b e R² ottenuti dalle regressioni dei quantili di Gumbel per i tempi di ritorno di 5, 10 e 20 anni.

	STAZIONE	TR 50			TR 100			TR 200		
		n	b	R ²	n	b	R ²	n	b	R ²
1	Cave del Predil	23	-0.037	0.002	23	-0.140	0.022	23	-0.179	0.029
2	Claut - staz. forestale	33	-0.934	0.215	34	-1.106	0.227	34	-1.253	0.227
3	Collina di Forni Avoltri	22	-1.002	0.205	22	-1.183	0.223	22	-1.331	0.228
4	Forni di Sopra	34	-1.308	0.448	34	-1.512	0.471	34	-1.685	0.473
5	Fusine	29	0.185	0.044	29	0.174	0.027	29	0.198	0.025
6	Monte Zoncolan	33	-0.733	0.314	34	-0.875	0.339	34	-0.987	0.341
7	Passo Pramollo	32	0.661	0.305	33	0.731	0.284	33	0.829	0.287
8	Piancavallo	33	0.107	0.007	34	0.081	0.003	34	0.071	0.002
9	Ravaschetto fondovalle	25	-0.377	0.041	25	-0.513	0.056	25	-0.602	0.059
10	Rifugio Gilberti	33	0.495	0.080	34	0.565	0.080	34	0.666	0.087
11	Sauris di Sopra	25	-0.233	0.028	25	-0.352	0.046	25	-0.418	0.050
12	Sella Nevea	34	-0.557	0.191	34	-0.642	0.197	34	-0.702	0.188
	b > 0		4			4			4	
	b < 0		8			8			8	

Tabella 9b. Valori di numerosità n, pendenza b e R² ottenuti dalle regressioni dei quantili di Gumbel per i tempi di ritorno di 50, 100 e 200 anni.

3.4. GEOSTATISTICA

Per avere una rappresentazione spaziale delle tendenze di aumento o diminuzione delle nevicate sono state realizzate delle mappe nelle quali vengono rappresentati i coefficienti di regressione (b) calcolati in ogni stazione. Le stazioni che presentano un P-value inferiore a 0.05 sono state evidenziate.

Per interpolare questi dati sulla superficie della Regione Friuli Venezia Giulia, come prima ipotesi si era pensato all'utilizzo della funzione di analisi spaziale di tipo Spline. Tuttavia il basso numero di stazioni, la loro collocazione ai margini del territorio regionale e la loro dipendenza dalla quota non consentono una adeguata interpretazione del fenomeno. E' stata pertanto scelta una rappresentazione puntiforme dei risultati ottenuti nelle stazioni considerate; in particolare sulla carta della Regione sono stati riportati, in corrispondenza della localizzazione delle stazioni, i valori del coefficiente angolare (b) delle regressioni lineari condotte sui quantili di Gumbel per il tempo di ritorno di 50 anni (Figura 15), sui dati elementari dal 1990 al 2014 (Figura 16) e sui dati di precipitazioni massime mensili (Figura 17a, 17b, 17c, 17d, 17e).

Dalla mappa relativa ai quantili di Gumbel per un tempo di ritorno di 50 anni calcolati attraverso finestre mobili di 10 anni per l'intera serie storica di dati disponibili, si può notare come i valori più elevati del coefficiente b siano relativi al settore delle Alpi Giulie e alla stazione di Piancavallo (7PIA) nelle Prealpi Carniche, mentre quelli più bassi riguardino le stazioni situate nelle Alpi Carniche.

Analizzando invece la mappa relativa alla regressione lineare condotta dal 1990 al 2014 si nota come gli incrementi maggiori riguardino, al contrario, tutto il settore Carnico, sia alpino che prealpino, mentre valori di crescita inferiori si riscontrano sulle Alpi Giulie.

A livello mensile invece si osserva una maggiore variabilità.

Per quanto riguarda il mese di dicembre valori più elevati del coefficiente b riguardano tutto il settore carnico e le stazioni in quota delle Alpi Giulie, come nel caso del Rifugio Gilberti (7RG2). Tendenze negative più pronunciate le ritroviamo nelle stazioni delle Alpi Giulie interne, come si può osservare nel caso di Sella Nevea (7SNE), Cave del Predil (7CAV) e Fusine (7FSN).

Nel mese di gennaio la situazione si inverte con valori di trend positivo più elevati sulle Alpi Giulie, ad eccezione di Sella Nevea (7SNE), e inferiori su tutto il settore carnico, con unico trend negativo nella stazione di Ravascletto (7RAV).

Nel mese di febbraio valori positivi ed elevati di b sono ben distribuiti su tutto il territorio montano del Friuli Venezia Giulia. I valori più bassi, e negativi, riguardano le uniche stazioni di Sella Nevea (7SNE) e Ravascletto (7RAV).

Nel mese di marzo comincia a prevalere una tendenza negativa su gran parte della stazioni, in particolare sul settore delle Alpi Carniche, a esclusione di Claut (7CLA) e del Monte Zoncolan (7RVO). Anche sulle Giulie prevale il coefficiente b negativo, a eccezione delle stazioni più interne come Fusine (7FSN) e Cave del Predil (7CAV).

Infine nel mese di aprile si riscontrano trend negativi su tutto il settore montano a esclusione della stazione di Piancavallo (7PIA), dove la tendenza è leggermente positiva. Ancora una volta i coefficienti b più bassi e negativi riguardano tutto il settore delle Alpi Carniche e le stazioni di Sella Nevea (7SNE) e Cave del Predil (7CAV) sulle Giulie.

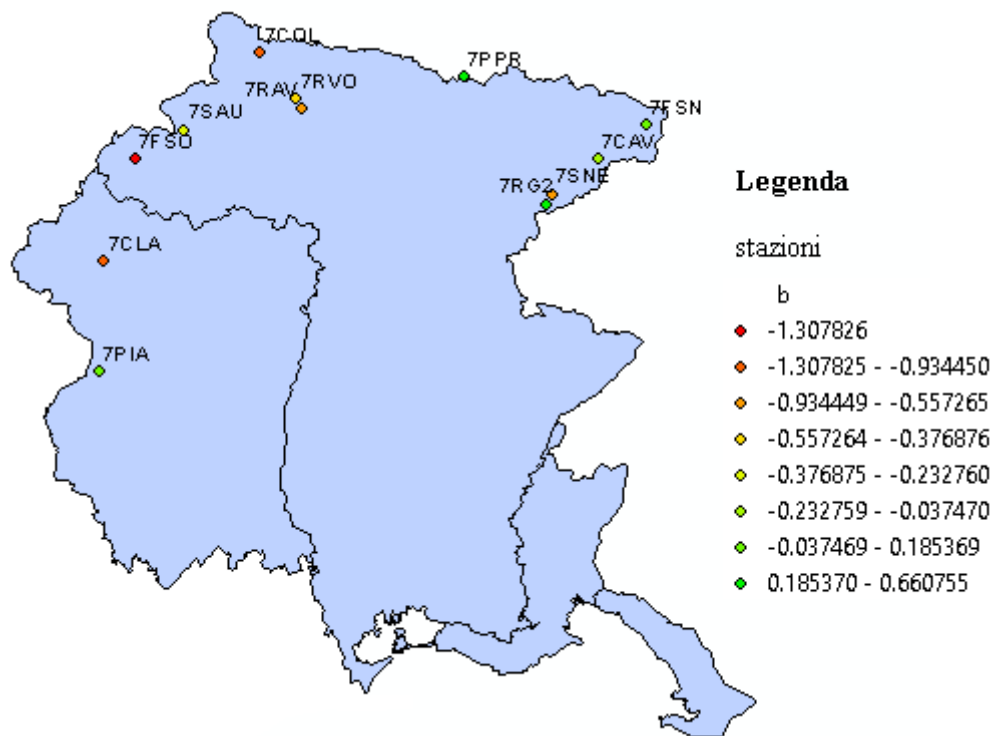


Figura 15. Mappa con rappresentazione del coefficiente angolare b ottenuta da quantili Gumbel di TR 50

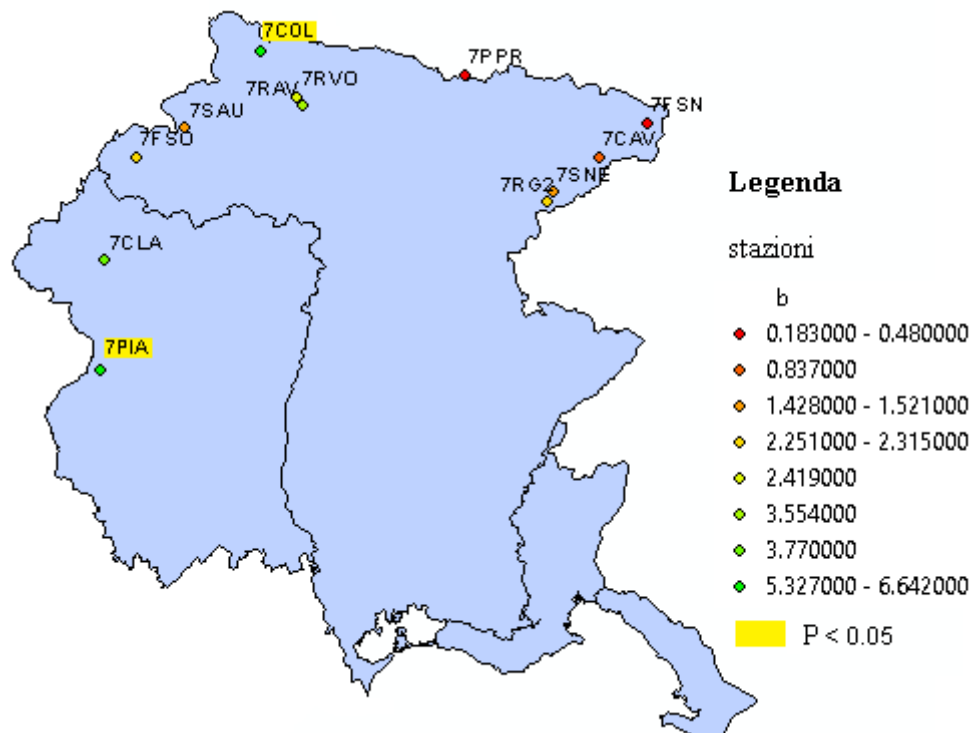


Figura 16. Mappa con rappresentazione del coefficiente b ottenuto dalle regressioni lineari dai dati elementari nell'intervallo 1990-2014.

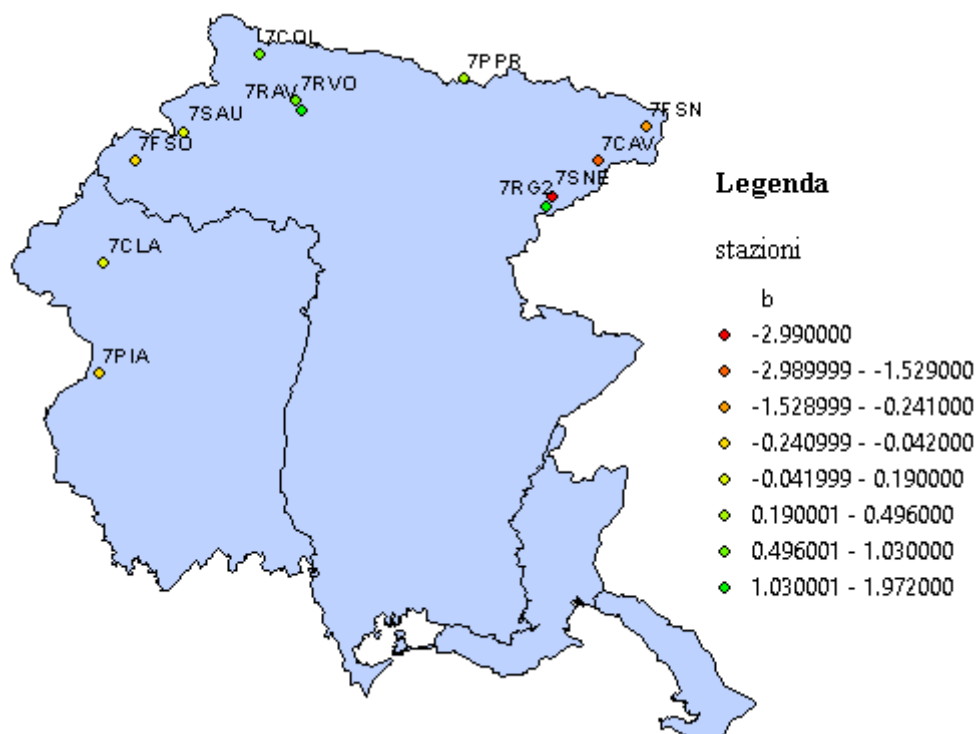


Figura 17a. Mappa con rappresentazione del coefficiente angolare b ottenuto dalle regressioni lineari effettuate sull'intera serie di dati elementari per il mese di dicembre.

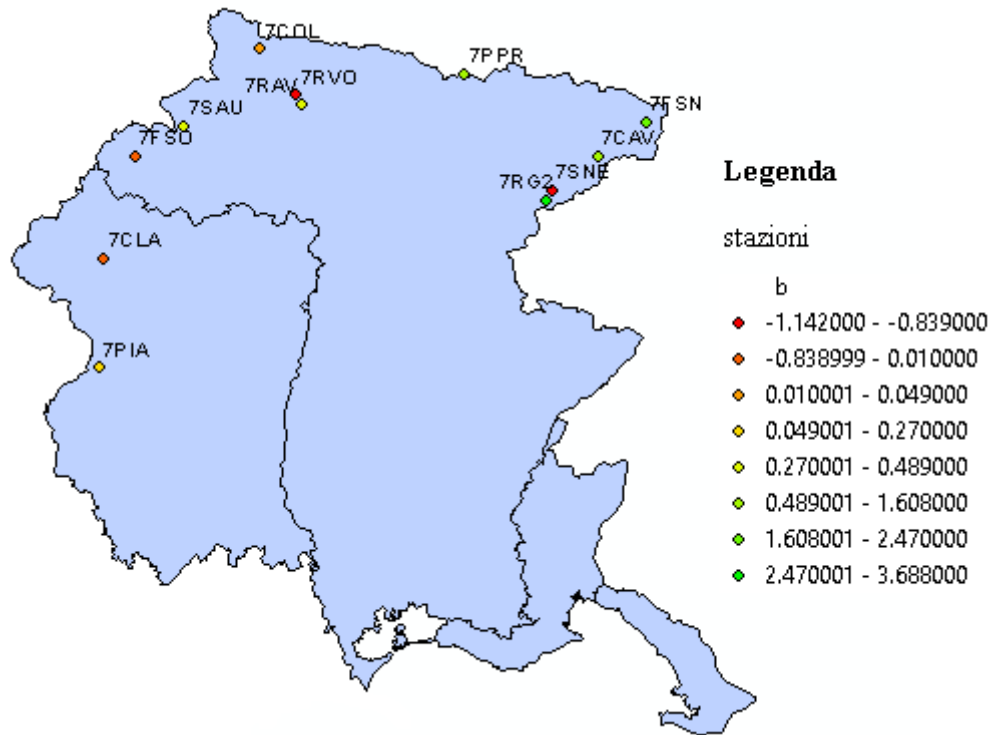


Figura 17b. Mappa con rappresentazione del coefficiente angolare b ottenuto dalle regressioni lineari effettuate sull'intera serie di dati elementari per il mese di gennaio.

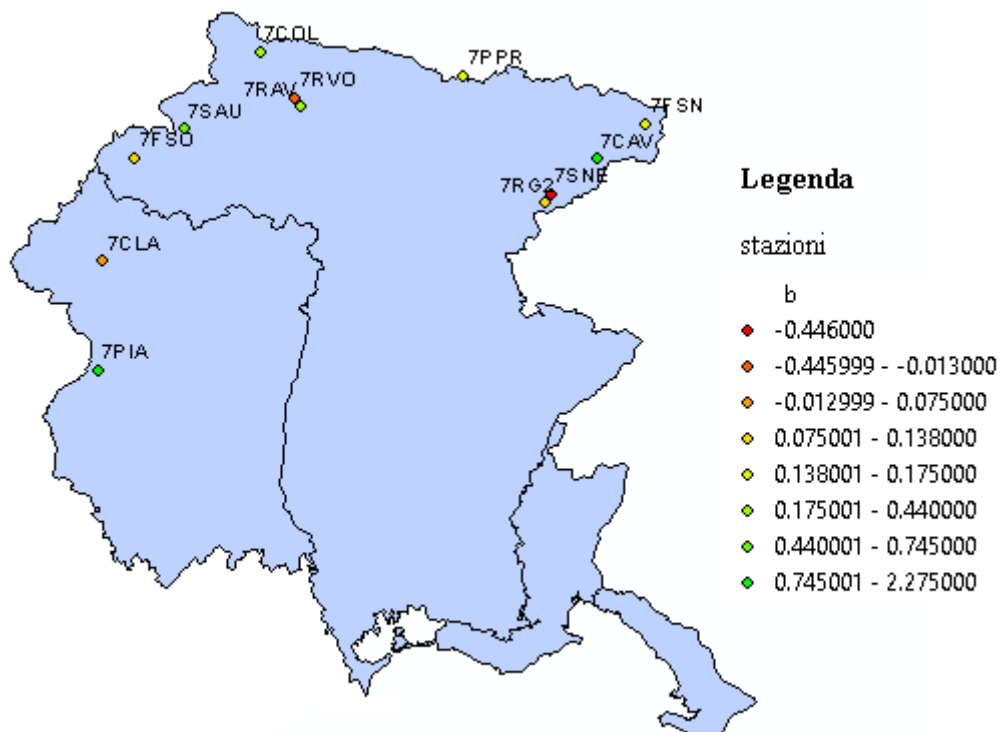


Figura 17c. Mappa con rappresentazione del coefficiente angolare b ottenuto dalle regressioni lineari effettuate sull'intera serie di dati elementari per il mese di febbraio.

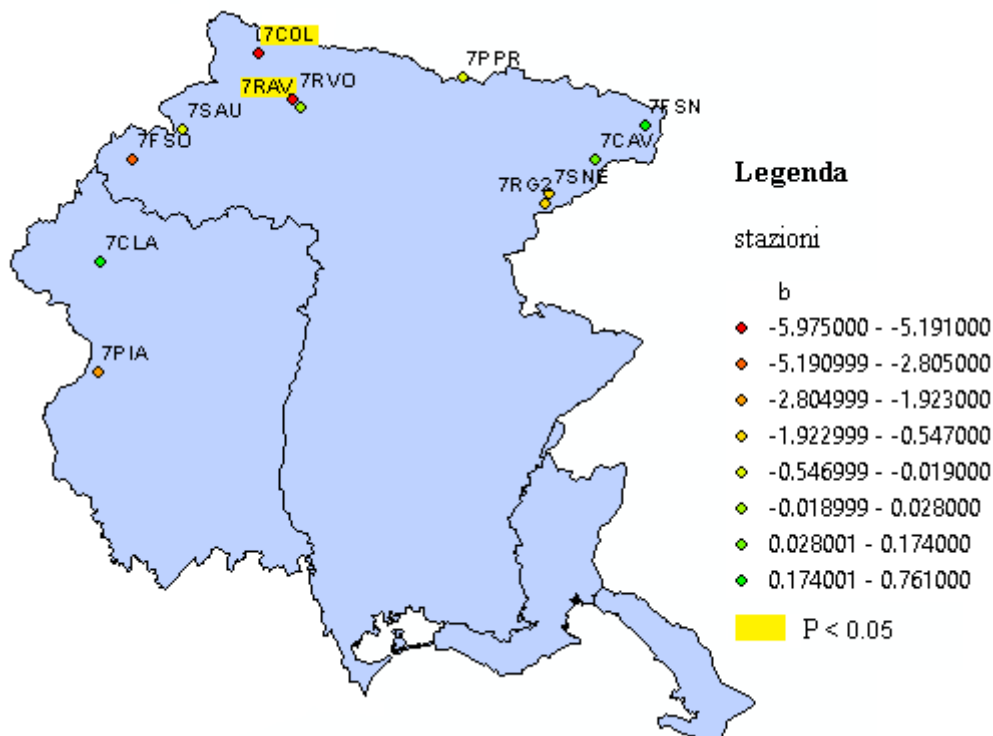


Figura 17d. Mappa con rappresentazione del coefficiente angolare b ottenuto dalle regressioni lineari effettuate sull'intera serie di dati elementari per il mese di marzo.

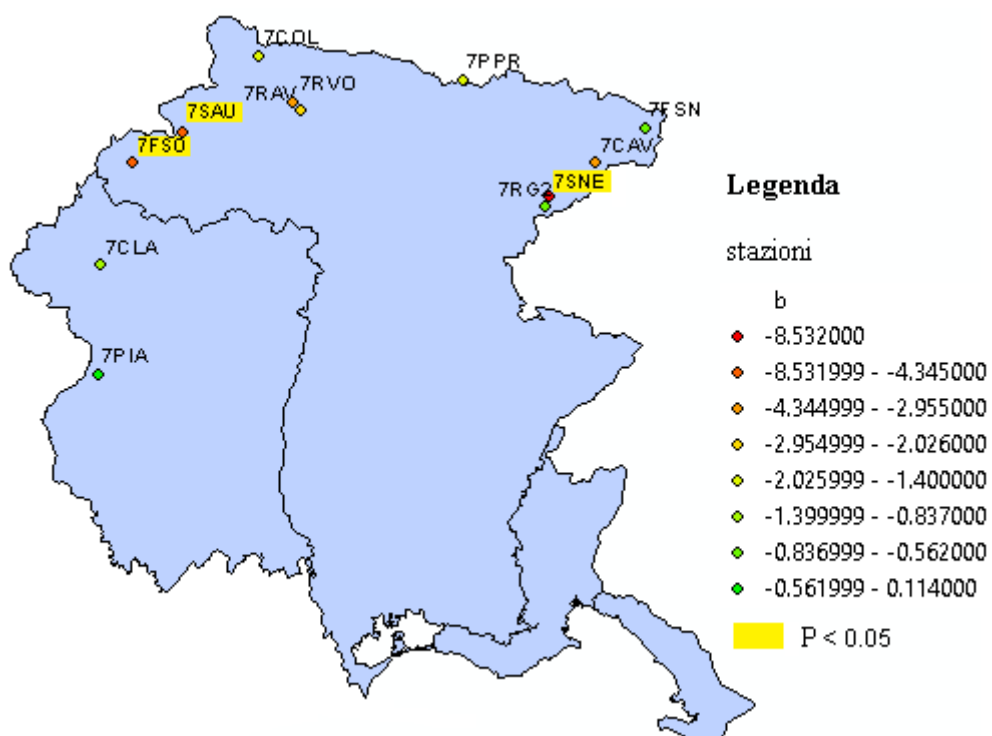


Figura 17e. Mappa con rappresentazione del coefficiente angolare b ottenuto dalle regressioni lineari effettuate sull'intera serie di dati elementari per il mese di aprile.

4. CONCLUSIONI

Questo studio è nato con l'obiettivo di valutare l'andamento delle precipitazioni nevose e l'eventuale presenza di trend sull'area montana della Regione Friuli Venezia Giulia attraverso analisi statistiche effettuate su serie storiche fornite dall'ufficio neve e valanghe della Regione Friuli Venezia Giulia. Particolare attenzione è rivolta alla presenza di dati che possano confermare o smentire il cambiamento climatico in atto.

I risultati ottenuti sono piuttosto contrastanti. Dalle regressioni lineari riferite all'intera serie storica di dati e dalle analisi sui quantili di Gumbel si evidenzia una leggera maggioranza di stazioni con trend negativo; ciò potrebbe essere in stretto legame con l'aumento delle temperature globali. Tuttavia dal calcolo delle statistiche descrittive condotte su intervalli decennali, si nota una tendenza alla diminuzione dei valori medi di precipitazioni nevose, con un minimo tra gli anni '90 e 2000, seguito da un nuovo incremento fino ai giorni nostri. Questa tendenza è confermata dalle regressioni lineari condotte negli ultimi 25 anni, dal 1990 cioè al 2014; i trend per tutte le stazioni sono positivi mostrando perciò una chiara tendenza all'incremento della nevosità. Per alcune stazioni tutto ciò è confermato dalla presenza di P-value inferiori al livello di significatività del test.

Inoltre, dalle analisi condotte sulla nevosità mensile, si osserva una tendenza all'aumento della nevosità nei mesi invernali, con particolare riferimento a gennaio e febbraio, e una tendenza alla diminuzione nei mesi primaverili tra marzo e aprile. Quest'ultima analisi perciò mostra come l'incremento misurato negli ultimi due decenni si stia concentrando nei mesi invernali che vedono infatti un incremento della nevosità. In primavera invece, i dati negativi relativi a trend decrescenti, vanno a confermare le analisi condotte dall'OSMER – ARPA secondo cui nei primi sei mesi dell'anno si riscontra una tendenza alla riduzione delle precipitazioni e il dato relativo all'incremento delle temperature globali misurato anche sulla nostra regione. Infatti dalle serie storiche, particolarmente longeve, raccolte dalle 5 stazioni meteorologiche dell'aeronautica militare collocate nel territorio regionale (precisamente ad Aviano, Rivolto, Ronchi dei Legionari, Trieste e Tarvisio) si riscontra un incremento delle temperature medie minime e massime primaverili nei trentenni di riferimento 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010. Un esempio è l'incremento delle temperature massime registrato alla stazione di Aviano nel corso degli ultimi sessant'anni. Nel mese di marzo si è passati da una temperatura media massima di 12.1 °C nei trentenni 1951-1980 e 1961-1990 a 12.6 °C nel trentennio 1971-2000 e infine a 13.0 °C nel trentennio 1981-2010; un incremento simile si può osservare per le temperature medie minime.

Negli ultimi due decenni si registra una tendenza all'incremento degli inverni meno freddi ma più umidi di un tempo, cioè con maggiori passaggi perturbati, anche con apporti precipitativi intensi in

particolare nel settore montano a causa della natura spesso orografica dei fenomeni. Sembra aumentare infatti la frequenza degli inverni particolarmente nevosi; dal 2000 ad oggi quelli più significativi sono il 2000-2001, 2003-2004, 2008-2009, 2012-2013 e infine l'eccezionale inverno del 2013-2014. Questa potrebbe essere la spiegazione più probabile in merito all'incremento delle nevicate osservato nei mesi di gennaio e febbraio nonostante sul resto del territorio regionale si osservi una tendenza alla diminuzione delle precipitazioni medie in questi due mesi dell'anno (es. Udine, Figura 8). Una ulteriore conferma all'incremento degli inverni umidi e perturbati è data dalle regressioni lineari condotte dal 1990 al 2014 dove si osserva una tendenza positiva su tutte le stazioni, dall'incremento dei centimetri medi e della numerosità degli eventi riscontrato nell'ultimo decennio. Infine la realizzazione di mappe attraverso l'utilizzo di ArcGis ha permesso di visualizzare nella Regione le tendenze di incremento o decremento delle nevicate a livello spaziale. E' emerso, nelle tendenze dal 1973 al 2014, come il calo della nevosità sia più marcato sul settore carnico rispetto a quello giuliano. Contrariamente l'incremento misurato dal 1990 al 2014 è più marcato sul settore carnico rispetto alle Alpi Giulie.

Per quanto riguarda le mappe mensili, mentre per il mese di dicembre le Alpi Carniche vedono un certo aumento delle nevicate, le Alpi Giulie registrano valori più bassi e tendenti alla decrescita. Tuttavia nei mesi successivi, tra gennaio e aprile, la tendenza si inverte; le Alpi Carniche sembrerebbero sempre sfavorite rispetto alle Alpi Giulie dove le precipitazioni nevose risultano più abbondanti. Fa eccezione il settore prealpino, con particolare riferimento alla stazione di Piancavallo, dove, nonostante sia in atto un incremento delle temperature riconducibile ai cambiamenti climatici, le importanti precipitazioni di natura orografica mantengono un trend in crescita.

5. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Braca G., Busettini M., Lastoria B., Mariani S. Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche idrologiche. 2013, ISPRA, Roma. (5.1 – Cap 5; 11.4 – Cap 11)

Casati P., Pace F., 1996. Scienze della Terra, volume II – L'atmosfera l'acqua, i climi, i suoli. CittàStudi edizioni, Milano. (Cap 5 e 6)

Giuliaci M., Giuliaci A., Corazzon P., 2010. Manuale di meteorologia, Alpha test, Milano. (9.3 – Cap 9)

Giuliaci M., Galbiati A., Bertoni G., 2010. La Neve, Alpha test, Milano. (2.4 – Cap 2; 4.2, 4.4, 4.5, 4.6 – Cap 4)

Mann, H.B. 1945. Non-parametric tests against trend, *Econometrica* 13:163-171

Mariani L., 2006. Alcuni metodi per l'analisi delle serie storiche in agrometeorologia. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, 2pp. 48-56

Micheletti S., Marigo G., Pelosini R., 2010, *Meteorologia Alpina*, AINEVA, creative commons, Trento.

http://www.arpa.fvg.it/export/sites/default/tema/osmer/allegati/PT-climatechange_short.pdf

http://www.arpa.fvg.it/export/sites/default/istituzionale/consulta/Allegati/02_Cambiamenti_climatici.pdf

http://www.aineva.it/pubblica/neve63/4_fvg.html

http://www.meteo.fvg.it/clima/clima_fvg/clima_fvg-divulgativo.pdf

http://147.162.181.35/materiale/tesaf/gregoretti/statistica_idrologia.pdf

http://www-3.unipv.it/webidra/01neveValanghe/didattica/Corso_NV_0405_Lezione_5.PDF

<http://clima.meteoam.it/atlanteClimatico.php>

http://www.mat.unimi.it/users/morale/didattica/SILSIS/lezioni/lezione_silsis2007_7.pdf