



Università degli Studi di Milano – Bicocca

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Scienze dell’Ambiente e della Terra

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie per l’Ambiente e il Territorio

Validazione delle linee guida per la valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee

Applicazione alla Valle d’Aosta

Relatore:

Prof.ssa Tullia Bonomi

Tesi di Laurea di:

Michele Bigoni

Correlatori:

Prof.ssa Maria Letizia Fumagalli

Dott. Gennaro Alberto Stefania

Dott. Rotiroti Marco

Dott.ssa Chiara Zanotti

Matricola:

701891



Università degli Studi di Milano – Bicocca

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Scienze dell’Ambiente e della Terra

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie per l’Ambiente e il Territorio

Ringraziamenti

*Desidero ringraziare la mia relatrice, Prof.ssa Tullia Bonomi,
per tutto il percorso in cui mi ha accompagnato,
dal primo giorno di lezione fino all'ultimo giorno di tesi,
per la pazienza dimostrata nel guidarmi in questo lavoro,
per i preziosi insegnamenti e per la precisione che mi ha trasmesso,
ma soprattutto per aver saputo accendere in me la passione per l'idrogeologia.*

*Un ringraziamento anche alla mia correlatrice, Prof.ssa Letizia Fumagalli,
che tiene uno dei corsi più interessanti e soddisfacenti,
per avermi insegnato il lavoro sul campo e per i consigli.*

*Grazie non di meno anche agli altri miei correlatori,
Dott. Alberto Stefania, Dott. Marco Rotiroti e Dott.ssa Chiara Zanotti,
per il fondamentale supporto e gli impagabili consigli,
per avermi aiutato in tutte quelle fasi che mi sembravano oltre le mie capacità
e per essere sempre stati estremamente gentili e disponibili.*

*Un ringraziamento speciale va alla Prof.ssa Sandra Citterio,
che mi ha convinto ad intraprendere questo nuovo percorso,
senza la quale non sarei arrivato a questo punto.*

*Un grazie di cuore anche ai miei compagni di corso,
in particolare a Eliana, Lorena, Fabrizio, Francesca, Marianna e Megi,
per avermi accolto e fatto sentire uno di loro,
facendomi sentire in una seconda famiglia.*

*Un affettuoso e profondo grazie ai miei genitori,
per la pazienza illimitata degli ultimi anni,
per avermi dato infinite possibilità e fiducia,
per aver voluto credere ancora una volta in me
e senza i quali nulla di tutto questo sarebbe mai stato possibile.*

*E, ultimo ma non meno importante, un grazie alla mia fidanzata, Sara,
per essere stata la mia ancora da quando la conosco,
per essermi sempre stata vicina con calore e amore,
per essere stata la luce che ha illuminato anche i momenti più bui,
per il coraggio che mi ha infuso e per avermi dato la forza di non mollare,
per essere stata lei stessa la motivazione per cui ho tenuto duro.*

滴水穿石

Sommario

1. INTRODUZIONE	5
2. INQUADRAMENTO NORMATIVO.....	7
3. LE LINEE GUIDA PER LO STATO QUANTITATIVO	11
3.1 Principi generali.....	11
3.2 Test 1 – Bilancio idrico.....	14
3.2.1 Fase 0: Preselezione	15
3.2.2 Fase A: Analisi della tendenza dei livelli delle acque sotterranee.....	16
3.2.3 Fase B: Analisi di bilancio idrico	18
3.3 Test 2 – Acque superficiali connesse	19
3.4 Test 3 – Ecosistemi terrestri dipendenti	21
3.5 Test 4 – Intrusione salina o di altro tipo	23
3.6 Monitoraggio.....	24
4. LA VALLE D’AOSTA.....	27
4.1 Inquadramento geografico e morfologico.....	27
4.1.1 La piana d’Aosta	28
4.2 Inquadramento climatico	29
4.3 Inquadramento geologico e litologico	31
4.4 Inquadramento geomorfologico	32
4.5 Inquadramento idrografico	34
4.6 Inquadramento idrogeologico.....	35
4.6.1 Dinamica della falda	37
4.6.2 Relazioni falda-fiume.....	39
4.7 La rete di monitoraggio quantitativo.....	39
5. ESPLORAZIONE DEI DATI	43
5.1 Il database TANGRAM	43
5.2 Raccolta delle misure piezometriche.....	44
5.3 Analisi esplorativa e consistenza dei dati	46
5.3.1 Consistenza e distribuzione delle misure totali	46
5.3.2 Criticità relative alla disponibilità e distribuzione dei dati	57
6. APPLICAZIONE DEL TEST 1 – BILANCIO IDRICO.....	61

6.1 Selezione di punti di monitoraggio significativi	62
6.2 Analisi statistica delle serie storiche selezionate	68
6.2.1 Esplorazione grafica.....	68
6.2.2 Ricerca degli outliers	84
6.2.3 Calcolo della pendenza	86
6.3 Valutazione dei trend pluriennali	89
6.3.1 Il test di Mann-Kendall.....	89
6.3.2 Il software ProUCL 5.1	92
6.4 Risultati della valutazione delle tendenze a scala puntuale	94
7. APPLICAZIONE DEL TEST 2 – ACQUE SUPERFICIALI.....	103
7.1 Metodi di classificazione delle acque superficiali	104
7.2 Risultati della classificazione	105
7.2.1 Stato ecologico dei corsi d’acqua	105
7.2.2 Stato chimico dei corsi d’acqua	106
7.2.3 Stato complessivo.....	107
7.3 Risultati del Test 2 – Acque Superficiali Connesse.....	108
8. APPLICAZIONE DEL TEST 3 – ECOSISTEMI TERRESTRI	109
8.1 Ecosistema dipendente dalle acque sotterranee (GDE)	110
8.2 Stato di conservazione degli ecosistemi	112
8.2.1 Carta degli ecosistemi.....	112
8.2.2 Carta dello stato di conservazione.....	113
8.2.3 Carta della vegetazione naturale potenziale	114
8.2.4 Copertura e stato di conservazione degli ecosistemi	115
8.2.5 Individuazione degli ecosistemi a rischio.....	115
8.3 Rete Natura2000	117
8.3.1 Zona umida Les Iles di Saint-Marcel	118
8.4 Risultati del Test 3 – Ecosistemi Terrestri Dipendenti	120
9. MONITORAGGIO	121
9.1 Caratteristiche delle serie storiche	122
9.1.1 Frequenza di monitoraggio delle serie complete	123
9.1.2 Continuità delle serie storiche	126
9.1.3 Lunghezza delle serie storiche	130
9.1.4 Distanza delle serie storiche	134

9.2 Valutazione della stagionalità nella piana di Aosta.....	136
9.2.1 Selezione dei dataset.....	136
9.2.2 Identificazione degli outliers.....	137
9.2.3 Costruzione dell'anno medio di riferimento.....	138
9.2.4 Definizione della stagionalità lungo la piana	145
9.3 Indicazioni per la definizione di piani di monitoraggio	151
10. CONCLUSIONI	155
BIBLIOGRAFIA.....	161
INDICE DELLE FIGURE	167
INDICE DELLE TABELLE.....	173
RIASSUNTO.....	175

1. INTRODUZIONE

Lo sviluppo della Comunità Europea si accompagna ad una progressiva convergenza normativa che mira all'uniformazione sull'intero territorio di quelle materie che, in virtù della propria innata mancanza di confini, non possono essere adeguatamente considerate e gestite attraverso un'amministrazione frammentata e limitata alla discrezionalità di ogni Stato membro. Questo risulta particolarmente vero per quanto riguarda la gestione delle risorse naturali, e con esse le acque, che per loro natura possono non sempre essere limitate né riconducibili a limiti politici e amministrativi definiti.

In quest'ottica sono elaborate la Direttiva Quadro sulle Acque (*Water Framework Directive* – WFD, 2000/60/CE) e la *Groundwater Directive* (GWD, 2006/118/CE) che stabiliscono il raggiungimento dell'obiettivo di *buono stato* qualitativo e quantitativo per tutte le acque in Europa, ponendo le basi per una gestione estesa e condivisa sull'intero territorio comunitario che permetta un confronto uniforme.

Il recepimento in Italia di queste direttive¹, e lo scopo di unificazione delle procedure e dei risultati, ha portato un team di lavoro² costituito da ISPRA e dalle ARPA regionali, all'elaborazione di criteri tecnici per la valutazione dello stato qualitativo e quantitativo delle acque, sia superficiali che sotterranee. Il risultato del loro lavoro è culminato nella redazione di linee guida per la valutazione dei corpi idrici e per il loro monitoraggio, e con l'ulteriore obiettivo di favorire l'omogeneizzazione dei metodi di lavoro a scala nazionale, dei criteri di analisi dei dati e di progettazione delle reti di monitoraggio.

In attesa dell'approvazione e della pubblicazione di queste linee guida, è tuttavia necessaria la validazione dei protocolli proposti che ne attestino l'applicabilità su scala locale e l'estensibilità su scala nazionale e che ne evidenzino l'efficacia o le eventuali problematiche.

In questo frangente si inserisce il presente lavoro, rivolto in particolare alla verifica delle procedure proposte nel documento “*criteri tecnici per l'analisi dello stato quantitativo e il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei*”³, attraverso la loro applicazione alla Valle d'Aosta, ed in particolare alla piana di Aosta.

¹ D. Lgs. 152/2006; D. Lgs. 30/2009

² WFD Common Implementation Strategy Groups

³ Percopo C., Brandolin D., Canepa M., Capodaglio P., Cipriano G., Gafà R., Iervolino D., Marcaccio M., Mazzola M., Mottola A., Sesia E., Testa M. (2016): Criteri tecnici per l'analisi dello stato quantitativo e il monitoraggio dei

Nei capitoli successivi sarà innanzitutto definito un inquadramento normativo, seguito da una descrizione delle linee guida in cui saranno illustrati i criteri comuni da adottare a scala nazionale in funzione dei corpi idrici sotterranei e delle interazioni con i corpi idrici superficiali. Entrando nel caso specifico, sarà fornito un inquadramento della Valle d'Aosta, con particolare riferimento alle sue componenti geografica, climatica, idrologica e idrogeologica, nonché alla sua rete di monitoraggio.

Verrà quindi descritto il lavoro svolto per la valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee⁴, illustrando le metodologie adottate ed i risultati conseguiti che hanno portato all'attribuzione di un giudizio di qualità, in particolare articolandosi nelle procedure di studio del bilancio idrico, delle acque superficiali connesse e degli ecosistemi terrestri dipendenti, attraverso l'analisi dei dati piezometrici, pluviometrici e di prelievo trattati con l'uso di Sistemi Informativi Territoriali collegati a banche dati idrogeologiche.

Nel corso dell'applicazione delle linee guida sono emerse criticità relative alle serie storiche dei dati piezometrici ed alla composizione della rete di monitoraggio che hanno aggravato le procedure necessarie alla definizione del giudizio sullo stato quantitativo delle acque sotterranee.

Queste problematiche hanno fornito lo spunto per approfondire le implicazioni dovute a serie storiche idrogeologiche incomplete o non omogenee sulla qualità del risultato finale, per arrivare ad impostare e suggerire una possibile standardizzazione della pianificazione del monitoraggio adatta alla Valle d'Aosta che punti ad un'efficienza operativa proporzionata alle necessità del territorio stesso.

corpi idrici sotterranei; SNPA "Criteri per l'analisi quantitativa di corpi idrici sotterranei ai fini della loro classificazione" – ISPRA – Manuali e Linee Guida XXX/2016, Roma, Aprile 2016

⁴ Tutte le acque che si trovano sotto la superficie del suolo, nella zona di saturazione e a contatto diretto con il suolo o il sottosuolo – D. Lgs. 152/2006

2. INQUADRAMENTO NORMATIVO

La normativa cui si fa riferimento nelle linee guida per l'analisi dello stato quantitativo delle acque sotterranee riguarda le disposizioni europee e nazionali in materia di gestione e monitoraggio delle risorse idriche, sia superficiali che sotterranee:

Direttiva Europea 2000/60/CE, (WFD), riguardante il quadro delle azioni comunitarie in materia di acque superficiali e sotterranee (recepita dal D. Lgs. 152/2006)

La Direttiva quadro sulle acque 2000/60/CE ha lo scopo di armonizzare gli interventi degli Stati membri sulle politiche di gestione delle acque superficiali e sotterranee, nonché di definire criteri, principi e metodi comuni per la gestione dei piani di bacino.

Lo scopo di base è, in particolare, quello di monitorare e migliorare lo stato delle acque, sia per garantirne un utilizzo sostenibile da parte dell'uomo sia per assicurare il buono stato degli ecosistemi superficiali (fiumi, laghi, aree umide) connessi ai corpi idrici sotterranei.

La Direttiva ha posto l'obiettivo del raggiungimento del buono stato delle acque superficiali e sotterranee entro il 22/12/2015¹. Al decorrere di tale data, ogni Stato membro deve aver individuato e cartografato i corpi idrici superficiali e sotterranei, caratterizzato i bacini e i distretti idrografici, censito le pressioni e gli impatti sui bacini, predisposto reti e piani di monitoraggio delle acque per definirne lo stato (qualitativo e quantitativo²).

Secondo quanto definito dalla WFD e per quanto concerne il presente lavoro, lo stato quantitativo *buono* o *scarso* è riferito alla presenza di pressioni antropiche sul corpo idrico. Di conseguenza, l'assenza di pressioni, intese come prelievi significativi di acque dal corpo idrico sotterraneo o dai corpi idrici connessi che alimentano le acque sotterranee, implica uno *stato quantitativo buono per definizione*³.

¹ WFD, 2000/60/CE, art. 4: *gli Stati membri proteggono, migliorano e ripristinano i corpi idrici sotterranei, e assicurano un equilibrio tra l'estrazione e il ravvenamento delle acque sotterranee al fine di conseguire un buono stato delle acque sotterranee*

² WFD, 2000/60/CE, art. 2: [lo stato quantitativo delle acque sotterranee è] *l'espressione del grado in cui in cui un corpo idrico sotterraneo è affetto da prelievi diretti o indiretti*

³ WFD, 2000/60/CE, art. 2

Decreto ministeriale del 28 luglio 2004, linee guida per il calcolo del bilancio idrico

Linee guida per la predisposizione del bilancio idrico alla scala di bacino, comprensive dei criteri per il censimento delle utilizzazioni in atto e per la definizione del deflusso minimo vitale⁴.

Direttiva Europea 2006/118/CE (GWD), riguardante la protezione quantitativa e qualitativa delle acque sotterranee (recepita dal D. Lgs. 30/09)

La direttiva quadro sulle acque sotterranee 2006/118/CE, derivante dalla WFD, istituisce misure specifiche per prevenire l'inquinamento e il deterioramento quantitativo delle acque sotterranee. Essa ha come obiettivo il raggiungimento del buono stato sia chimico sia quantitativo dei corpi idrici sotterranei, di definire standard di qualità e valori soglia delle sostanze inquinanti nelle acque e di definire i programmi di monitoraggio dello stato sia qualitativo sia quantitativo.

Decreto Legislativo 152/2006 (TUA), Testo Unico Ambientale

Esso recepisce, tra le altre, la Direttiva Europea 2000/60/CE (WFD). Tra le disposizioni presenti nel D. Lgs. 152/2006, è previsto che le Autorità di bacino competenti definiscano il bilancio idrico dei corpi idrici (o gruppi di corpi idrici o acquiferi) per la verifica dell'equilibrio tra le risorse idriche disponibili nel territorio e il loro consumo dovuto ai prelievi⁵.

Decreto Legislativo 30/2009, recepimento e attuazione della Direttiva Europea 2006/118/CE sulla protezione delle acque sotterranee

Facendo riferimento al punto 2 nell'Allegato V della WFD, il D. Lgs. 30/09 definisce le modalità di conseguimento del buono stato quantitativo, che si considera raggiunto quando il livello o la portata delle acque nel corpo sotterraneo sono tali che la media

⁴ D. Lgs. 152/2006, artt. 95-96

⁵ D. Lgs. 152/2006, art. 145, comma 1: *L'autorità di bacino competente definisce ed aggiorna periodicamente il bilancio idrico diretto ad assicurare l'equilibrio fra le disponibilità di risorse reperibili o attivabili nell'area di riferimento ed i fabbisogni per i diversi usi, nel rispetto dei criteri e degli obiettivi di cui all'art. 144 (Tutela e uso delle risorse)*

annua dell'estrazione a lungo termine non esaurisca le risorse idriche sotterranee disponibili⁶. Si stabilisce quindi la stretta relazione che intercorre tra le pressioni su un corpo idrico sotterraneo e le dirette conseguenze sia sullo stesso, a causa di un depauperamento della risorsa dovuto da prelievi superiori ai volumi di quest'ultima, sia sui corpi idrici superficiali connessi a quello sotterraneo che subiscono un degrado qualitativo ed ecologico. Le pressioni antropiche devono dunque non essere tali da (I) impedire il raggiungimento degli obiettivi ecologici per le acque superficiali connesse, (II) comportare il deterioramento della qualità chimico-fisica delle acque, (III) danneggiare gli ecosistemi terrestri dipendenti dal corpo idrico sotterraneo e (IV) causare fenomeni di intrusione salina e di altro tipo nelle acque dolci.

Qualora questi casi si verificano a causa di una diminuzione dei livelli piezometrici, anche quando le risorse siano superiori ai prelievi, il corpo idrico sotterraneo è definito in *stato quantitativo scarso*, ai sensi della normativa. È altresì considerato in stato quantitativo scarso, indipendentemente dal bilancio idrico, un corpo idrico in cui si verificano fenomeni di intrusione salina o di altro tipo (contaminazione e alterazione del chimismo degli acquiferi profondi rispetto a quelli superficiali) dipendenti dalla variazione dei livelli di falda e dei deflussi sotterranei indotta dal pompaggio.

Il D. Lgs. 30/09 fornisce in aggiunta le definizioni degli elementi idrogeologici, i criteri per identificare gli acquiferi partendo dai complessi idrogeologici e i requisiti degli stessi. In particolare non sono considerati rilevanti e sono esclusi dalla valutazione di stato gli acquiferi di limitata entità o caratterizzati da condizioni locali di circolazione delle acque, con capacità di prelievo inferiori ai 10 m³/giorno, ovvero incapaci di soddisfare il fabbisogno di 50 persone⁷.

Per consentire le verifiche definite dall'Allegato 3, il Decreto 30/09 prevede una fase conoscitiva per la ricostruzione del modello concettuale idrogeologico a scala di corpo idrico con particolare riferimento ai rapporti di eventuale interconnessione tra i diversi acquiferi e tra le acque superficiali e le acque sotterranee. In questo modo è possibile rappresentare schematicamente sia i rapporti con le acque superficiali sia i meccanismi di ricarica, intesi come area di ricarica, limiti di permeabilità e punti di recapito delle

⁶ D. Lgs. 30/2009, Allegato 3, Parte B – Stato quantitativo

⁷ D. Lgs. 30/2009, art. 1, comma 1 e Allegato 1

acque. Tale modello è di fondamentale importanza per la costruzione di un piano di monitoraggio attendibile ed efficace⁸.

Decreto Ministeriale 260/2010, criteri tecnici per la classificazione dello stato dei corpi idrici

Nel D.M. 260/10 sono riportati alcuni allegati già pubblicati all'interno del D. Lgs. 30/09, a riconferma di quanto riportato nei precedenti documenti per quanto concerne il calcolo dello stato quantitativo delle acque sotterranee.

⁸ D. Lgs. 30/2009, Allegato 4, art. 4, comma 1: [la rete di monitoraggio quantitativo] è volta a rilevare una stima affidabile dello stato di tutti i corpi idrici o gruppi di corpi idrici sotterranei, compresa la stima delle risorse idriche sotterranee

3. LE LINEE GUIDA PER LO STATO QUANTITATIVO

3.1 Principi generali

Le linee guida “*criteri tecnici per l’analisi dello stato quantitativo e il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei*”¹, elaborate dal team italiano composto da esponenti di ISPRA e delle ARPA regionali, si pongono con lo scopo di fornire i criteri tecnici per la valutazione dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei e per la programmazione del monitoraggio quantitativo, perseguendo al contempo l’obiettivo di una omogeneizzazione delle metodologie di lavoro a scala nazionale, dell’analisi dei dati e di progettazione delle reti di monitoraggio, in accordo con quanto stabilito dalla WFD.

Secondo quanto definito dalla direttiva, lo stato quantitativo è definito buono quando il livello delle acque sotterranee nel corpo idrico è tale che la media annua dell’estrazione a lungo termine non esaurisca le risorse idriche sotterranee disponibili e che il livello delle acque sotterranee non subisca alterazioni antropiche tali da impedire il conseguimento degli obiettivi ecologici per le acque superficiali connesse, pregiudicare la qualità di tali acque e recare danni significativi agli ecosistemi terrestri direttamente dipendenti dal corpo idrico superficiale. Nonostante possano verificarsi alterazioni delle linee di flusso sotterranee, esse non devono causare intrusioni di acqua salina o di altro tipo né imprimere alla direzione di flusso alcuna tendenza antropica chiaramente identificabile che possa causare tali intrusioni.²

Di conseguenza, affinché il corpo idrico sotterraneo sia in stato quantitativo buono deve rispondere ai seguenti criteri:

- i prelievi medi su lungo termine non superano l’effettiva disponibilità della risorsa idrica, al netto delle portate necessarie al mantenimento del buono stato chimico-fisico ed ecologico delle acque superficiali dipendenti da quelle sotterranee;
- il consumo di risorse idriche sotterranee dovuto a pressioni dirette o indirette non danneggia qualitativamente né quantitativamente le acque superficiali e gli ecosistemi che dipendono dai corpi idrici sotterranei;

¹ Percopo C., Brandolin D., Canepa M., Capodaglio P., Cipriano G., Gafà R., Iervolino D., Marcaccio M., Mazzola M., Mottola A., Sesia E., Testa M. (2016): Criteri tecnici per l’analisi dello stato quantitativo e il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei; SNPA “Criteri per l’analisi quantitativa di corpi idrici sotterranei ai fini della loro classificazione” – ISPRA – Manuali e Linee Guida XXX/2016, Roma, Aprile 2016

² WFD, 2000/60/CE, Allegato V, punto 2, *Acque sotterranee*

- non sono presenti fenomeni di intrusione salina o di altro tipo nel corpo idrico sotterraneo causati da alterazioni antropiche del deflusso idrico sotterraneo;

L'esito positivo dipende dal contemporaneo verificarsi di tutte queste condizioni e basta che anche solo una di esse non sia rispettata perché sia assegnato lo stato quantitativo scarso. Questo significa che la valutazione si svolge attraverso una serie di test volti ad esplorare ognuno di questi aspetti e di cui il risultato peggiore determina il giudizio finale complessivo, secondo il principio "one out, all out" (Figura 3.1).

Le risorse idriche sotterranee sono infatti definite come l'aliquota media su lungo periodo della ricarica naturale complessiva dell'acquifero al netto dell'aliquota necessaria al raggiungimento degli obiettivi di qualità ecologica per le acque superficiali connesse al fine di evitare ogni significativa diminuzione dello stato ecologico sia di tali acque sia degli ecosistemi terrestri connessi.

Questo rende quindi necessaria la distinzione tra *risorsa idrica disponibile*, che descrive la quantità d'acqua naturalmente rinnovabile che può essere estratta da un sistema idrogeologico durante un determinato periodo di tempo (Castany, 1982), e *riserva idrica*, cioè la quantità d'acqua sotterranea non rinnovabile immagazzinata nei sistemi idrogeologici (Figura 3.2).

Per consentire la valutazione dei livelli delle acque sotterranee, è dunque necessario avvalersi di un'analisi di bilancio idrico su lungo termine riferita all'unità idrogeologica, ripetuta con periodicità per confrontare i volumi medi delle risorse idriche sotterranee disponibili e i volumi medi prelevati.

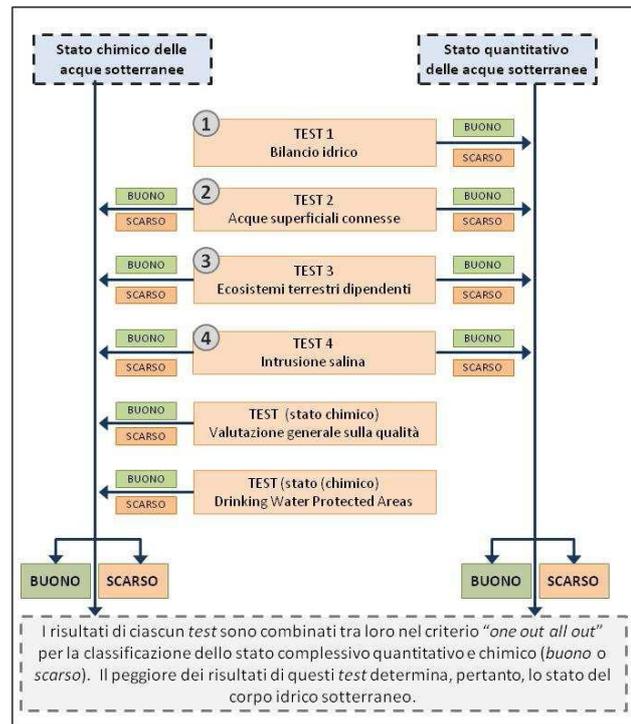


Figura 3.1: Groundwater status assessment; test per la definizione dello stato chimico e quantitativo (European Commission, 2009)

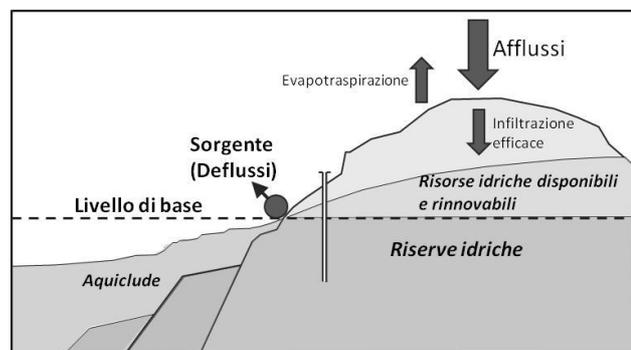


Figura 3.2: Risorse e riserve idriche

L'analisi di bilancio fa riferimento all'*unità di bilancio idrogeologico*, definita a partire dall'identificazione del *modello concettuale* dell'acquifero, ovvero lo schema di circolazione delle acque sotterranee, a sua volta realizzato tramite cartografia e sezioni idrogeologiche.

Nel modello concettuale devono in particolare essere identificate le interazioni tra le acque superficiali e quelle sotterranee e le pressioni antropiche esistenti, nonché alcuni elementi fisici (Figura 3.3) che permettono di definirlo:

- *Limiti di permeabilità*: costituiscono i confini dell'acquifero e ne definiscono dimensioni e volume;
- *Area di ricarica*: rappresenta la superficie sulla quale gli afflussi meteorici alimentano l'acquifero;
- *Punti di recapito delle acque sotterranee*: sorgenti puntuali e sorgenti lineari;
- *Direzione del flusso sotterraneo*: il movimento delle acque all'interno dell'acquifero dalle aree di alimentazione ai punti di recapito;

Il modello concettuale può essere a sua volta progressivamente alimentato e migliorato sulla base dei dati provenienti dalla rete di monitoraggio quantitativo. È proprio il monitoraggio permette di valutare il rispetto degli altri due criteri per definire il buono stato quantitativo.

I livelli piezometrici infatti rappresentano l'indicatore idrogeologico principale per il monitoraggio delle tendenze a lungo termine e degli impatti, tuttavia da soli non sono sufficienti ed è necessario integrare altri param-

etri, come ad esempio le portate dei corsi d'acqua drenanti e delle sorgenti, la direzione di flusso delle acque sotterranee, la correlazione tra precipitazioni e livelli piezometrici e parametri chimico-fisici adatti ad identificare fenomeni di intrusione salina o di altro tipo.

Tuttavia, qualora fosse identificabile un chiaro decremento persistente dei livelli su scala pluriennale causato da pressioni antropiche, la valutazione dello stato quantitativo può essere basata sui soli dati dei livelli di falda: in questo caso il corpo idrico sotterraneo è classificabile in *stato quantitativo scarso* senza la necessità di procedere ad un'analisi di bilancio idrico.

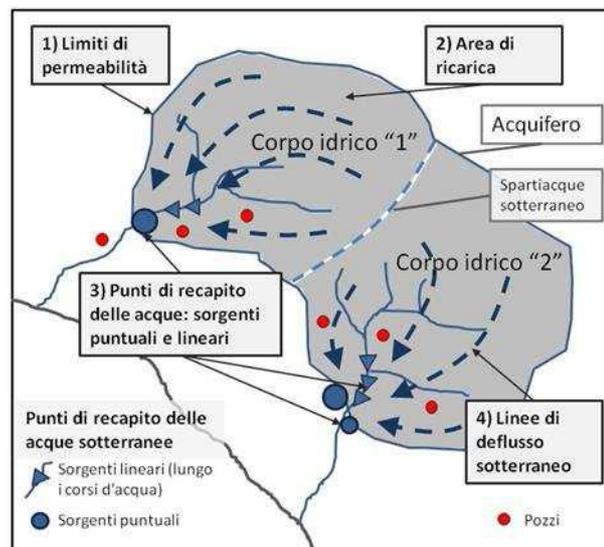


Figura 3.3: Esempio di modello concettuale di un acquifero

3.2 Test 1 – Bilancio idrico

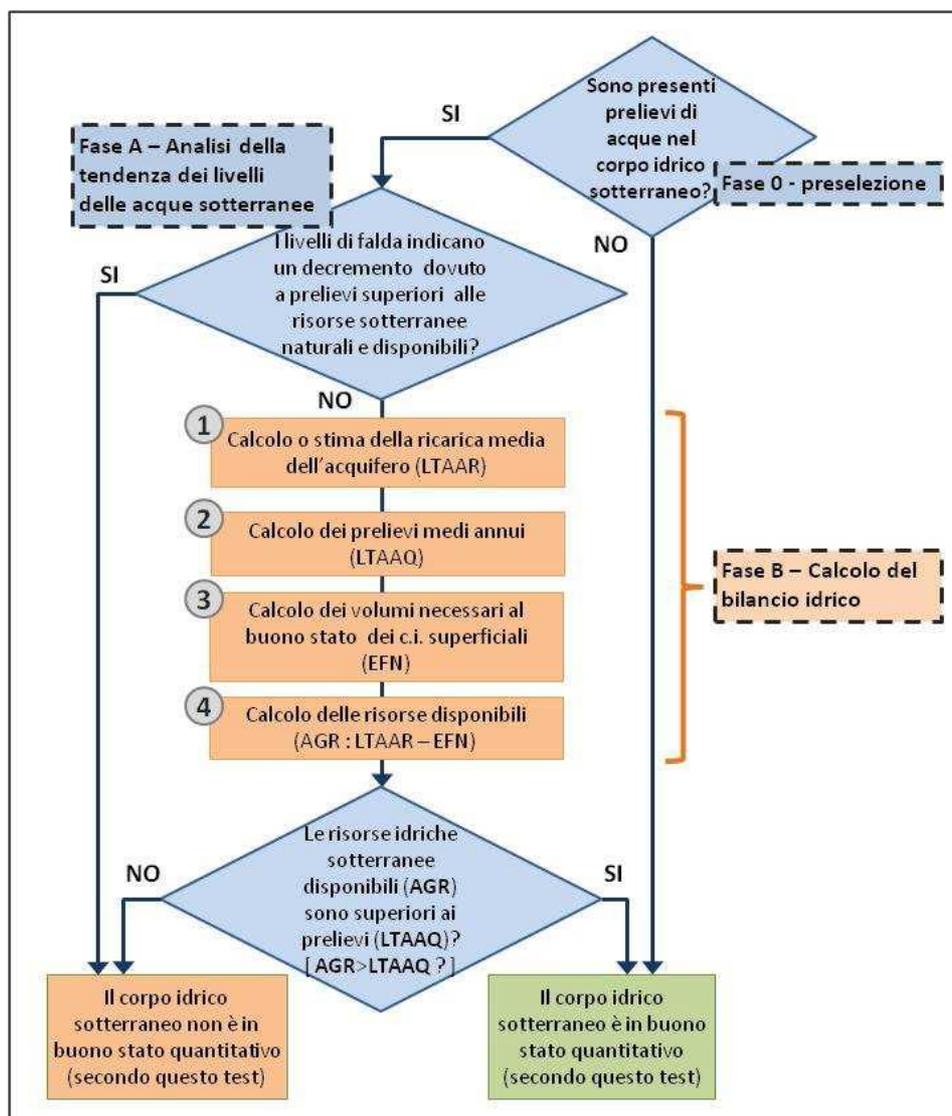


Figura 3.4: Procedura per il Test 1 - Bilancio idrico (European Commission, 2009, modificato)

Il test del bilancio idrico ha lo scopo di valutare il buono stato quantitativo attraverso la verifica dell'equilibrio tra i prelievi medi su lungo termine delle acque sotterranee e le risorse naturali disponibili, al netto dei volumi necessari al buono stato degli ecosistemi terrestri e dei corpi idrici superficiali connessi.

Il test è suddiviso in 3 fasi distinte, ognuna delle quali determina la prosecuzione o l'interruzione della procedura attraverso la conoscenza del modello concettuale e l'analisi dei dati relativi alle pressioni esistenti e ai livelli piezometrici (Figura 3.4):

- *Fase 0*: Preselezione
- *Fase A*: Analisi della tendenza dei livelli delle acque sotterranee
- *Fase B*: Calcolo del bilancio idrico

Attraverso questi passaggi, vengono innanzitutto esclusi dall'analisi i corpi idrici su cui non insistono pressioni significative e a cui viene attribuito lo stato quantitativo buono (Fase 0)³. Risultano invece sempre in stato quantitativo scarso qualora le tendenze dei livelli piezometrici siano significativamente negative (Fase A). Il bilancio idrico (Fase B) viene calcolato nei casi in cui, pur in presenza di prelievi, non si abbia evidenza statistica di tendenze negative sui livelli delle acque sotterranee.

L'obiettivo è verificare che le *risorse idriche disponibili* (AGR: *Available Groundwater Resources*), espresse come la differenza tra la *ricarica dell'acquifero* (LTAAR: *Long-Term Annual Average Recharge*) e i contributi delle acque sotterranee necessari al buono stato degli ecosistemi terrestri e dei corpi idrici superficiali (EFN: *long-term Ecological Flow Needs*), siano superiori ai *prelievi medi su lungo termine* (LTAAQ: *Long-Term Annual Average abstraction*):

$$AGR = LTAAR - EFN$$

Buono stato quantitativo: $AGR > LTAAQ$

I volumi considerati sono valori annui medi relativi ad un periodo idrogeologico rappresentativo sufficientemente lungo da non essere influenzati dai naturali cicli naturali umidi e aridi. Tale periodo è variabile in funzione delle condizioni idrogeologiche dell'acquifero e generalmente può essere fissato pari a 15-20 anni (Boni et al., 1993; Huh, 2005). In ogni caso non dovrebbe essere inferiore al periodo sessennale di gestione del bacino, considerato il periodo minimo per tener conto della naturale variabilità dei dati meteo climatici e idrologici⁴.

Il test di bilancio idrico è l'unico dei test proposti che prevede l'estensione dei risultati all'intero corpo idrico, infatti esso è relativo alla scala spaziale dell'intera unità di bilancio.

3.2.1 Fase 0: Preselezione

Con questa prima fase è possibile identificare quei corpi idrici sotterranei per cui lo stato quantitativo può essere considerato a priori buono, permettendone quindi l'esclusione dalle successive fasi di calcolo del bilancio idrico. Secondo la definizione data dalla WFD infatti, lo stato quantitativo è *l'espressione del grado in cui un corpo idrico sotterraneo è affetto da prelievi diretti o indiretti di risorse idriche*. Di conseguenza, l'assenza di pressioni, intese come

³ WFD, 2000/60/CE, art. 2

⁴ CIS Guidance WFD, Documento No 18

prelievi significativi di acque dal corpo idrico sotterranei o dai corpi idrici connessi che alimentano le acque sotterranee, implica uno stato quantitativo buono per definizione non sussistendo fattori antropici che alterino il naturale andamento dei livelli di falda.

Ciò deve comunque essere verificato e dimostrato attraverso un monitoraggio quantitativo dedicato, utile anche a caratterizzare le variazioni nel tempo dei livelli e delle portate in analogia con gli altri indicatori idrologici.

3.2.2 Fase A: Analisi della tendenza dei livelli delle acque sotterranee

Superata la fase di preselezione, ed aver quindi verificato l'esistenza di pressioni dirette o indirette sul corpo idrico che possono aver effetto sulla variazione dei livelli di falda, sull'alterazione delle direzioni di flusso delle acque sotterranee, sull'idrologia e sulla qualità dei corpi idrici superficiali connessi, si procede con l'analisi dei trend dei livelli piezometrici.

Similmente a quanto avviene per la fase 0, questa analisi permette di assegnare a priori uno stato quantitativo all'intero corpo idrico senza la necessità di procedere all'analisi di bilancio idrico; nella fattispecie, il corpo idrico viene classificato in *stato quantitativo scarso* se le tendenze dei livelli di falda su lungo periodo mostrano un chiaro decremento dei valori imputabile alle pressioni antropiche già rilevate durante la fase precedente.

Nel caso in cui, invece, si rilevi su scala pluriennale un andamento stazionario o positivo dei valori dei livelli piezometrici, allora è necessario procedere alla fase successiva ed elaborare l'analisi di bilancio. Infatti, sia per la scala locale dei dati di monitoraggio rispetto all'intero corpo idrico sia perché i volumi capaci di mantenere costanti i livelli in determinate aree possono derivare da acque superficiali connesse o corpi idrici adiacenti, i livelli idrici stazionari non necessariamente indicano un buono stato quantitativo⁵. Ciò è particolarmente vero per acquiferi permeabili per fessurazione o carsismo e caratterizzati da elevata anisotropia, per i quali l'estrapolazione di dati piezometrici a livello dell'intero complesso idrogeologico si accompagna ad elevata incertezza e margini di errore.

L'analisi della tendenza dei livelli delle acque sotterranee si compone di una prima verifica a scala puntuale su singolo pozzo, per poi essere estrapolata a livello dell'intero corpo idrico secondo quanto evidenziato dal modello concettuale dell'acquifero.

⁵ Common Implementation Strategy, European Commission, 2009

In particolare, i dati puntuali di monitoraggio registrati dalle singole stazioni devono rispondere ad alcuni requisiti ed essere sottoposti ad analisi statistiche:

- *Lunghezza della serie temporale*: scelta della lunghezza della serie temporale da considerare per il calcolo delle tendenze pari a 10-15 anni, o almeno 6 anni di misure recenti;
- *Densità serie temporale*: scelta della numerosità campionaria annua per il periodo di riferimento (2,4,6,12 misure annue per tutti gli anni del periodo di riferimento scelto);
- *Significatività della densità della serie temporale*: scelta dei valori di livello per ciascun anno da utilizzare per il calcolo delle tendenze; in particolare, quando la numerosità campionaria è di sole 2 misure all'anno, devono necessariamente essere riferite ai valori massimi e minimi dell'anno misurati nei periodi rispettivamente di massima ricarica della falda e di minimo livello utilizzando anche dati di monitoraggio automatico;
- *Completezza delle serie temporali*: scelta del numero minimo di anni e/o di misure per procedere al calcolo delle tendenze (>5 anni e/o >10-12 misure più recenti);
- *Qualità ed omogeneità dei dati*: statistica di base delle serie storiche per ciascuna stazione di monitoraggio. Analisi dei dati con grafici e calcolo dei principali indici statistici al fine di individuare la presenza di outliers (ISPRA, 2013);
- *Calcolo della tendenza dei livelli sulla singola stazione*: regressione lineare dei dati selezionati della serie storica. La tendenza è data dalla stima del coefficiente angolare della retta di regressione calcolata ed espressa in metri/anno;
- *Stima della significatività delle tendenze dei livelli*: test statistici con significatività al 95%, preferibilmente utilizzando il test di Mann-Kendall, o in alternativa test di Spearman o Pearson;
- *Attribuzione di un valore di tendenza a scala puntuale*: ad ogni stazione viene attribuito un valore puntuale di tendenza in metri/anno, che può essere stazionario, positivo o negativo (Figura 3.5);
- *Attribuzione di un livello di confidenza della tendenza a scala puntuale*: in funzione della completezza della serie, della qualità e omogeneità dei dati e delle situazioni borderline;

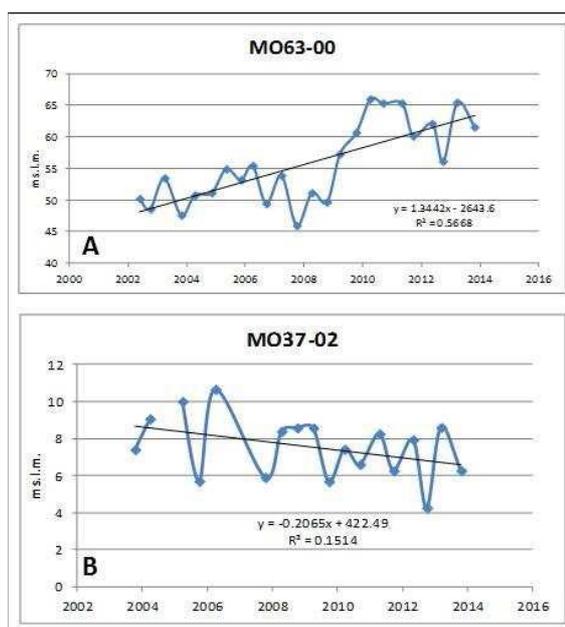


Figura 3.5: Esempi di tendenza positiva (A) e negativa (B) a scala puntuale (da: ARPA Emilia-Romagna)

I valori di tendenza a scala puntuale così ottenuti devono poi essere utilizzati per la valutazione della tendenza a scala di intero corpo idrico. L'estrapolazione della tendenza da scala puntuale a scala di corpo idrico dipende dal modello concettuale, dalla tipologia di acquifero e dalle pressioni presenti, nonché dalle caratteristiche della rete di monitoraggio.

Le modalità di spazializzazione possono essere ricondotte a due casi generali:

- *Attribuzione a ciascuna stazione di una percentuale dell'area/volume*: qualora la rete di monitoraggio non presenti un numero di punti di controllo sufficiente per una spazializzazione significativa dei dati;
- *Spazializzazione delle tendenze puntuali considerando i limiti del singolo corpo idrico o gruppi di corpi idrici*: attraverso funzione *Kriging* o funzione standard *Natural Neighbor* su una maglia con dimensione dipendente dalle informazioni disponibili e dalla dimensione del corpo idrico;

Sulla base di questa attribuzione, ai corpi idrici che presentano una tendenza negativa viene attribuito lo *stato quantitativo scarso*, mentre per i corpi idrici che presentano una tendenza stazionaria o in aumento occorre procedere alla fase successiva e quindi all'analisi di bilancio.

3.2.3 Fase B: Analisi di bilancio idrico

Il test di bilancio idrico si basa sulla valutazione dell'equilibrio tra le risorse disponibili e naturalmente rinnovabili ed il loro consumo dovuto ai prelievi e risulta buono se le risorse idriche sotterranee disponibili, per unità di bilancio, sono su lungo termine superiori ai prelievi.⁶

Il bilancio idrico necessita quindi dell'utilizzo dei dati di base idrologici e meteo-climatici per definire i termini su cui si fonda il calcolo:

- **LTAAR** (*Long-Term Annual Average Recharge*): ricarica naturale su lungo termine;
- **EFN** (*Ecological Flow Needs*): contributi delle acque sotterranee, in termini di portata media su lungo termine, necessari per il buono stato ecologico e chimico-fisico delle acque e degli ecosistemi di superficie;
- **AGR** (*Available Groundwater Resources*): risorse idriche sotterranee disponibili;
- **LTAAQ** (*Long-Term Annual Average abstraction*): prelievi medi su lungo termine;

⁶ WFD, 2000/60/CE, Allegato V: *il buono stato quantitativo di un acquifero è identificato dalla condizione di equilibrio tra i prelievi per estrazione delle acque sotterranee e la ricarica naturale, tale da non intaccare le riserve idriche e mantenere il buono stato ecologico dei corpi idrici.*

Il calcolo di questi indicatori, come accennato, avviene per mezzo dei dati di base idrologici e meteo-climatici (quali precipitazioni, evapotraspirazione reale, deflussi in ingresso e in uscita) e aggregati (e.g. precipitazione efficace).

L'indicatore principale è rappresentato dalla ricarica dell'acquifero, che corrisponde alla disponibilità di risorsa rinnovabile utile per i prelievi al netto delle risorse necessarie agli obiettivi di qualità delle acque ed ecosistemi superficiali calcolato come:

$$AGR = LTAAR - EFN$$

Questo valore, confrontato con i prelievi medi su lungo termine ($LTAAQ$) permette di determinare lo stato quantitativo del corpo idrico:

$$\text{Stato quantitativo BUONO: } \frac{LTAAQ}{AGR} < 1$$

$$\text{Stato quantitativo SCARSO: } \frac{LTAAQ}{AGR} \geq 1$$

3.3 Test 2 – Acque superficiali connesse

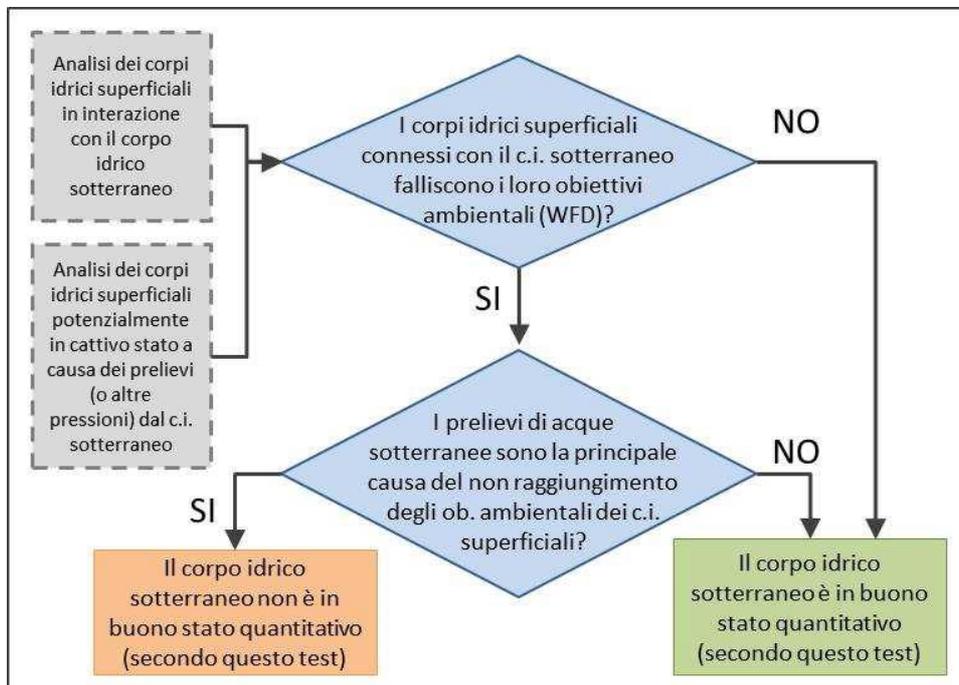


Figura 3.6: Procedura per il Test 2 - Acque superficiali connesse (European Commission, 2009)

Il concetto di continuità tra le acque sotterranee e quelle superficiali è alla base di una corretta e sostenibile gestione delle acque a scala di bacino (Winter et al., 1998).

Infatti le acque superficiali non sussisterebbero senza quelle sotterranee, che ne sostengono il deflusso alimentando la portata dei fiumi, dei laghi e delle sorgenti puntuali, così come le acque sotterranee vengono alimentate da quelle superficiali nei periodi umidi del ciclo idrologico.

Risulta dunque evidente che una valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee non può prescindere dallo stato di quelle superficiali. Pertanto, la Direttiva Quadro sulle Acque (WFD) e la Groundwater Directive (GWD) stabiliscono che un corpo idrico sotterraneo è in *stato quantitativo buono* se la qualità e la quantità delle acque superficiali connesse sono tali da permettere di raggiungere gli obiettivi di qualità chimica ed ecologica⁷. Di contro, è in *stato quantitativo scarso* se, a causa di variazioni antropiche dei livelli piezometrici o delle direzioni di flusso delle acque sotterranee, danneggia la qualità o la quantità delle acque che da esso dipendono.

Questo test prevede innanzitutto l'individuazione dei corpi idrici superficiali connessi, di cui vanno raccolte le informazioni relative allo stato ecologico e chimico delle acque superficiali, così come i parametri idrologici quantitativi da cui dipendono lo stato chimico ed ecologico.

La procedura proposta per il test si divide nelle seguenti fasi:

- *Fase 1*: verifica della capacità da parte del corpo idrico superficiale in connessione con quello sotterraneo di raggiungere gli obiettivi di qualità imposti dalla WFD;
- *Fase 2*: individuazione del superamento di uno degli standard di qualità o di uno dei valori soglia nel corpo idrico sotterraneo e verifica delle condizioni in cui i contaminanti possano essere trasferiti al corpo idrico superficiale;
- *Fase 3*: stima della concentrazione dell'inquinante trasferita al corpo idrico superficiale;

Se il carico di inquinante nel corpo idrico superficiale è significativo (e.g. se la concentrazione di inquinante nelle acque superficiali è superiore al 50% di quella originalmente presente nel corpo idrico sotterraneo da cui proviene), allora il corpo idrico sotterraneo è in *stato quantitativo scarso*.

⁷ WFD, 2000/60/CE, art. 4

3.4 Test 3 – Ecosistemi terrestri dipendenti

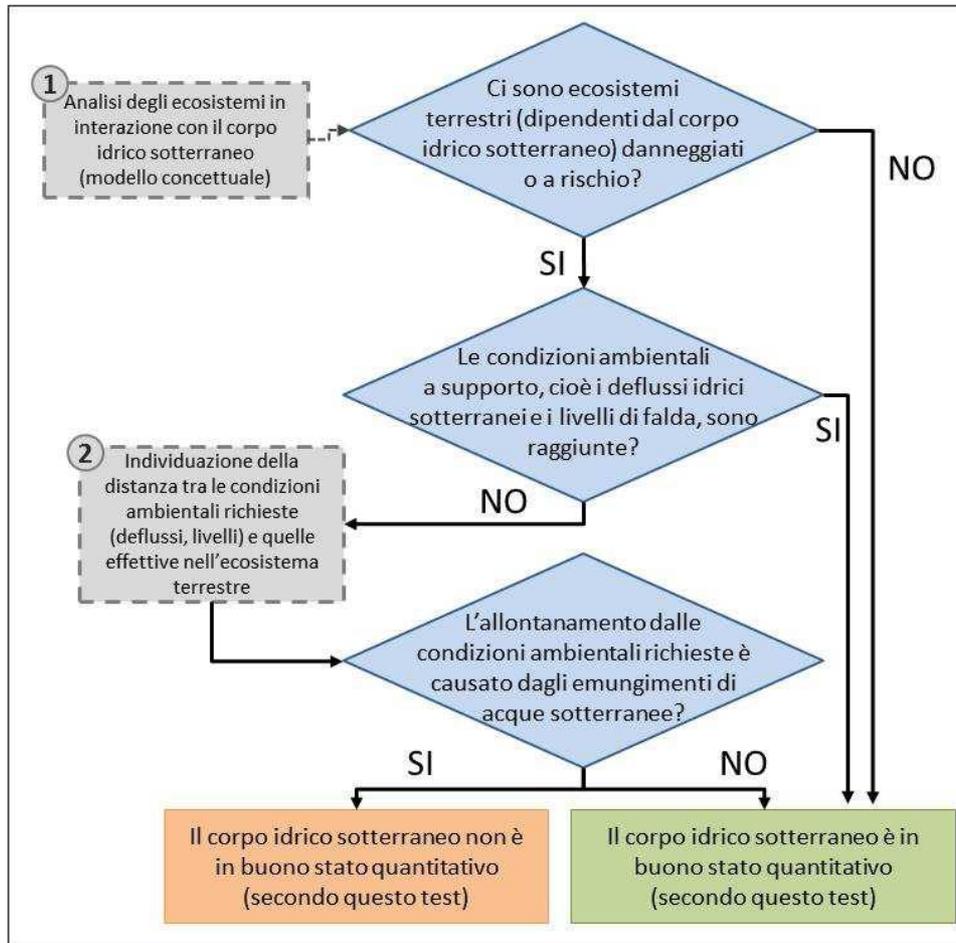


Figura 3.7: Procedura per il Test 3 - Ecosistemi terrestri dipendenti (European Commission, 2009)

Il Test 3 è strettamente legato al Test 2 in quanto, come per il precedente, il modello concettuale fornisce le informazioni relative alle interazioni tra le acque sotterranee e quelle superficiali e sul tipo di influenza che un'alterazione idrogeologica antropica può avere sia sui fiumi e sui laghi connessi sia sugli ecosistemi terrestri⁸.

In base a questo test, un corpo idrico sotterraneo è in *stato quantitativo buono* quando non si verifica un danno agli ecosistemi terrestri dipendenti dovuto ad un'alterazione antropica dei livelli del corpo idrico sotterraneo da cui dipendono (esaurimento o riduzione delle risorse idriche sotterranee, alterazione delle direttrici di flusso sotterraneo, abbassamento del livello di falda ecc.).

⁸ Common Implementation Strategy for the WFD: "Technical Report on Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems, Technical document No. 6" EC, 2011

Sulla base del modello concettuale idrogeologico concettuale vengono identificati gli ecosistemi terrestri dipendenti dal corpo idrico sotterraneo di cui si deve determinare lo stato quantitativo. In analogia a quanto avviene per il test precedente, solo i siti superficiali a rischio devono essere considerati per questa analisi e per essi devono essere determinati i parametri idrologici e ambientali che ne supportano le buone condizioni, quali ad esempio le portate e i livelli idrometrici.

Si tratta dunque di un'analisi a scala locale che si compone delle seguenti fasi:

- *Fase 1*: verifica della circostanza in cui l'ecosistema superficiale connesso con il corpo idrico sotterraneo è in uno stato qualitativo compromesso;
- *Fase 2*: identificazione del superamento di uno degli standard di qualità o di uno dei valori soglia nel corpo idrico sotterraneo e verifica della possibilità di contaminazione dell'ecosistema superficiale connesso;
- *Fase 3*: stima quantitativa della concentrazione dell'inquinante trasferito all'ecosistema superficiale, stima dell'impatto e verifica dell'esistenza di un danno;

Se viene rilevato un danno all'ecosistema superficiale dovuto a contaminazione da parte del corpo idrico sotterraneo, quest'ultimo è in *stato quantitativo scarso*.

3.5 Test 4 – Intrusione salina o di altro tipo

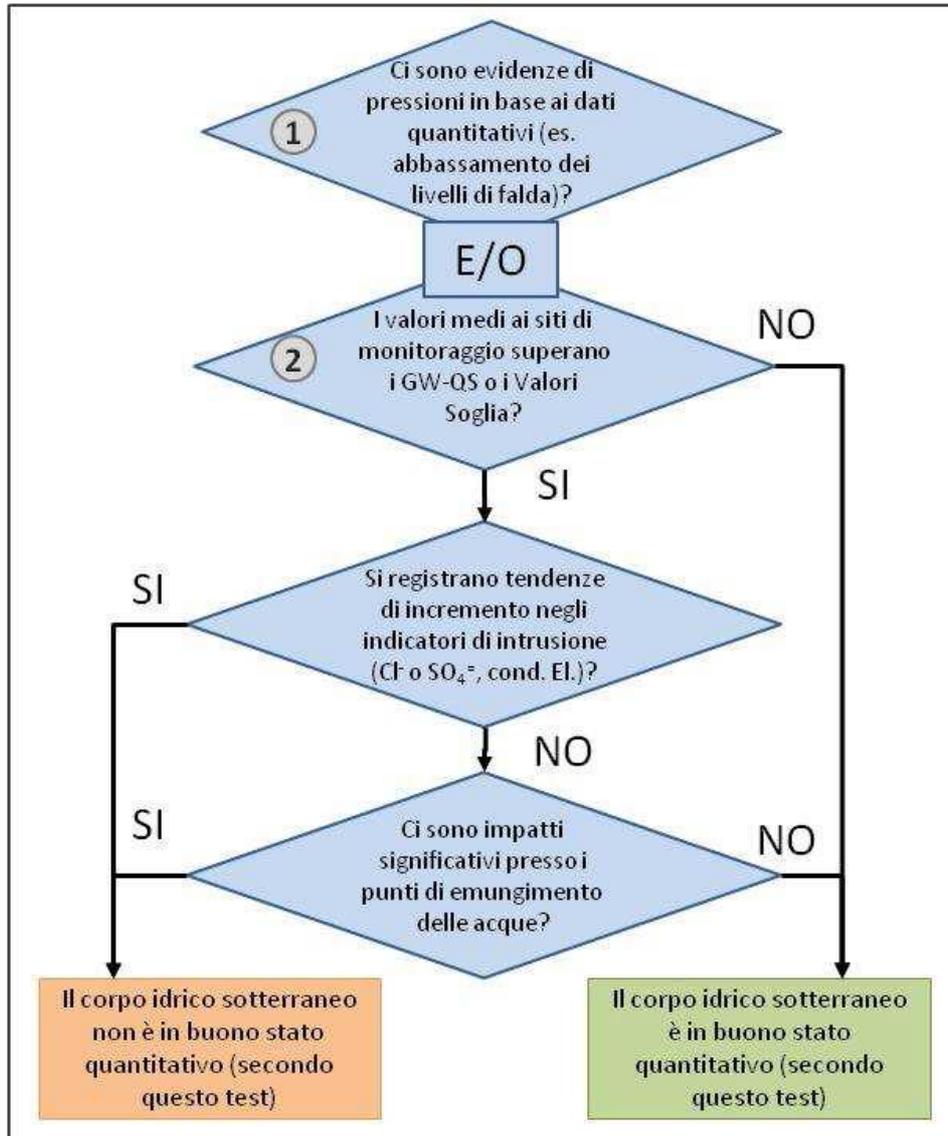


Figura 3.8: Procedura per il Test 4 - Intrusione salina o di altro tipo (European Commission, 2009)

In base a questo test, lo stato quantitativo di un corpo idrico sotterraneo è definito buono quando, su lungo periodo, non si verificano intrusioni saline o di altro tipo nella falda sotterranea.

Per quanto concerne il test 4, con *intrusione salina o di altro tipo* è intesa acqua di qualità scadente o di differente chimismo proveniente da un altro corpo idrico capace di contaminare quello sotterraneo per effetto di variazioni nel deflusso delle acque indotte dai prelievi.

Come appare evidente, questo test è legato a doppio filo alla valutazione dello stato chimico delle acque sotterranee, in quanto prevede anch'esso il monitoraggio di parametri chimico-fisici indicativi di contaminazioni da parte dell'intrusione del cuneo salino o di scarsa qualità, nonché

degli indicatori di stato quantitativo, secondo le interazioni messe in evidenza dal modello concettuale. Pertanto il monitoraggio di un corpo idrico di cui sia messa in evidenza una possibile intrusione andrà condotta, attraverso profili verticali nei pozzi in cui si registra il fenomeno, sia su indicatori di stato qualitativo (quali conducibilità elettrica, pH, temperatura delle acque, concentrazione di cloruri, solfati, sodio ed eventuali altri contaminanti) sia su indicatori di stato quantitativo (quali livelli piezometrici, direzioni di flusso sotterranee, profilazione idrogeologica, ecc.).

Analogamente ai precedenti, anche questo test è caratterizzato da una valutazione a scala locale delle osservazioni. Per estendere la valutazione alla scala dell'intero corpo idrico è dunque necessario che il fenomeno interessi un'area pari almeno al 20% dell'estensione dell'intero corpo idrico o porzioni inferiori dello stesso nel caso di aree particolarmente critiche, come quelle destinate all'approvvigionamento idrico per uso civile.

3.6 Monitoraggio

L'analisi di stato condotta al termine del ciclo sessennale di gestione del bacino per la valutazione dello stato quantitativo si basa sui dati provenienti dal monitoraggio che viene programmato in funzione del modello concettuale dell'acquifero. I risultati del monitoraggio, a loro volta, sono necessari per la validazione e l'affinamento del modello idrogeologico concettuale.

Le reti e i programmi di monitoraggio sono pertanto funzione del modello concettuale, delle pressioni su territorio e dell'*analisi di rischio* condotta all'inizio di ogni ciclo di gestione del bacino ed i risultati vengono utilizzati per l'*analisi di stato* condotta al termine del ciclo di gestione e per la verifica dell'efficacia delle misure messe in atto, in un processo di continuo miglioramento delle conoscenze sulla base dei nuovi dati acquisiti.

I programmi e le reti di monitoraggio, costituite da punti di controllo costituiti sia da pozzi e piezometri sia da sorgenti localizzate e lineari lungo i corsi d'acqua che drenano le acque sotterranee, devono fornire gli elementi necessari allo svolgimento delle seguenti analisi:

- Calcolo o stima della ricarica degli acquiferi e del bilancio idrico;
- Individuazione e monitoraggio delle interazioni tra acque superficiali e sotterranee;
- Calcolo o stima delle portate e dei deflussi sotterranei da cui dipende lo stato di qualità degli ecosistemi superficiali connessi con le acque sotterranee;
- Monitoraggio dei parametri chimico-fisici per valutare, mappare e controllare i fenomeni di intrusione salina o di altro tipo nelle acque dolci sotterranee;

I principali parametri raccolti dalla rete di monitoraggio quantitativo delle acque sotterranee sono i livelli delle falde e le portate delle sorgenti, con l'eventuale aggiunta di ulteriori grandezze utili (e.g. precipitazioni, temperatura dell'aria, ecc.). Il monitoraggio mensile dei livelli freaticometrici nei pozzi e nei piezometri, per esempio, permette l'elaborazione degli idrogrammi mensili dei livelli piezometrici, necessari all'analisi dei trend (Figura 3.9).

Allo scopo di confrontare le condizioni idrodinamiche attuali con la *condizione naturale di riferimento*, per ciascun piezometro di cui si disponga di una serie storica dei dati relativa ad almeno 10 anni di osservazioni, va calcolata la naturale fluttuazione dei livelli nell'anno medio su lungo termine.

Il livello piezometrico di riferimento è rappresentato dal range di fluttuazione idrometrica compreso tra il 25° e il 75° percentile dei valori mensili su lungo termine. Escursioni del livello attuale al di sotto della fascia di naturale oscillazione stagionale della falda su lungo termine pongono il corpo idrico sotterraneo in una *condizione di attenzione* al punto di vista dello stato quantitativo, e potrebbero suggerire di incrementare la frequenza di monitoraggio o di intraprendere misure per la salvaguardia delle risorse. In generale, valori dell'escursione del livello piezometrico al di sotto del 15-30% della naturale oscillazione stagionale sono da considerarsi *condizioni critiche* per lo stato quantitativo del corpo idrico.

La naturale fluttuazione a cui si fa riferimento è l'oscillazione dei livelli compresa tra un minimo ed un massimo stagionali in base alla ricarica dell'acquifero, non influenzata dalle pressioni attuali che vi impattano e che causano alterazioni compromettendo lo stato quantitativo. Per confrontare le condizioni idrodinamiche di periodi non troppo distanti dall'attuale, si suggerisce di effettuare l'elaborazione del periodo annuo medio di riferimento non oltre i 15-20 anni dal presente. Tuttavia, nel caso le pressioni esistano da più tempo, le condizioni di riferimento devono essere riferite al periodo precedente la nascita di tali pressioni.

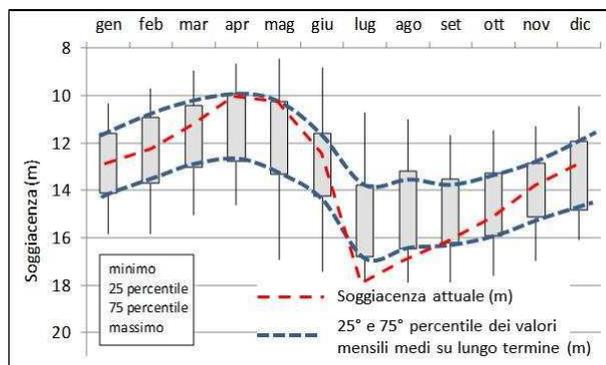


Figura 3.9: Idrogramma mensile medio dei livelli piezometrici di riferimento raccolti nel periodo 2007-2015 (da ARPA Emilia-Romagna)

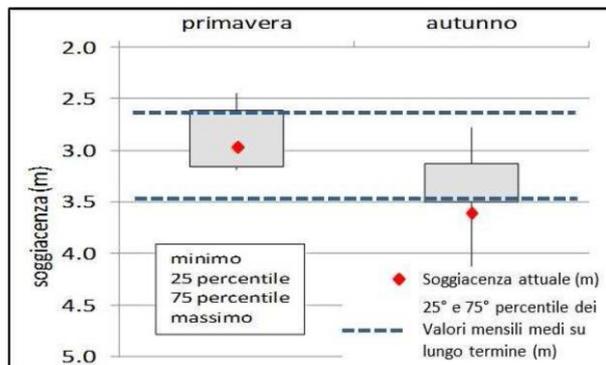


Figura 3.10: Idrogramma semestrale dei livelli piezometrici di riferimento raccolti nel periodo 2001-2015 (da ARPA Emilia-Romagna)

La periodicità delle misure di livello di falda nella rete di pozzi e piezometri dovrebbe essere almeno mensile, al fine di permettere un'elaborazione dei dati sufficientemente accurata. Tuttavia qualora non fosse possibile effettuare un monitoraggio mensile su tutti i punti della rete, andranno di conseguenza selezionati un numero inferiore di pozzi e piezometri rappresentativi.

Nel caso in cui siano assenti pozzi attrezzati per le misure in continuo, la frequenza minima di monitoraggio dovrebbe essere stagionale, privilegiando piuttosto che un gran numero di pozzi con 2 o 4 misure all'anno, un programma di misure basato su un numero minore di punti rappresentativi con misure almeno mensili. La scelta è basata sul modello concettuale e sulle caratteristiche dell'area oggetto dell'analisi, affinché contenga almeno la variabilità (minimo e massimo) dei livelli in un periodo temporale rappresentativo.

Nella peggiore delle condizioni, ad esempio nel caso si disponga di sole 2 misure/anno, di cui la prima nel periodo di ricarica della falda e la seconda nel periodo di massimo esaurimento, l'idrogramma risulterà rappresentato da due sole rette corrispondenti al 25° e al 75° percentile delle sole misure massime e minime (*Figura 3.10*).

Oltre all'idrogramma mensile e a quello mensile medio su lungo termine, i valori di livello piezometrico forniscono un'indicazione dei trend pluriennali di variazione del regime idrologico della falda, come illustrato nel Test 1 relativo al bilancio idrico (*cap. 3.2*). In questo caso, i grafici H/tempo (anni) forniscono indicazioni utili all'analisi delle condizioni di criticità del corpo idrico classificato in stato quantitativo scarso.

Il livello piezometrico fornisce due tipi di informazione a scale spaziali differenti: se usato a *scala locale*, come informazione puntuale, fornisce informazioni relativamente all'area nella quale è ubicata la perforazione, mentre a *scala del corpo idrico*, interpolandolo con gli altri piezometri della rete, contribuisce a fornire informazioni sull'intero corpo idrico permettendo anche la realizzazione di carte dell'acquifero su cui possono essere indicati i range di fluttuazione su lungo termine.

4. LA VALLE D'AOSTA

4.1 Inquadramento geografico e morfologico

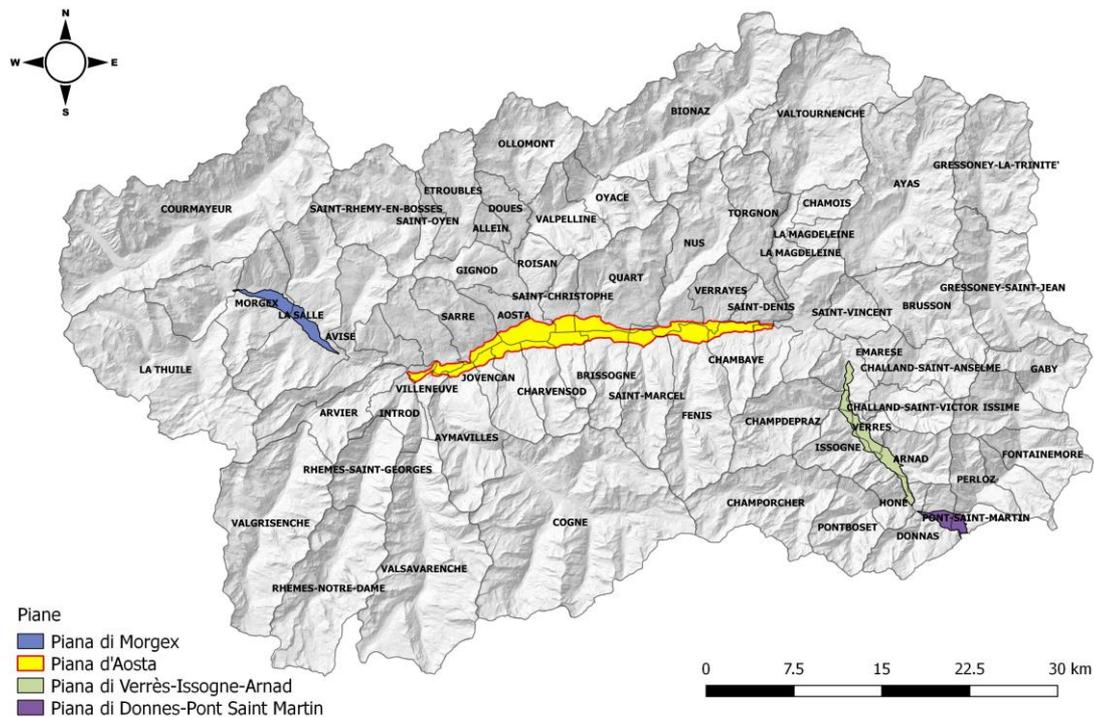


Figura 4.1: Inquadramento della Valle d'Aosta, divisa nei suoi comuni e nelle sue piane

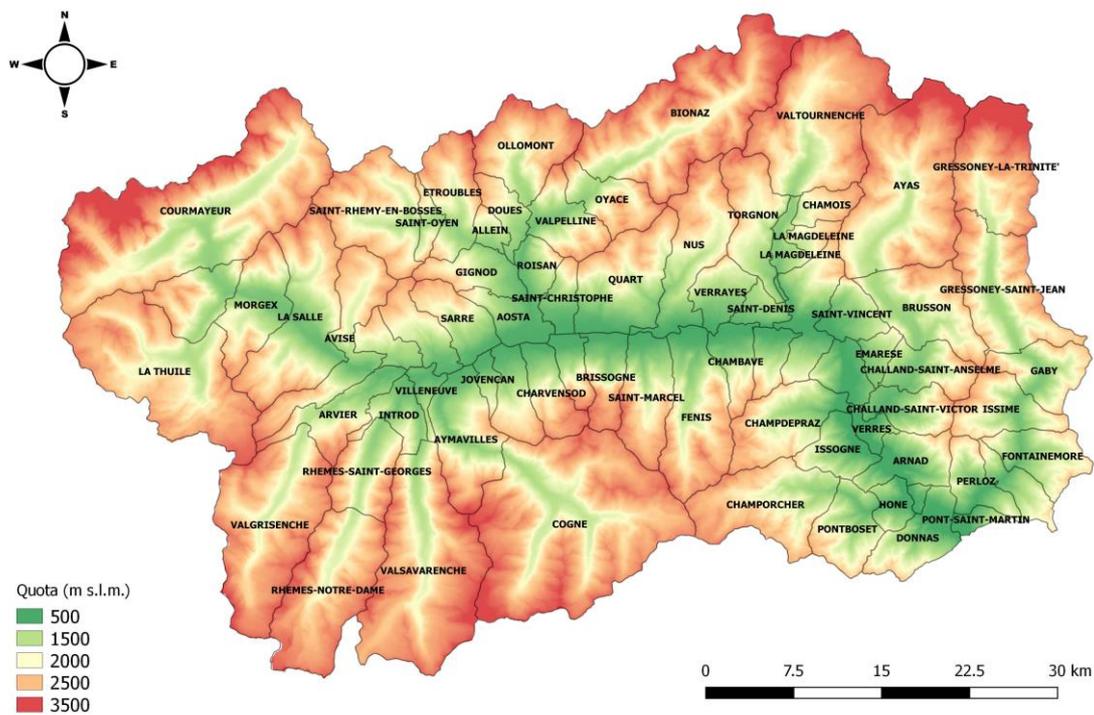


Figura 4.2: Distribuzione quote altimetriche della Valle d'Aosta

La Regione Autonoma della Valle d'Aosta è situata nella regione alpina nord-occidentale della penisola italiana, e confina a nord con la Svizzera, a Ovest con la Francia e a sud e a est con il Piemonte (*Figura 4.1*). Il capoluogo regionale è la città di Aosta che ospita circa 35000 abitanti.

Incassata tra le Alpi Pennine, a nord e a est, e le Alpi Graie, a ovest e sud, copre un'area di 3263 km² estesa in un territorio quasi interamente montuoso, con una quota media di circa 2100 m s.l.m. compresa tra estremi che vanno da 345 m s.l.m. e 4810 m s.l.m., in corrispondenza rispettivamente di Pont Saint Martin e del Monte Bianco (*Figura 4.2*).

La regione ospita imponenti rilievi, tra i quali si ricordano il Cervino (4478 m), il M. Rosa (4634 m), il Gran Paradiso (4061 m), il Rutor (3485 m) e la Grivola (3968 m), che contribuiscono a determinare un ambiente montuoso molto variabile all'interno del quale si possono identificare i tre ambienti vallivi principali:

- *Alta valle*: con una lunghezza di circa 30 km, corre in direzione NO-SE da Courmayeur (1200 m s.l.m.) a Villeneuve (700 m s.l.m.) formando la piana di Morgex;
- *Media valle*: lunga circa 35 km, attraversa con orientamento O-E l'area tra Villeneuve e Saint-Vincent (550 m s.l.m.) e ospita la piana d'Aosta;
- *Bassa valle*: i suoi 20 km di lunghezza si snodano in direzione NNO-SSE tra Montjovet (400 m s.l.m.) e Pont Saint Martin (350 m s.l.m.). In quest'area si possono a loro volta distinguere le piane di Verrès-Issogne-Arnad e di Donnas-Pont Saint Martin;

4.1.1 La piana d'Aosta

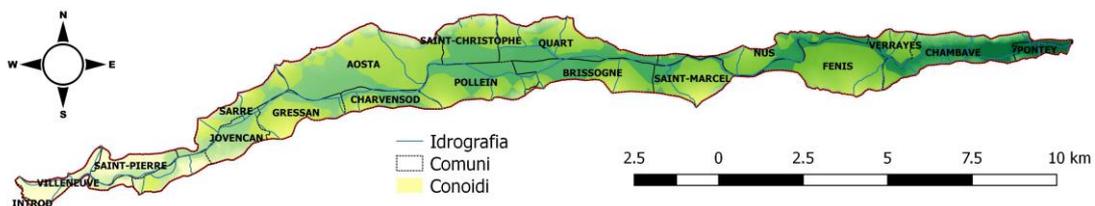


Figura 4.3: La piana d'Aosta

L'area oggetto di questo studio è la piana d'Aosta (*Figura 4.3*), che si sviluppa longitudinalmente in direzione O-E per circa 35 km tra Villeneuve e Saint-Vincent con ampiezza massima di 2 km in corrispondenza del capoluogo regionale (Aosta), e costituisce la valle principale con quote che vanno da un minimo di circa 700 m s.l.m. sui versanti occidentali a circa 460 m s.l.m. nel fondovalle orientale.

La piana d'Aosta è compresa nel bacino idrografico della Dora Baltea, la principale asta fluviale della regione, e comprende numerosi tributari sia in destra che in sinistra idrografica, tra i quali il più importante è il Torrente Buthier che attraversa il territorio del capoluogo in direzione N-S. L'andamento della Dora Baltea è fortemente influenzato anche dalla presenza di numerosi conoidi, posti sia sui versanti settentrionali che su quelli meridionali, che determinano decise deviazioni dell'asta fluviale.

Sulla piana si affacciano numerosi comuni, tra cui il capoluogo regionale, che determinano una discreta antropizzazione e consistenti emungimenti dai pozzi presenti, per servire i circa 50000 abitanti presenti nella città di Aosta e nei comuni limitrofi.

4.2 Inquadramento climatico

La morfologia della regione, caratterizzata da grandi differenze di altitudine, esposizione e orientamento dei versanti, crea un'elevata variabilità delle condizioni climatiche. In particolare, l'orientamento est-ovest dei rilievi determina condizioni climatiche e vegetazionali profondamente diverse tra i versanti nord, più aridi, e i versanti sud, più verdeggianti, a causa del diverso grado d'insolazione che risulta determinante soprattutto nei mesi invernali.

In generale, il clima della regione può essere definito di tipo semi-continentale di montagna, temperato-freddo, con precipitazioni scarse in quanto i versanti fungono da barriera nei confronti dell'aria umida che giunge dall'Oceano Atlantico (Mercalli et al., 2003).

Il regime pluviometrico è riconducibile alla tipologia sub-litoraneo alpino, caratterizzato da due minimi, in estate ed in inverno, e due massimi, in primavera ed in autunno, con una prevalenza del massimo autunnale nel settore occidentale e di quello primaverile nel settore orientale. Le precipitazioni, concentrate intorno ai rilievi, dipendono dai grandi sistemi di perturbazioni frontali attivi tutto l'anno e, su scala locale, dai sistemi convettivi che provocano precipitazioni temporalesche nel periodo estivo. A causa della protezione offerta dalle catene montuose, le perturbazioni tendono ad esaurirsi lungo i versanti e a raggiungere notevolmente impoverite le zone interne, sia in termini di quantità sia di durata (*Figura 4.4 e Figura 4.5*). Questo genere di perturbazioni generalmente scaricano la maggior parte dell'umidità sui versanti sopravvento dei primi rilievi, mentre sui versanti sottovento si possono instaurare condizioni di vento discendente mite e asciutto (*föhn*). Nella zona di Aosta, oggetto di questo studio, si registrano infatti le precipitazioni minori di tutto l'arco alpino (circa 500 mm annui), con valori minimi nella

zona tra Villeneuve, Aosta e Chatillon ed un progressivo aumento allontanandosi dal tratto centrale (Novel, 1995).

Ciononostante, la zona di fondovalle gode di una situazione favorevole ai fini della disponibilità idrica grazie alla presenza di ghiacciai e di consistenti accumuli nevosi che costituiscono un importante fattore di ricarica durante il disgelo.

Le precipitazioni di carattere nevoso sono influenzate prevalentemente dall'area considerata, variando principalmente in funzione della quota, con valori di accumulo che oscillano tra i 70-100 cm a 600 m s.l.m. a spessori superiori agli 8 m al di sopra dei 3000 metri (Figura 4.6).

La temperatura media annua varia da 10-12°C nel fondovalle centrale, in corrispondenza della piana di Donnas e di Aosta (583 m s.l.m.), a circa 7.5°C a 1200 m s.l.m., fino a 0°C intorno ai 2500 metri (Figura 4.7). I giorni di gelo, con temperature inferiori agli 0°C, ammontano a circa 100 giorni all'anno a 500 metri, a 177 a 1500 metri a 290 a 3000 metri di quota, con un incremento di circa 8°C ogni 100 metri (Mercalli et al., 2003).

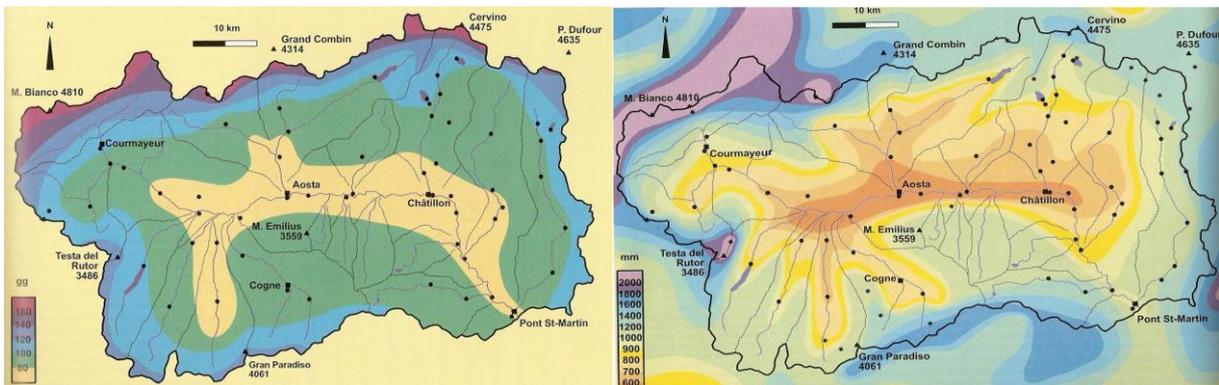


Figura 4.4: Numero medio di giorni piovosi (Mercalli et al., 2003) Figura 4.5: Carta delle isoiete, valori medi 1920-2000 (Mercalli et al., 2003)

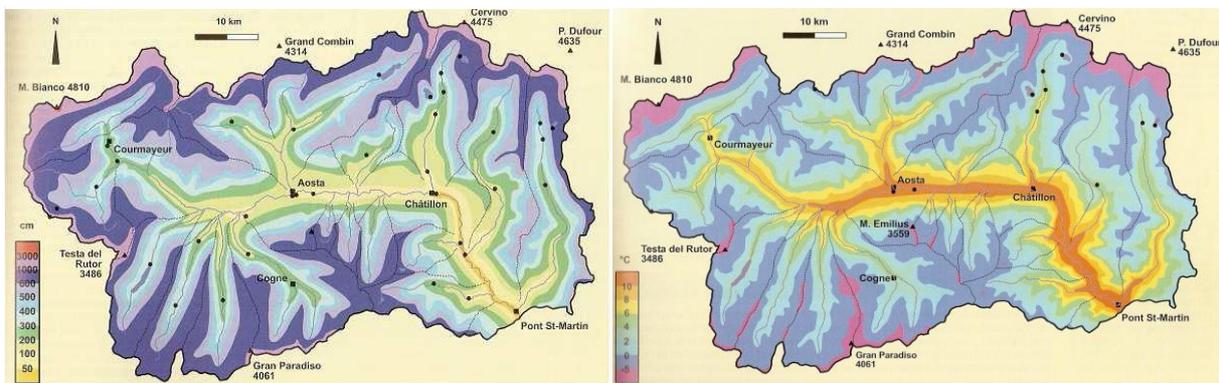


Figura 4.6: Quantità media annua di neve, 1920-2000 (Mercalli et al., 2003) Figura 4.7: Carta delle isoterme medie annue tra i 500 e i 3500 metri, 1950-2002 (Mercalli et al., 2003)

4.3 Inquadramento geologico e litologico

La Valle d'Aosta è situata nella catena montuosa delle Alpi, facente parte del sistema orogenetico alpino-himalayano e originatasi da fenomeni di progressiva chiusura e subduzione dell'oceano mesozoico della Tetide e dalla successiva collisione, tuttora in corso, tra la placca europea e quella africana, con subduzione della prima sotto la seconda, che ha formato una struttura a doppia vergenza: una europea (o alpina) con direzione nord-ovest, ed una sud-vergente (o subalpina) che comprende le Alpi Meridionali. Le due vergenze sono separate da una faglia, denominata Lineamento Periadriatico, o Linea Insubrica, che dalla pianura panonica, in Ungheria, giunge fino nei pressi di Torino (Bosellini, 2005).

La Valle d'Aosta ricade interamente nella vergenza europea e costituisce la principale depressione assiale delle Alpi Occidentali. Procedendo in direzione O-E, è possibile identificare in successione i seguenti sistemi:

- Dominio Elvetico-Ultraelvetico;
- Dominio Pennidico;
- Dominio Austro-alpino;

La conca di Aosta risulta costituita da falde di sovrascorrimento del dominio Austro-alpino (Falda di Dent Blanche) e di quello Pennidico (zona Piemontese dei calcescisti con pietre verdi).

Il dominio Austro-alpino (Falda di Dent Blanche) litologicamente è costituito principalmente Gneiss d'Arolla, generalmente a grana fine, e scisti derivati dal metamorfismo i graniti ed orneblenda.

Il dominio Pennidico, che affiora nei pressi della città di Aosta, si caratterizza invece come un sistema composito di falde, posto tra quelle pennidiche sottostanti (Monte Rosa e gran Paradiso) e quelle austroalpine soprastanti (Sesia-Lanzo e Dent Blanche). La litologia che lo costituisce si presenta costituita principalmente da ofioliti (prasiniti e metaglabbrri, accompagnati da piccole masse di serpentiniti) e calcescisti derivanti dal metamorfismo di basso grado di sedimenti post-triassici. Sul versante destro rispetto alla Faille Aoste-Ranzola, lineamento di fratturazione di andamento est-ovest, la litologia presenta unità ofiolitiche a metamorfismo eclogitico, con interposizioni di rocce carbonatiche triassico-giurassiche (Fascio di Cogne). In particolare si evidenzia la presenza di depositi evaporitici e di evaporiti (carniole, gessi, anidridi) generalmente poste sul versante destro della Dora Baltea, nella fascia compresa tra i comuni di Gressan e di Aymavilles.

4.4 Inquadramento geomorfologico

Il territorio della Valle d'Aosta presenta i tipici tratti di un ambiente glaciale caratterizzato da una morfologia a "U" della vallata principale.

La morfogenesi è stata controllata in modo determinante dai fenomeni legati alle glaciazioni, in particolare durante il Pleistocene, che hanno modellato sia le zone alle quote maggiori sia i settori di fondovalle. Nel periodo di massima espansione, nel corso del Würmiano, l'attuale fondovalle principale risultava interamente occupato dal ghiacciaio Balteo, un'imponente formazione di potenza stimata di circa 1000-1100 metri.

Il ritiro del ghiacciaio, avvenuta con oscillazioni di varia entità, ha originato diversi apparati morenici di varia estensione e potenza, tra cui l'anfiteatro morenico di Ivrea, dove il Balteo si spinse fino all'attuale Piemonte, e cinque apparati morenici frontali: i complessi di Pont St. Martin, di Bard, di Fénis, di Aosta (sepolto sotto la piana di Pollein) e di La Salle (Carraro, 1991).

Il basamento cristallino su cui poggia la piana d'Aosta, pur non essendo mai stato raggiunto da perforazioni, è stato studiato con indagini geofisiche fin dagli anni '70¹, che hanno evidenziato una marcata depressione sita nel settore centrale della piana e originata dall'azione erosiva del ghiacciaio sul substrato roccioso (*Figura 4.8*). Il basamento, con una profondità di circa 400 m s.l.m. sotto Gressan, si approfondisce progressivamente verso est, raggiungendo ad Aosta la profondità massima di circa 200 m s.l.m., per poi risalire lentamente ai 400 m s.l.m. nei pressi di St. Marcel e scendere nuovamente fino ad una quota stabile di circa 270 m s.l.m. a Nus.

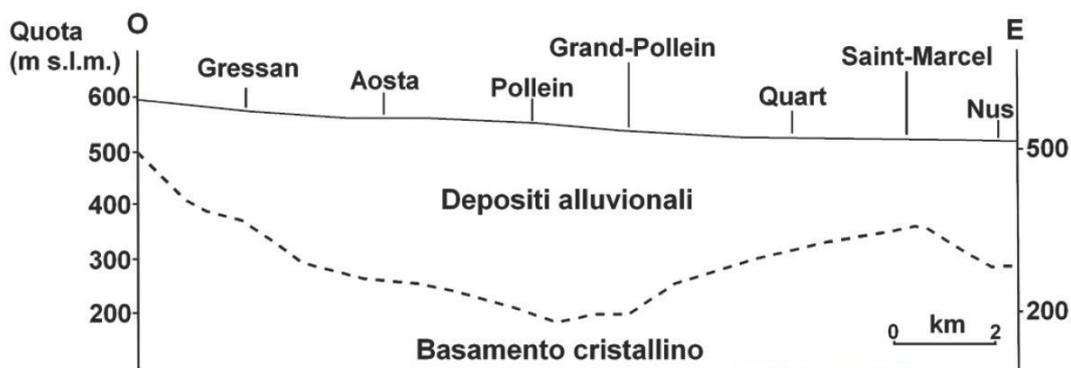


Figura 4.8: profilo longitudinale della piana d'Aosta (Bonetto & Gianotti, modificato 1998)

¹ Armando e Dal Piaz, 1970; Armando E., 1971; P.I.A.H.V.A., 1992, 1994 e 1996; Bonetto & Gianotti, 1998; Dal Piaz et al., 2010; ARPA Valle d'Aosta, 2011

Successivamente ai processi erosivi würmiani, i processi di sedimentazione, sia di natura lacustre che alluvionale, hanno colmato la depressione con depositi quaternari. Con il progressivo ritiro del ghiacciaio Balteo e il verificarsi di un imponente crollo (frana del M. Avi), nella conca di Aosta si è formato un ampio lago, i cui immissario ed emissario principali erano rappresentati dalla Dora Baltea e nei pressi dei quali si sono generate ampie conoidi di deiezione con deposizione di materiale sia grossolano che fine alla cui base si sono conservati i depositi lacustri fini e stratificati.

La successiva diminuzione del livello idrico e lo svuotamento del lago, provocati dall'azione erosiva dell'emissario del bacino lacustre, hanno successivamente reso la piana un fondovalle alluvionale percorso dalla Dora Baltea e modellato dai meandri fluviali.

Successivamente, una seconda frana nei pressi di Fénis ha originato un secondo lago, più piccolo del primo, a sua volta progressivamente colmato da sedimentazione lacustre e soprattutto fluviale (Money, 1997).

I depositi quaternari di riempimento presenti possono essere suddivisi in:

- *Depositi di origine lacustre*: le indagini iniziate da Arnaldo nel 1970 e confermate da P.I.A.H.V.A. descrivono questi depositi, posti tra i depositi del ghiacciaio Balteo di fondo e quelli alluvionali sovrastanti, come costituiti da limi con una differenziazione granulometrica in senso verticale, fini alla base e sovrastati da sedimenti via via più grossolani, e longitudinale con classazione decrescente da monte verso valle. Sebbene nessuna perforazione abbia stabilito l'effettiva potenza dello strato, si stima una potenza ettometrica, il cui tetto raggiunge anche i 510-520 m s.l.m. nella zona a monte, opera della prima successione lacustre. Verso valle a partire da Pollein e ad una quota più superficiale (525 m s.l.m.) si riscontra un ulteriore strato di limi, intercalato da sedimenti più grossolani, di potenza ed estensione inferiori al primo e riconducibile alla seconda deposizione lacustre (Pollicini, 1994).
- *Conoidi alluvionali di origine torrentizia*: sono costituiti da materiale di granulometria eterogenea, mal classato e scarsamente arrotondato. Sono riferibili a deposizioni continue ad opera dei numerosi affluenti laterali a carattere torrentizio che progressivamente hanno contribuito alla costruzione di conoidi di deposizione sia aeree che subacquee che tuttora modellano l'andamento principale del fiume. Questi depositi sono localizzati principalmente tra Sarre ed Aosta, dove raggiungono uno spessore di circa 50 metri, e il cui esponente di maggior estensione, 3 km², è la conoide del torrente Buthier.

- *Depositi alluvionali della Dora Baltea*: sono generalmente formati da elementi di dimensioni variabili, da grossolani a fini, in funzione dell'energia di deposizione, ben arrotondati e ben classificati, che riflettono la variegata composizione petrografica dei diversi bacini alimentatori di monte, con intercalazioni di blocchi derivanti da crolli delle conoidi ai margini della valle. Si stima una potenza di queste deposizioni di circa 30 m a Sarre, tuttavia se si considera il contributo delle formazioni grossolane si può arrivare ad 80 metri. A valle di Aosta la granulometria decresce progressivamente mantenendo un carattere ghiaioso fino all'intercalazione di uno strato limoso originatosi dalle deposizioni del lago più recente; la formazione ghiaiosa più superficiale tra la zona di St. Christophe e di St. Marcel raggiunge una potenza di 15-20 metri (P.I.A.H.V.A., 1992-1994). Tali formazioni, in virtù degli elevati valori di permeabilità e porosità, ospitano le falde sfruttate dai pozzi.

4.5 Inquadramento idrografico

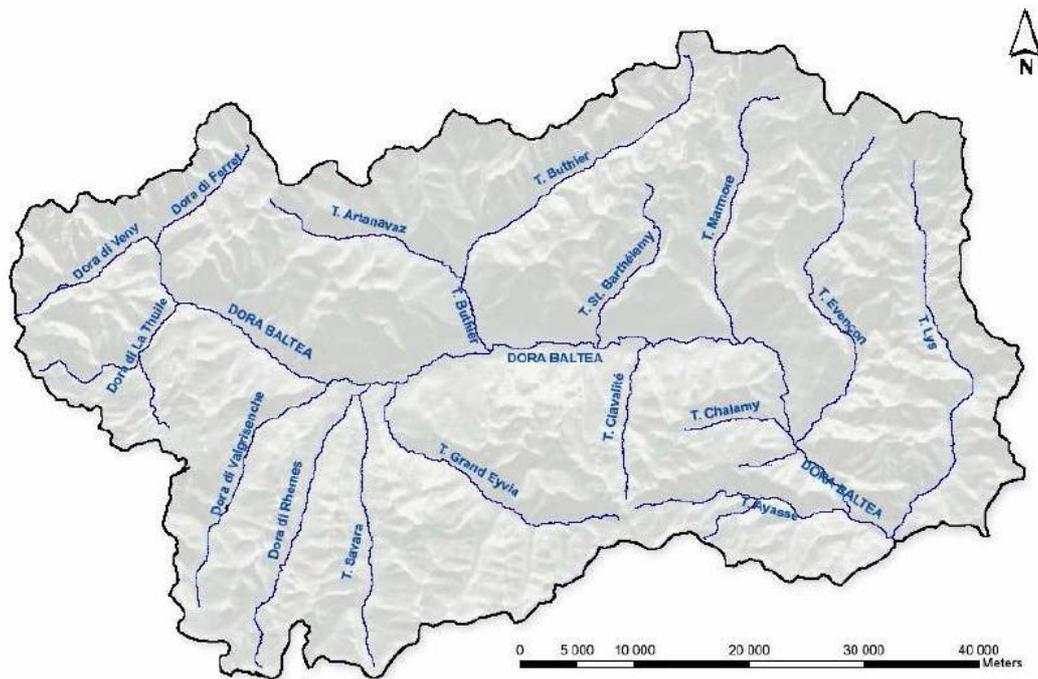


Figura 4.9: Idrografia della Valle d'Aosta (ARPA Valle d'Aosta)

La Valle d'Aosta ricade interamente nel bacino idrografico della Dora Baltea, di estensione complessiva di 3930 km², riconducibile al più ampio bacino idrografico del fiume Po. La Dora Baltea nasce nel massiccio del Monte Bianco attraverso la confluenza della Dora di Veny e della Dora di Ferret, che raccolgono le acque dei ghiacciai (che coprono una superficie di circa 120 km²) e dei numerosi torrenti minori, e scorre per circa 100 km in territorio valdostano, di

cui 40 km nella piana di Aosta, per poi immettersi nel Po dopo altri 60 km in territorio piemontese.

Durante il suo percorso, caratterizzato da un andamento piuttosto sinuoso e a tratti sub-rettilineo contornato da versanti scoscesi, raccoglie le acque di numerosi tributari (*Figura 4.9*):

- in sinistra idrografica la Dora di Ferret e i torrenti Buthier (a sua volta confluenza di Buthier d'Ollomont e Buthier d'Artanavaz), Saint-Barthélemy, Marmore, Evançon e Lys;
- in destra idrografica la Dora di Veny, la Dora di La Thuile, la Dora di Valgrisenche, la Dora di Rhêmes e i torrenti Savara, Grand-Eyvia, Clavalité, Chalamy e Ayasse;

Il regime idrologico nei corsi d'acqua presenti nella regione possono essere ricondotti a due tipologie principali: glaciale e nivo-glaciale. Il primo dipende dal solo scioglimento dei ghiacciai e presenta un solo massimo in corrispondenza dei mesi estivi centrali e portate pressoché nulle in inverno ed è caratteristico delle porzioni alle quote più elevate; il secondo, che coinvolge anche la piana d'Aosta, presenta un massimo estivo nei mesi di maggio-giugno ed un minimo autunnale in settembre seguendo i cicli nivali di deposizione solida invernale e scioglimento primaverile.

4.6 Inquadramento idrogeologico

I depositi quaternari di tipo sabbioso-ghiaioso ad elevata permeabilità che caratterizzano le zone pianeggianti di fondovalle ospitano acquiferi, molto produttivi e fondamentali per l'approvvigionamento, il cui contenuto idrico è legato all'apporto di acqua sia dai versanti attraverso gli scioglimenti stagionali sia dai corpi idrici superficiali.

Nonostante la reale geometria dell'acquifero presente sotto la piana d'Aosta non sia ancora stata descritta con chiarezza, si può considerare un'estensione laterale limitata dagli innalzamenti dei rilievi collinari e montuosi con restringimenti trasversali e vi si possono identificare due aree principali (*Figura 4.10*):

- nella zona a monte, tra Sarre e la città di Aosta, i depositi sabbiosi-ghiaiosi e grossolani ospitano una falda dalla potenza di circa 80m, localmente con presenza di livelli limosi;
- nella zona a valle, a partire da Pollein, un livello limoso di circa 5m definisce la separazione tra due acquiferi, di cui uno freatico ed uno semiconfinato. La falda libera e superficiale ha una potenza di circa 20-30 metri e caratteristiche analoghe alla falda

presente a monte di Aosta, mentre l'acquifero profondo ha spessore decrescente in direzione ovest-est dai 25 metri nella zona di Pollein ai 12 metri nella zona di Brissogne. La presenza di due acquiferi è stata accertata sulla base delle stratigrafie disponibili e delle caratteristiche chimiche rilevate da alcune terebrazioni, e la quasi totalità dei pozzi presenti nella zona prelevano acqua da quello superficiale.

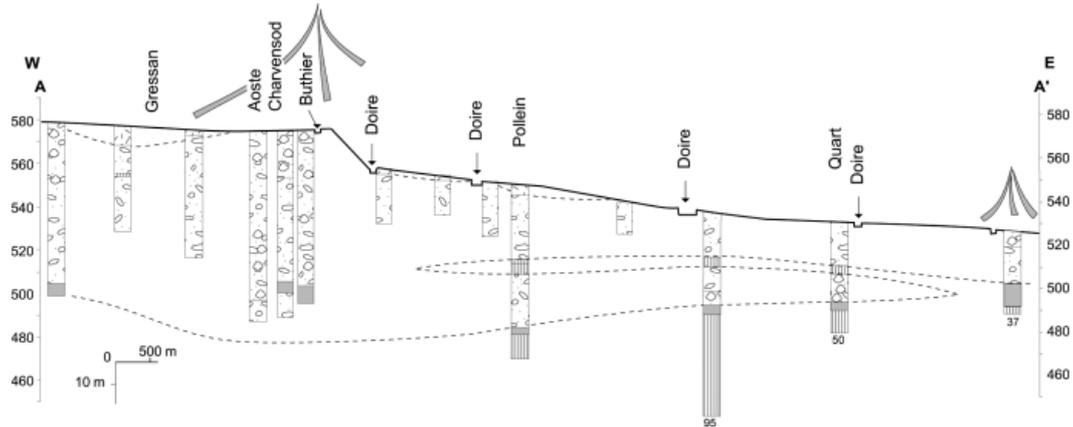


Figura 4.10: Sezione longitudinale del corpo idrico della piana d'Aosta (Triganon, 2003)

I parametri idrogeologici dell'acquifero ricavati da bibliografia (Tabella 4.1) sono propri di un acquifero molto produttivo e, considerando che gli emungimenti annui complessivi dai pozzi dell'acquedotto cittadino sono di circa 6 milioni di m³ e quelli della maggior realtà industriale della piana (CAS, ex Cogne Acciai Speciali) raggiungono circa i 18 milioni di m³, si delinea la presenza di un acquifero molto potente.

Parametro	Valore	Fonte
Trammissività media	T 10^{-1} m ² /s	Pollicini, 1994; Bianquin, 2010
Conducibilità idraulica media	K 10^{-3} m/s	Pollicini, 1994; Bianquin, 2010
Gradiente idraulico (intera piana)	i $5 \cdot 10^{-3}$	ARPA V.d.A., 2005
Gradiente idraulico (a monte di Aosta)	i $5 \cdot 10^{-3}$	De Maio, 2010
Gradiente idraulico (a valle di Aosta)	i $3 \cdot 10^{-3}$	De Maio, 2010

Tabella 4.1: Parametri idraulici della piana d'Aosta

4.6.1 Dinamica della falda

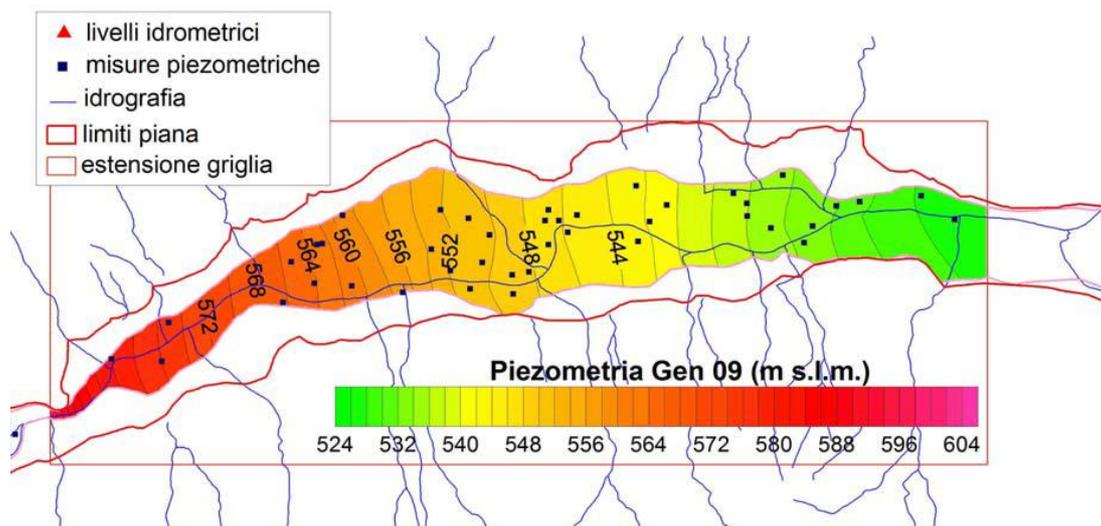


Figura 4.11: Carta piezometrica riferita a gennaio 2009 (Bonomi, Fumagalli, Canepa & Benastini, 2012)

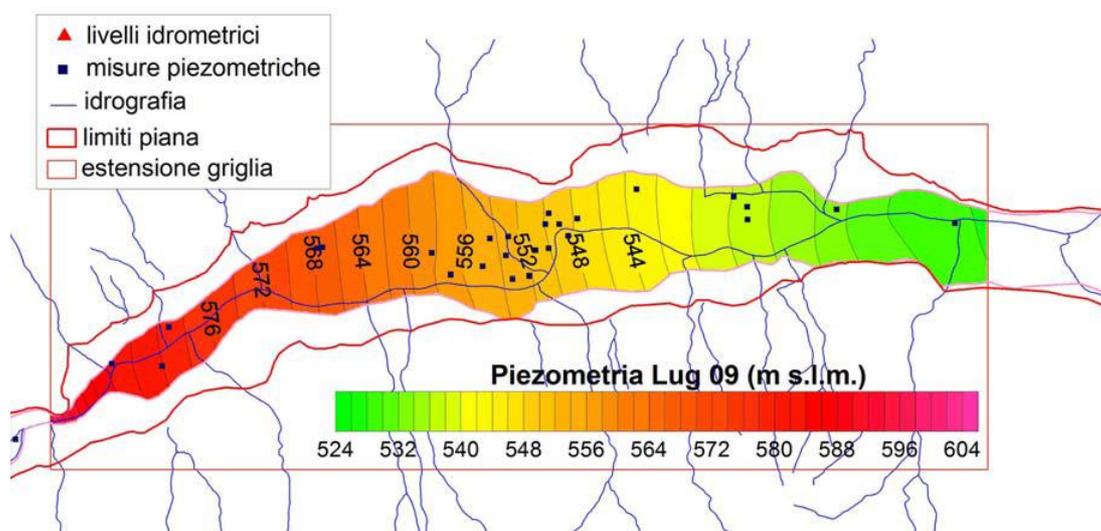


Figura 4.12: Carta piezometrica riferita a luglio 2009 (Bonomi, Fumagalli, Canepa & Benastini, 2012)

La falda scorre in direzione ovest-est con un gradiente piuttosto regolare, seguendo in generale l'andamento della Dora Baltea ed in accordo con il gradiente topografico del fondovalle. La morfologia piezometrica non varia sensibilmente nel corso dell'anno, nonostante sia possibile identificare un gradiente inferiore durante l'inverno in corrispondenza del torrente Buthier, che potrebbe suggerire un possibile rapporto di alimentazione della falda da parte di quest'ultimo (Bianquin, 2010).

L'escursione stagionale della falda, per la quale si rimanda al capitolo 6, appare massima nelle aree occidentali a monte di Aosta, con fluttuazioni maggiori di 5 metri, e decresce progressivamente verso est fino a raggiungere valori minimi, circa 1m, nei dintorni di Brissogne.

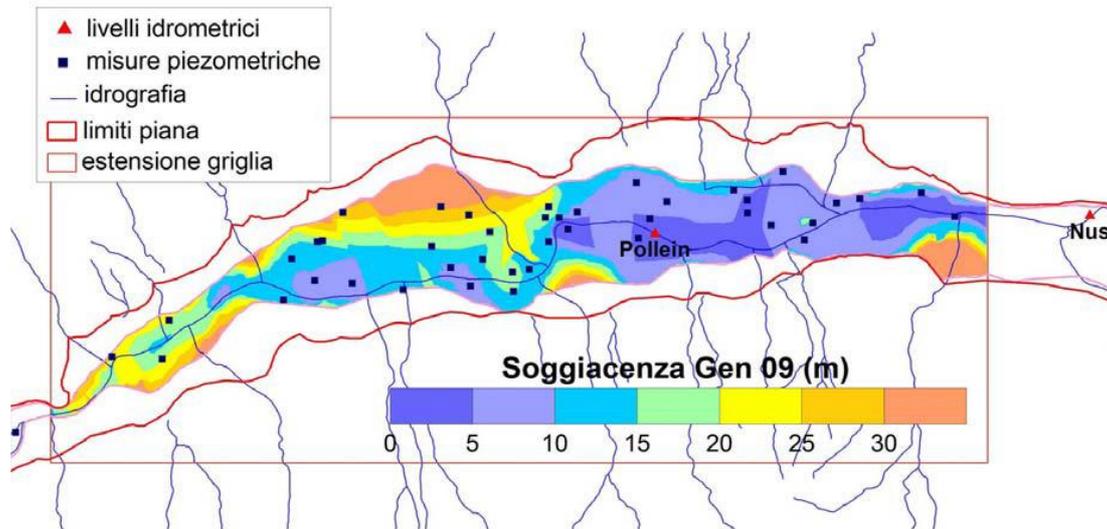


Figura 4.14: Carta della soggiacenza riferita a gennaio 2009 (Bonomi, Fumagalli, Canepa & Benastini, 2012)

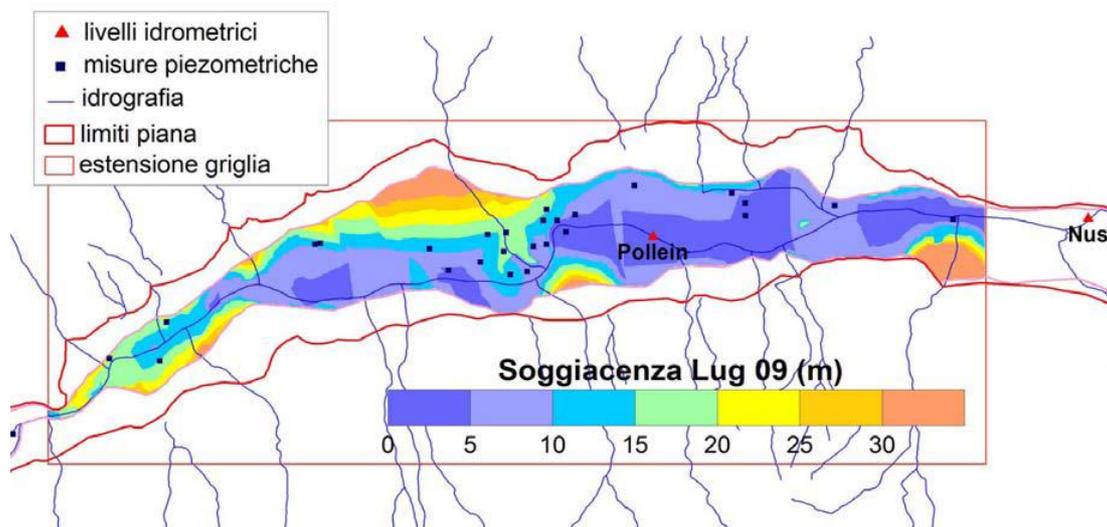


Figura 4.13: Carta della soggiacenza riferita a luglio 2009 (Bonomi, Fumagalli, Canepa & Benastini, 2012)

La soggiacenza della falda è massima nella zona a nord di Aosta e di Sarre, con valori anche maggiori di 20-25 metri, e minima nella zona orientale della piana, dove la profondità può essere minore di 5 metri vicino a Brissogne (ARPA Valle d'Aosta, 2006).

La tavola d'acqua mostra il minimo freaticometrico nel periodo primaverile (tra marzo e maggio) e il massimo di ricarica nel periodo tardo estivo (tra luglio e settembre), in accordo con i cicli di gelo e disgelo da cui dipendono anche le portate dei corsi d'acqua.

4.6.2 Relazioni falda-fiume

I rapporti di alimentazione e drenaggi che intercorrono tra la falda e i corsi d'acqua presenti nella piana di Aosta sono stati studiati da numerosi autori e costituiscono tutt'ora un interessante campo di ricerca idrogeologico². I lavori precedenti hanno permesso di giungere alle seguenti conclusioni:

- tra Aymavilles e Gressan esistono probabili tratti di alimentazione da parte della Dora Baltea verso la falda per infiltrazione dal subalveo, senza comunicazione diretta dei due corpi come sottolineato dagli elevati valori di soggiacenza (Triganon et al., 2003; Bonomi et al., 2013);
- nella zona di Aosta non paiono esserci rapporti di alimentazione o drenaggio tra falda e fiume (De Luca, Masciocco, Motta & Tonussi, 2004; De Maio, 2010);
- nella zona a valle di Pollein il livello della falda e del fiume diventano progressivamente paragonabili e si instaurano condizioni di comunicazione tra i due corpi idrici. Nonostante vari autori concordino sull'esistenza di rapporti, non esiste una risposta univoca per quanto riguarda l'esatta relazione che intercorre tra falda e fiume. Secondo alcuni di essi (Triganon et al., 2003) la Dora Baltea drenerebbe la falda, per poi invertire il rapporto più a valle fino a Quart. Secondo altri (Bianquin, 2010) il fenomeno sarebbe opposto, con alimentazione della falda nella zona di Pollein seguita da drenaggio procedendo verso valle. Ciò potrebbe suggerire una possibile evoluzione temporale, oltre che spaziale, per quanto riguarda i rapporti tra falda e fiume nella piana.

4.7 La rete di monitoraggio quantitativo

La rete di monitoraggio regionale delle acque sotterranee del fondovalle valdostano è composta da una rete di pozzi e piezometri su cui sono condotte, con cadenza diversa a seconda dei punti, misure della soggiacenza della falda rispetto ad un punto di riferimento, che può essere la testa del pozzo o il piano campagna, le quali vengono poi convertite in quota assoluta sul livello del mare.

L'attività di monitoraggio di ARPA Valle d'Aosta ha avuto inizio nel 2001 con misure di livello a frequenza semestrale su pozzi pubblici e sulle uniche due aree in cui all'epoca erano

² P.I.A.H.V.A., 1992, 1994, 1996; Triganon et al., 2003; De Luca, Masciocco, Motta & Tonussi, 2004; De Maio, 2010; Bianquin, 2010; Bonomi et al., 2013

presenti piezometri di monitoraggio: aree industriali di Cogne Acciai Speciali (CAS-ex) e discarica di Brissogne.

A seguire, dal 2003 è stata definita una prima rete di monitoraggio ai sensi del D.Lgs. 152/99.

Con il passare del tempo, il numero e la copertura dei punti di monitoraggio è andata via via aumentando, sia per la realizzazione di nuovi piezometri, sia per l'utilizzo di pozzi preesistenti e inseriti in seconda battuta nella rete di monitoraggio.

Nel periodo tra il 2006 e il 2009 il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Torino ha realizzato una propria rete per condurre uno studio idrogeologico (De Luca et al., 2004) che si è dunque affiancata alla rete ARPA.

Successivamente, con l'evoluzione delle normative, il numero e la disposizione dei punti di monitoraggio ha subito ulteriori modifiche, riducendo i punti nell'area della CAS-ex da 14 a 4 e distribuendone altri alle estremità della piana (Bianquin, 2010).

Nel 2013 la rete di monitoraggio quantitativo si componeva di circa 40 punti misurati semestralmente, 7 mensilmente e 6 sensori automatici (dataloggers) predisposti per la misura in continuo dei livelli freaticometrici (Pelliccioli, 2013). Questi ultimi in particolare sono utili strumenti che permettono un fitto e accurato monitoraggio che può rendere conto in maniera approfondita delle evoluzioni della falda anche a livello intra-annuale. Tuttavia tali dataloggers risultano aver cessato la propria attività in periodi diversi limitando la loro utilità pratica riferita ai tempi recenti (a titolo d'esempio, il sensore posto nel piezometro Jo02 è stato attivo tra il 2011 e il 2012, mentre quello posto nel piezometro Sc05 ha registrato misure tra il 2004 e il 2010)³.

Alcuni di questi punti di misura sono inoltre inseriti all'interno di una banca dati idrogeologica, TANGRAM, che permette di gestire le informazioni relative ai pozzi e piezometri presenti.

Risulta pertanto evidente come la rete non sia rimasta costante nel tempo e le misure non abbiano sempre mantenuto una regolarità né in termini di frequenza né di continuità, come verrà approfondito nel capitolo 5.

In *Figura 4.15* viene riportata la carta con la disposizione di tutti i punti presenti nella piana e registrati in TANGRAM di cui si abbiano misure, indipendentemente da abbondanza, continuità e frequenza, per fornire un quadro d'insieme di tutte le potenziali fonti di informazione.

³ Pelliccioli (2013) menziona la presenza di 6 dataloggers (Vi06, Sp03, Jo02, Ch05, Po34, Po35) con misure a partire da dicembre 2010, tuttavia per alcuni di essi non è stato possibile ottenere dati

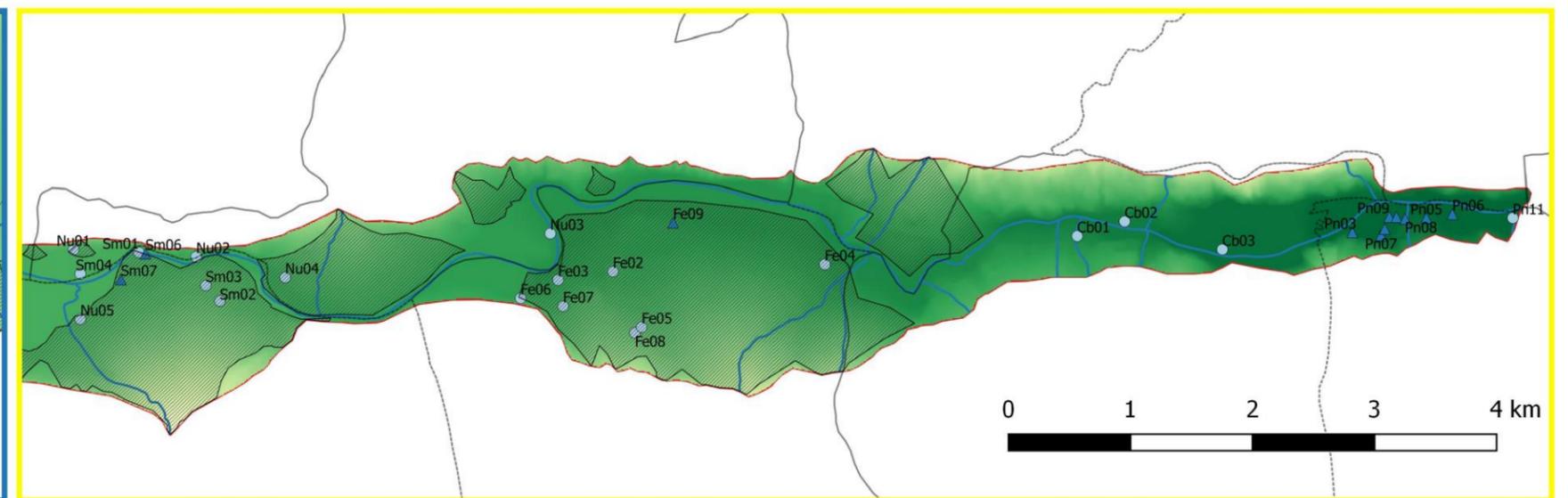
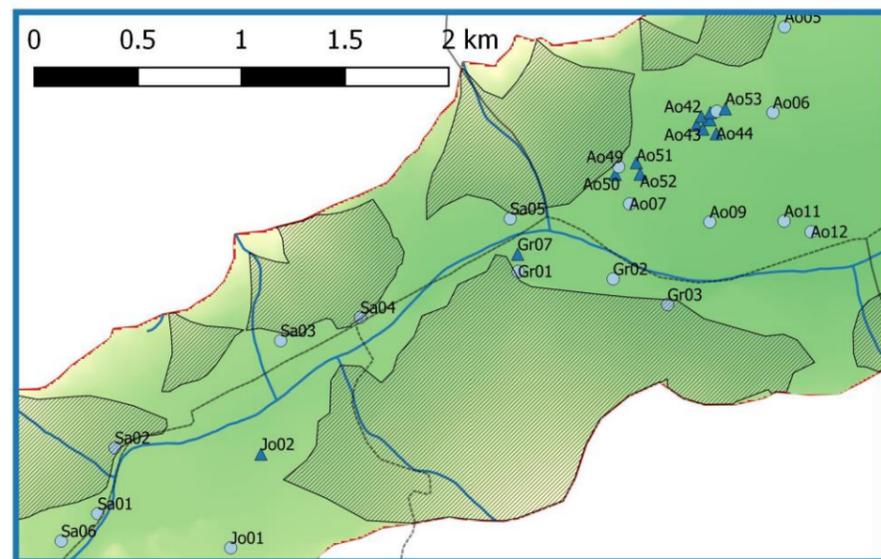
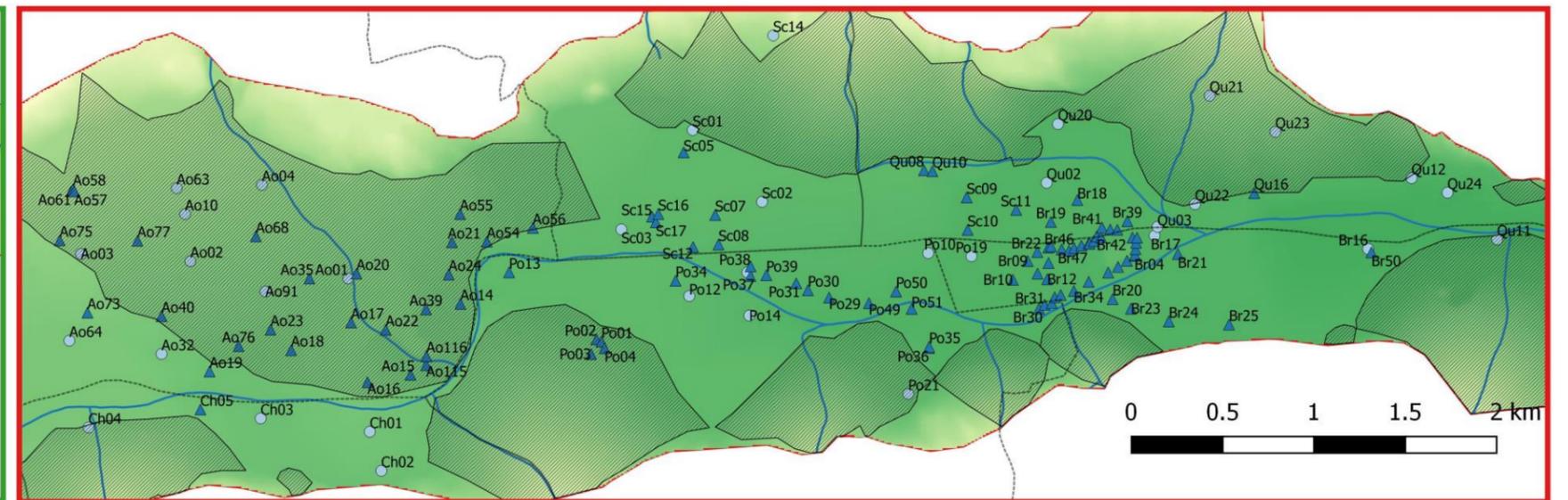
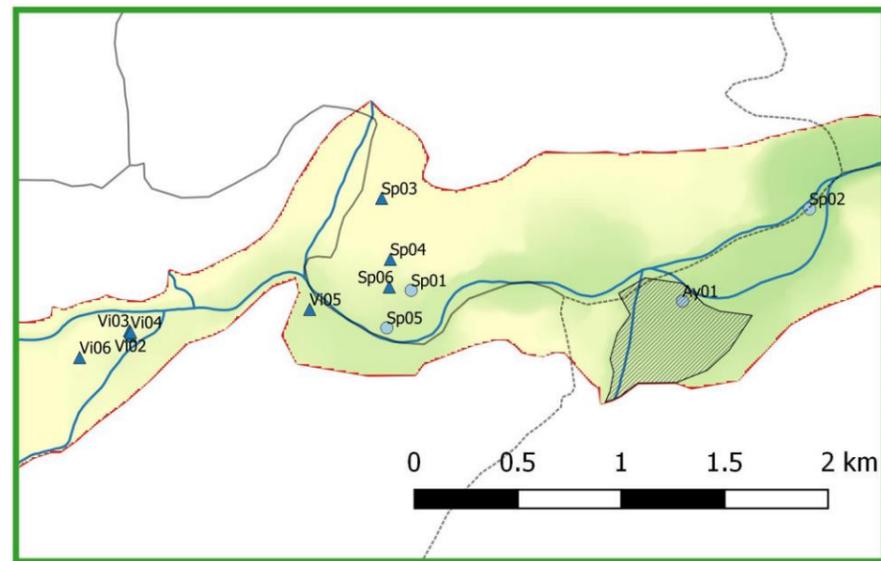
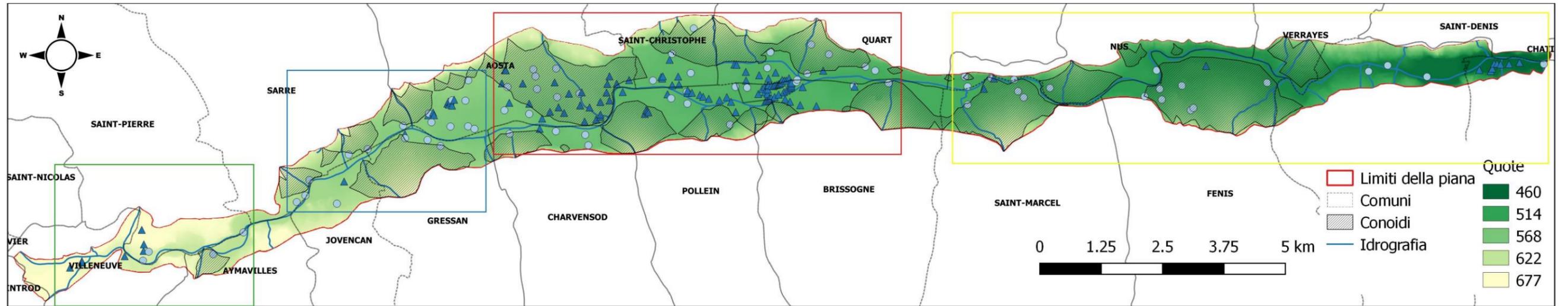


Figura 4.15: Inquadramento dei pozzi e dei piezometri presenti nella piana d'Aosta

5. ESPLORAZIONE DEI DATI

5.1 Il database TANGRAM

Nel 1988 il Dipartimento di Scienze Ambientali e del Territorio (DISAT) dell'Università degli Studi di Milano Bicocca, in collaborazione con l'Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali del CNR (IDPA-CNR), ha creato un database idrogeologico denominato TANGRAM¹ che permette di raccogliere informazioni di tipo amministrativo, tecnico-costruttive, stratigrafiche e piezometriche per scopi sia di ricerca in ambito idrogeologico che gestionali a favore di enti amministrativi (Bonomi et al., 2012).

Dalla sua prima versione, la banca dati si è progressivamente evoluta ed oggi raccoglie informazioni su circa 40000 pozzi e piezometri distribuiti in Lombardia, Piemonte e Valle d'Aosta (*Figura 5.1*). In particolare per la piana d'Aosta, nella banca dati risultano archiviate informazioni relative a 370 punti di prelievo delle acque sotterranee, di cui 36 pozzi pubblici, 127 pozzi privati e 207 piezometri.

Il database è organizzato in modo a identificare univocamente ogni punto di misura con un codice univoco definito da 10 numeri distribuiti in questo modo:

- 3 cifre per la provincia, in base al codice ISTAT (007 per Aosta);
- 3 cifre per il comune, in base al codice ISTAT;
- 4 cifre per il pozzo, in base ad una numerazione locale;

Queste ultime 4 cifre inoltre definiscono la tipologia di pozzo/piezometro:

- da 1 a 49 sono identificati i pozzi pubblici, in ordine cronologico se possibile;
- da 50 a 999 sono identificati i pozzi privati;
- al di sopra del 1000 sono identificati i piezometri;

La codificazione precedente era strutturata secondo un codice alfanumerico con sigla di 2 lettere riferita al comune e numerazione progressiva, pertanto è presente un apposito campo denominato *Codice ente* che permette di ottenere un riferimento incrociato per l'identificazione del punto d'interesse.

Per le finalità di questa tesi è stato utilizzato il codice previsto dall'ente.

¹ www.tangram.samit.unimib.it



Figura 5.1: Homepage del database online TANGRAM

5.2 Raccolta delle misure piezometriche

Dal database TANGRAM sono state prelevate le informazioni tecnico-amministrative relative a tutti i punti censiti all'interno della piana d'Aosta, in totale 370, di cui 208 in sinistra idrografica e 162 in destra idrografica della Dora Baltea.

Tra questi sono stati estratti i soli pozzi e piezometri provvisti di misure di livello, riducendo il numero dei punti ai 213 visibili in *Figura 4.15*, dei quali 104 in sinistra idrografica e 109 in destra idrografica (*Tabella 5.1*).

Sinistra idrografica			Destra idrografica		
Comune	Totali	Con misure	Comune	Totali	Con misure
Saint-Pierre	6	6	Villeneuve	7	5
Sarre	7	6	Aymavilles	7	3
Aosta	120	55	Jovencan	5	2
Saint-Christophe	24	11	Gressan	7	4
Quart	40	21	Charvensod	6	5
Nùs	6	5	Pollein	51	22
Verrayes	5	0	Brissogne	49	42
			Saint-Marcel	7	6
			Fénis	9	8
			Chambave	3	3
			Pontey	11	9
Totale	208	104	Totale	162	109
Di cui:			Di cui:		
Piezometri	114	60	Piezometri	93	74
Pozzi	94	44	Pozzi	69	35

Tabella 5.1: Abbondanza e collocazione dei pozzi e piezometri inseriti in TANGRAM

Incrociando le informazioni tecnico-amministrative con le informazioni relative alle misure piezometriche riferite al periodo 2000-2016 è stato possibile associare queste ultime, che erano catalogate secondo la classificazione TANGRAM, ai relativi codici dell'ente in codice alfanumerico.

I dati sono stati organizzati riportando:

- Comune in cui risiede il punto
- Codice TANGRAM
- Codice dell'ente
- Longitudine
- Latitudine
- Quota del piano campagna in m s.l.m., dove disponibile
- Quota del punto di riferimento in metri s.l.m.
- Data della misura, in formato gg/mm/aaaa
- Misura di soggiacenza, in metri dal punto di riferimento o dal piano campagna
- Carico idraulico in metri s.l.m.
- Fonte del dato
- Tipo di perforazione (pozzo o piezometro)

Il carico idraulico è stato ottenuto sottraendo la misura piezometrica alla quota del punto di riferimento o del piano campagna, a seconda del caso, così da ottenere una quota assoluta in metri sul livello del mare.

Per la misurazione dei livelli piezometrici e la valutazione della dinamica di falda sarebbero preferibili dati provenienti dai piezometri, in quanto sono dedicati esclusivamente al monitoraggio delle acque sotterranee. Tuttavia, con l'obiettivo di ottenere una risoluzione spaziale maggiore, sono stati utilizzati anche i dati dei pozzi. Poiché le misure andrebbero effettuate in condizioni statiche, ovvero a pozzo spento, questi ultimi dati potrebbero soffrire di fluttuazioni dovute alle modalità e condizioni del monitoraggio.

A questi dati sono stati aggiunte in un secondo momento ulteriori misure ottenute da ARPA Valle d'Aosta per integrare alcuni dati mancanti e aggiornare il database con le misure disponibili per il 2017, dove possibile.

Il database iniziale consisteva in 8549 misure totali, successivamente aggiornate a 11552 con l'integrazione delle misure mancanti e recenti.

5.3 Analisi esplorativa e consistenza dei dati

In questa fase sono state studiate l'abbondanza dei dati per ogni punto di monitoraggio e la loro distribuzione sia spaziale che temporale. Attraverso la realizzazione di tabelle e istogrammi sono state studiate la distribuzione dei punti, la frequenza di monitoraggio, il periodo di raccolta dati e l'abbondanza di misure disponibili per determinare la copertura della piana e la rappresentatività delle misure.

I dati sono stati organizzati ordinandoli secondo la longitudine del punto di monitoraggio, così da porli in una successione tale da seguire l'andamento della falda da ovest ad est.

5.3.1 Consistenza e distribuzione delle misure totali

Per comprendere la distribuzione dei dati lungo la piana e la consistenza delle serie per ogni punto di monitoraggio, è stata dapprima effettuata un'analisi esplorativa realizzando una tabella che mostrasse, per ogni anno, il numero di pozzi o piezometri per i quali si disponesse di almeno 1 misura all'anno, almeno 2 misure all'anno, almeno 6 misure all'anno e più di 12 misure all'anno (*Tabella 5.2*); con queste informazioni è stato inoltre realizzato un istogramma che rappresenta il numero di punti di monitoraggio divisi per classi di frequenza nel periodo compreso tra il 2000 e il 2017 (*Figura 5.2*).

Così facendo è stato possibile valutare quanti punti sarebbe stato potenzialmente possibile utilizzare per le analisi e come le misure fossero distribuite all'interno del periodo 2000-2017, in modo da avere un quadro d'insieme dell'evoluzione dello sforzo di monitoraggio applicato nel corso degli anni e individuare i periodi maggiormente monitorati e quindi meglio descrivibili.

Punti	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
≥1 misure/anno	14	17	52	50	51	61	106	108	107
≥2 misure/anno	13	16	44	43	45	58	86	98	100
≥6 misure/anno	13	15	13	22	24	24	30	34	32
≥12 misure/anno	10	0	12	9	9	19	20	25	24

Punti	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
≥1 misure/anno	112	89	60	65	72	67	113	45	38
≥2 misure/anno	88	53	51	47	67	42	102	44	38
≥6 misure/anno	33	34	33	42	47	38	80	44	16
≥12 misure/anno	23	15	16	17	24	19	68	21	0

Tabella 5.2: Numero di punti per classe di frequenza di monitoraggio nei vari anni

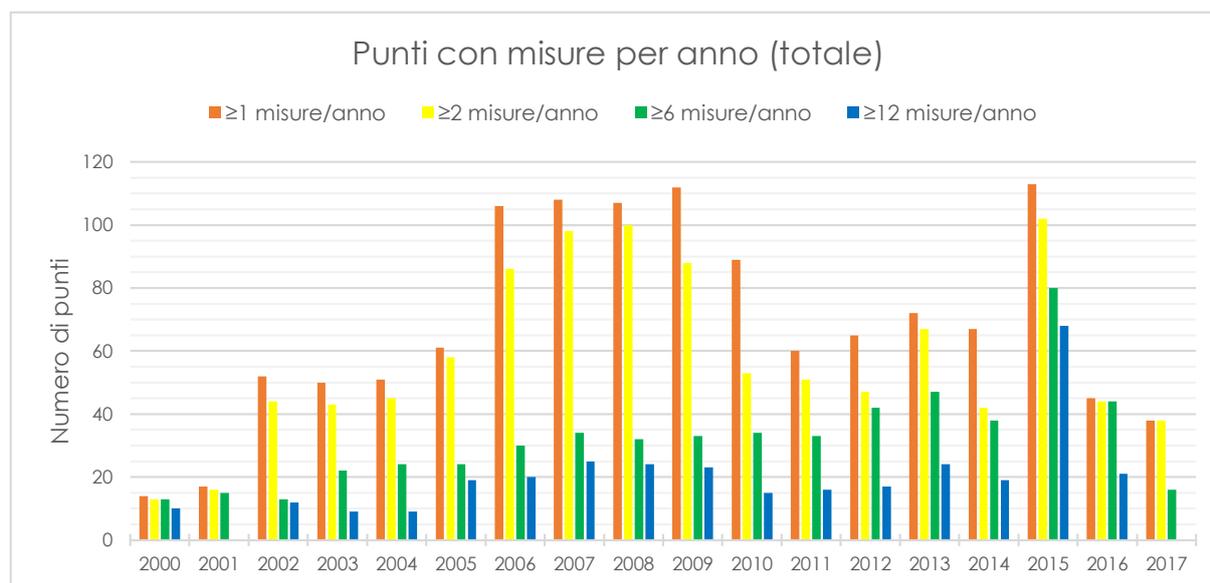


Figura 5.2: Istogramma con il numero di punti misurati in ogni anno divisi per classe di frequenza di monitoraggio

La prima cosa che si può notare è che il monitoraggio non è stato costante nel corso del corso del tempo in termini di copertura areale, come visibile dal numero assoluto di pozzi o piezometri che sono provvisti di misure nei vari anni, ed in particolare non è stata mantenuta una cadenza regolare nel controllo del carico idraulico come si evince dalla distribuzione delle classi di frequenza di monitoraggio.

Il numero totale di punti monitorati appare irregolare con una consistente crescita negli anni compresi tra il 2006 e il 2009, periodo in cui era in corso un'indagine idrogeologica condotta dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Torino in collaborazione con ARPA Valle d'Aosta ed in cui sono stati installati alcuni piezometri dedicati (cfr. capitolo 4.7). A seguito di questa campagna i punti diminuiscono ma si mantengono comunque su numeri elevati e con un ulteriore picco nel 2015.

Nei primi anni del 2000 il monitoraggio è stato condotto su pochi punti ma generalmente con frequenze elevate. Infatti il numero di pozzi o piezometri con 6 misure all'anno è circa coincidente con il numero totale, e di questi quasi tutti hanno almeno 12 misure/anno. Nel 2001 in particolare però risulta una diminuzione della frequenza, senza punti monitorati mensilmente, sebbene si mantenga comunque un numero di almeno 6 misure in quasi tutti i punti utilizzati.

Nel periodo successivo si ha un notevole incremento dei punti monitorati, ma limitato ad una frequenza di 2 misure/anno o inferiore; infatti a fronte di un aumento da 17 a 54 punti, il numero di pozzi con almeno 6 misure all'anno si mantiene simile agli anni precedenti.

A partire dal 2005 l'aumento dei punti monitorati si accompagna anche ad un incremento della frequenza di misura, sebbene tale crescita sia più contenuta, e i rilievi mensili aumentano dai 9 precedenti ai 20-25 che restano circa costanti negli anni immediatamente successivi.

Il divario tra il numero totale di pozzi e piezometri monitorati e quelli con frequenze superiori alle 6 misure all'anno risulta massimo nel periodo 2006-2009, in cui ammontano a circa un terzo dei pozzi e piezometri utilizzati in totale.

Successivamente le misure diminuiscono nuovamente sia in termini assoluti che in funzione della frequenza di monitoraggio. I punti monitorati si mantengono comunque elevati, ma si nota una riduzione soprattutto nei monitoraggi semestrali e mensili.

Negli anni più recenti, ed in particolare nel 2015, la frequenza di monitoraggio e il numero di punti utilizzati vedono un nuovo aumento che tuttavia non si spinge fino al 2016 e 2017; in quest'ultimo anno soprattutto si rileva la mancanza di misure registrate con frequenza mensile.

Va sottolineato il fatto che questa prima analisi non discrimina il periodo in cui tali misure siano state registrate né a quali pozzi o piezometri appartengano, ma si limita a valutare lo sforzo di monitoraggio applicato alla piana nella sua interezza. Pertanto non è garantito che il numero di punti con la medesima frequenza di monitoraggio in anni successivi si riferisca necessariamente agli stessi pozzi o piezometri, ma potrebbe essere dovuto al turnover, né si può dire che tali rilievi siano stati condotti con una cadenza regolare o in mesi rappresentativi.

Cionondimeno emerge una evidente irregolarità temporale e di rappresentatività delle serie con una predominanza di punti scarsamente monitorati.

Per approfondire l'analisi a livello anche spaziale e distinguere le serie in funzione dei singoli punti di monitoraggio, così da valutare la lunghezza e la completezza di ogni serie storica, è stata realizzata una tabella associando il numero di misure annue ad ogni pozzo o piezometro (*Tabella 5.3*); le celle sono state evidenziate con colore che vira dal giallo, per anni in cui è presente una sola misura, a gradazioni di verde, più scuro al crescere del numero di misure, fino al blu per valori superiori alle 24 misure annue.

Queste informazioni sono state rappresentate in 18 istogrammi, uno per ogni anno, in cui sono riportate il numero di misure per ogni punto di monitoraggio, ordinati da ovest a est, di modo da valutare anche le aree della piana maggiormente descritte (*Figura 5.3*).

In *Figura 5.4* si può invece osservare la carta su cui sono rappresentati i punti, in scala di colore in funzione del numero di misure totali di cui si dispone per ognuno di essi.

Codice	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	tot
Vi06											1		1	2	1	1			6
Vi03							1												1
Vi04							4	4	4	2	1								15
Vi02				1			2												3
Vi05								3	4	2	1								10
Sp03											1								1
Sp05														1					1
Sp06															1	1			2
Sp04														1					1
Sp01							4	4	4	2	1								15
Ay01		2			1														3
Ay02		2					4	4	4	2	1								17
Sp02							3	4	4	2	1								14
Ay03		1					2												3
Sa06								2	4	2	1								9
Sa01		2	2				2			1									7
Sa02		2	1	1			4	4	4	1	1								18
Jo01								1											1
Jo02											16	365	366	12	1	1			761
Sa03							2	4	4	2	1								13
Sa04							2	4	4	2									12
Sa05											1								1
Gr07																3	11	3	17
Gr01		2	2	2	2	3	4	2	2										19
Gr02		2	2	2	2	2	4	4	2	1									21
Ao50			2		2	2				1									7
Ao49			1		2	1													4
Ao07		1					6	6	7	7	5	4	3	7	3				49
Ao51			2		66	362	241	4	4	3	2	2	1	2	1	2			692
Ao52			1			2	2			1									6
Gr03							4	4	4	1									13
Ao43		3	9	12	5	5	2	3	2										41
Ao42		2	2	2	1	2													9
Ao67							1												1
Ao09		2					2	3	3	1					8	11	7		37
Ao45		2	2	2	2	2													10
Ao46		5	12	13	13	13	12	12	12	14	11	9	11	12	15	12	4		180
Ao44		2	2	2	2	2				1									11
Ao08	1	2	3	10	12														28
Ao53			10	12	11	13	16	16	14	14	14	10	12	13	15	12	4		186
Ao06		2	2	2	2	2	1				12	12	12	14	12	14	10	3	100
Ao11		2	1	2	2		9	10	11	12	11	12	12	15	12	20	16	3	150
Ao05							16	18	24	17	13	12	12	14	12	14	10	3	165
Ao12		2	2				9	15	15	14	13	12	12	14	12	13	7		140
Ao75												1	1						2
Ao64							3	4	4	2									13
Ao61							4	2						2	1	5	11	3	28
Ao58					1														1
Ao57					7	2													9
Ao03							8	11	10	11	12	12	12	15	7				98
Ao73										2	2	2	1	2	1	5	10	3	28
Ch04								2	4	2	1					3	11	3	26
Ao77																5	10	4	19
Ao40			2	2	2	2	2	1	1	3						1			16
Ao32	12	8	13	13	9	14	16	16	24	17	10	10	10	11	11	15	13	6	228
Ao63							1												1
Ao10							9	14	13	11	11	12	12	15	12	13	7		129
Ao02								2			1	4			6		1		14
Ch05											1	2	1	2	1	6	11	3	27
Ao19	11	7	13	13	9	14	15	16	24	17	9	10	10	11	11	14	13	6	223
Ao76													1			6	11	6	24
Ao68							1	15	14	15	13	14	12	15	13	15	11	4	142
Ch03							2	4	4	2	1								13
Ao04		2	1	1			1	4	4	1	1		1	2		5	10	3	36
Ao91							7	11	10	12	12	12	11	14	12	12	7		120
Ao23	10	8	12	13	9	13	15	16	17			8	4	11	11	11	13	6	177
Ao62							3	4	4	2									13
Ao18	12	8	13	9	9	13	15	16	24	16	7	9	3	9	10	14	13	6	206
Ao35	12	8	13	13	9	14	15	15	24	16	7	9	3	9	10	15	13	6	211
Ao01								2		7	12	12	12	15	12	13	7		92
Ao17	12	7	12	9	9	14	11	16	23	16	9	8	9	9	10	15	13	6	208
Ao20	12	8	13	13	2	14	15	16	24	14	7	9	3	9	10	15	13	6	203
Ao16	12	8	12	9	9	14	16	16	24	16	7	8	9	9	10	14	13	6	212
Ch01		2	2	2	2	2	2	2	2	1						3	11	4	33
Ch02		2	1				1	2	2	1	1								10
Ao22		2	1	1	2	1			8	8	7	8	9	9	10	13	13	6	98
Ao15	12	8	11	6	7	12	13	16	24	16	10	10	10	11	11	15	13	6	211

5. ESPLORAZIONE DEI DATI

Codice	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	tot
Ao39	12	8	13	13	9	14	15	16	24	14	7	8	9	9	10	14	13	6	214
Ao115									1	3	7	8	9	9	10	13	13	6	79
Ao116									1	3	7	8	9	9	10	13	13	6	79
Ao24	12	7	13	13	9	14	16	16	24	10	9	10	10	11	11	14	11		210
Ao21	12	8	13	13	2	14	15	16	24	16	7	8	9	9	10	15	13	6	210
Ao55					12	13	15	16	16	16	15	12	9	13	13	18	12	4	184
Ao14	11	8	13	9	6	14	15	16	24	15	7	8	9	9	10	15	13	6	208
Ao54					9	10	12	16	16	14	13	13	9	12	1	2			127
Po13					10	11	11	12	12	12	12	13	9	13	13	18	13	4	163
Ao56					12	13	16	16	16	15	12	13	9	13	13	16	13	3	180
Po03			1	2	2	2				1									8
Po02			1	2	2	2	4	4	4	3	3	1	1	2	1	6	10	4	50
Po01				2	2	2	2			1									9
Po04			1	2	2	2	2												9
Sc03				2	2	2	2												8
Sc15												1							1
Sc17											6	2							8
Sc16											1	1	1	3	1	6	11	4	28
Po34											1	2	1	2	1	6	10	3	26
Sc05					45	366	284	326	365	364	68	2	1	3	1	5	11	4	1845
Po12					2	2	2	2	4	3	2					2			19
Sc01			2	2															4
Sc12									11	5									16
Sc07									3	2									6
Sc08									2	2	4	3	2	1	3	1	2		20
Po22								1			1								3
Po14						1	2	3	4	2	1								13
Po37												2							2
Po38												2		3	1	6	10	3	25
Sc02		1	4	9	13	10	11	11	9	5									73
Po39												2							2
Sc14								2	4	2									8
Po31										1		1							2
Po30										1		1		2					4
Po29										2	2	1		3	1	2			11
Po49															1	2			3
Po50														1		4			5
Po21							1	3	3		1					1			9
Po51																3			3
Qu08						2													2
Po10		1	2	2	2	2	2	2	1	2						2			16
Po36																2			2
Po35												2	1	2	1	2			8
Qu10				9	12	9	12	11	11	10	13	8	11	1	1				108
Sc09									11	7	9	1							28
Sc10									11	5	9		1						26
Po19							2												2
Br10		9	3	7	11	4	3	4		1	1					12			55
Sc11									11	4	11	2	2	1	3	1	2		37
Br09						2	3	3	4	3						12			27
Br22											1	2	1	3	1	13			21
Br49																12			12
Br30																12			12
Br31																12			12
Qu02			2	2	1	2	2			1									10
Br12			1	7	4	3	2	1								12			30
Br08						2	2									12			16
Br11			2			2	2									12			18
Br19									1	3		1				12			17
Br48																12			12
Br32																12			12
Br01		9		6	5	3	2	1								12			38
Qu20								3	4	2	1								10
Br33																12			12
Br47																11			11
Br07			2			2	2												6
Br34																12			12
Br46																11			11
Br18								1	4	1	1					11			18
Br45																12			12
Br44																12			12
Br02			2			2	2									12			18
Br06bis																12			12
Br43																12			12
Br42																12			12
Br06						2	2												4
Br41																12			12
Br35																12			12

Codice	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	tot
Br40																12			12
Br20									2	2	1		6	8		14			33
Br29																12			12
Br03						2	2							1		12			17
Br36																12			12
Br39																12			12
Br23													6	14	3	1			24
Br05				7	3	5	4	1											20
Br04						2	4	3	4	4	3	2	1	4	1	13			41
Br04bis														1		12			13
Br37																11			11
Br38																12			12
Br05bis																12			12
Br17								3	4	2									9
Qu03			1	2			1												4
Br24													6	14	4	1			25
Br21									1	2	3	2	7	8		13			36
Qu22								3	4	2	1								10
Qu21								3	2										5
Br25													6	14	3	1			24
Qu16								3	4	4	2	2	1	2	1	2			21
Qu23								1	2		1								4
Br16							1	4	4	1	1								11
Br50															1	2			3
Qu12							1	4	4	2	1								12
Qu24								3	4	2									9
Qu11							3	4	4	1	1								13
Nu01			2				1												3
Sm04									2	2									4
Nu05							2	4	4	2									12
Sm07															1	1			2
Sm01							1	4	4	2									11
Sm06													1	2					3
Nu02			2				1	4	4	2									13
Sm03							2	4	4	2									12
Sm02							1												1
Nu04							2	4	4	2									12
Fe06							1	3	1										5
Nu03			2				2	4	4	2									14
Fe03							3	2	2	1									8
Fe07							1	1	2										4
Fe02							3	4	4	2	1								14
Fe08									2	1									3
Fe05									1	2									3
Fe09															1	1			2
Fe04							1	4	3	2									10
Cb01								3	4	1									8
Cb02								3	4	2									9
Cb03								3	4	2									9
Pn03								4	4	2	3		24	24	24	24			109
Pn07											3		24	24	23	24			98
Pn02								4	4	2	3		24	6					43
Pn09											3		24	24	24	24			99
Pn01								4	4	2	3		24	6					43
Pn08											3		24	24	24	24			99
Pn05								4	4	2	4		25	26	25	25			115
Pn06								4	4	2	3		24	24	24	24			109
Pn11								3	4	1									8

Tabella 5.3: Numero di misure in ogni anno per ognuno dei punti di monitoraggio presenti nella piana d'Aosta

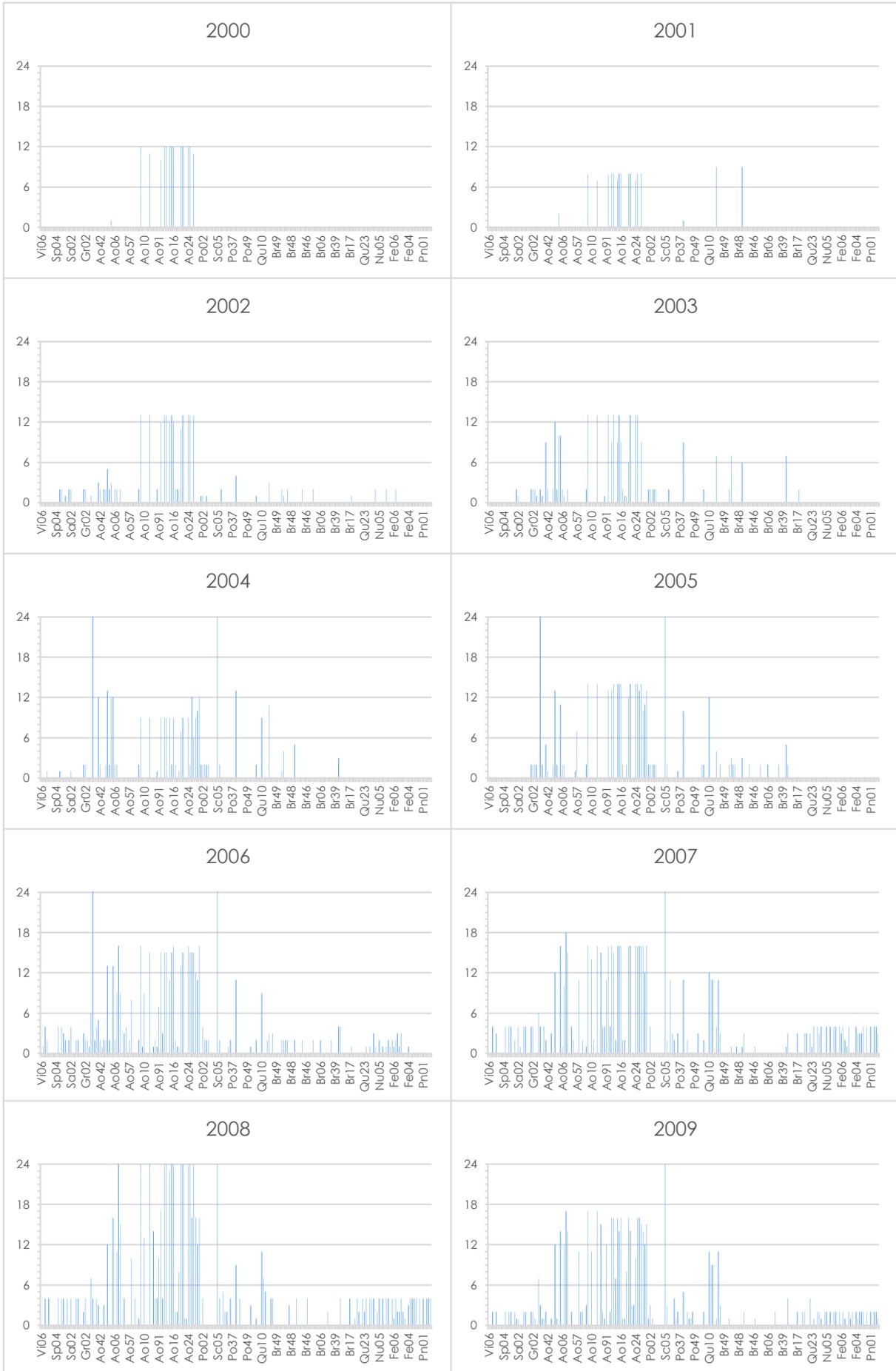




Figura 5.3: Distribuzione dell'abbondanza annuale delle misure per ogni punto di monitoraggio, in direzione O-E; l'asse orizzontale non rappresenta la distanza tra i punti di misura, ma solo l'ordine in cui sono collocati longitudinalmente, pertanto aree più dense di pozzi occupano una porzione maggiore dell'asse

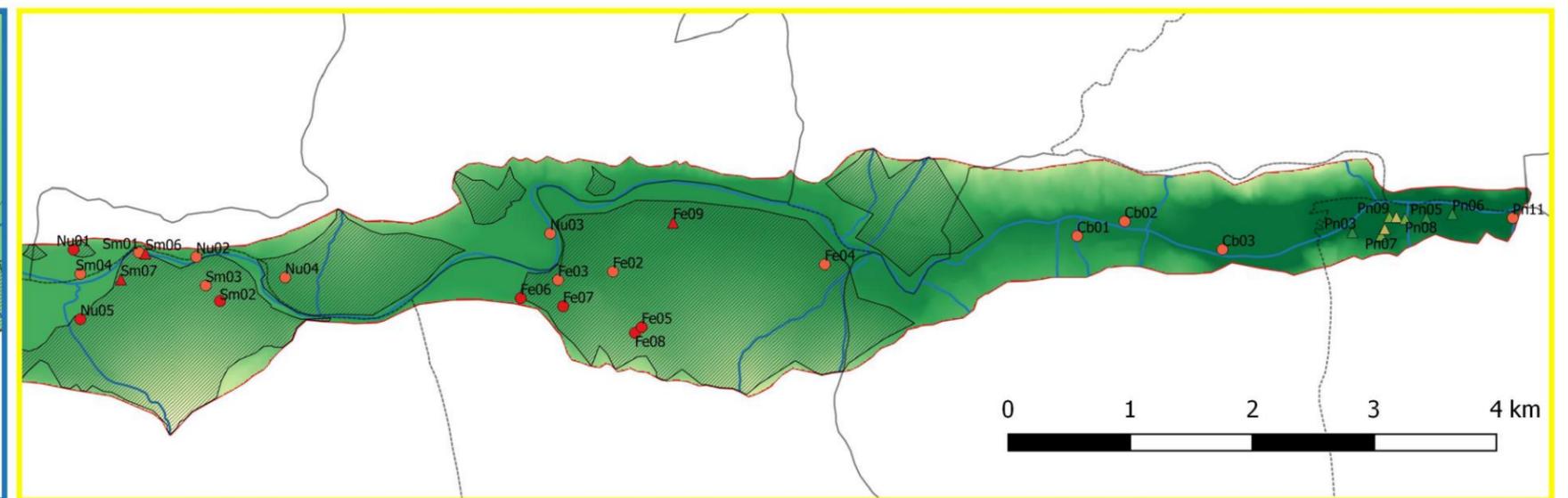
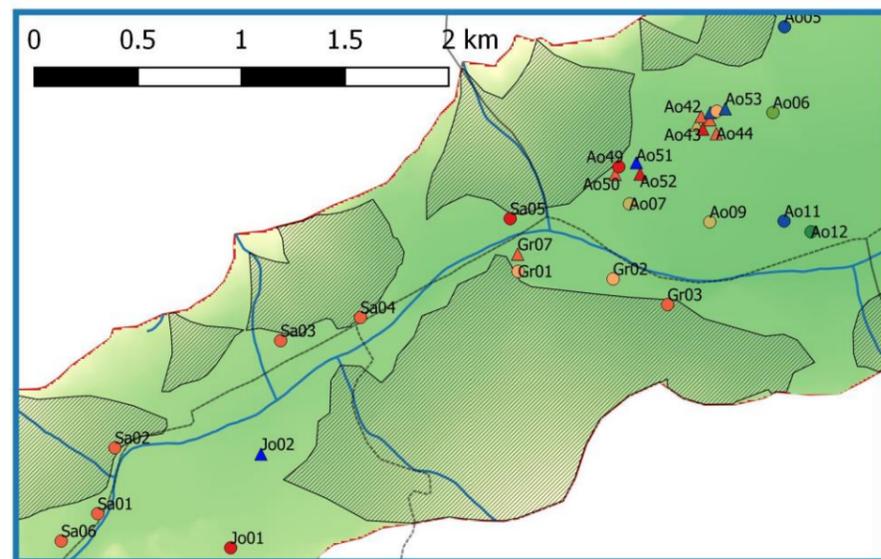
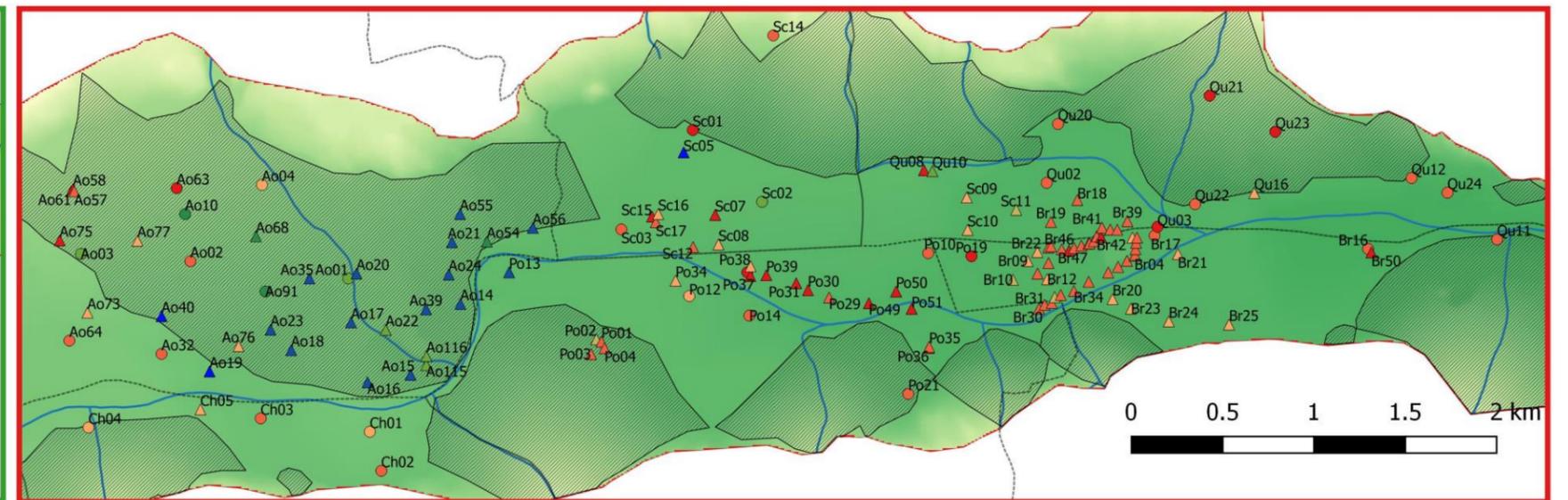
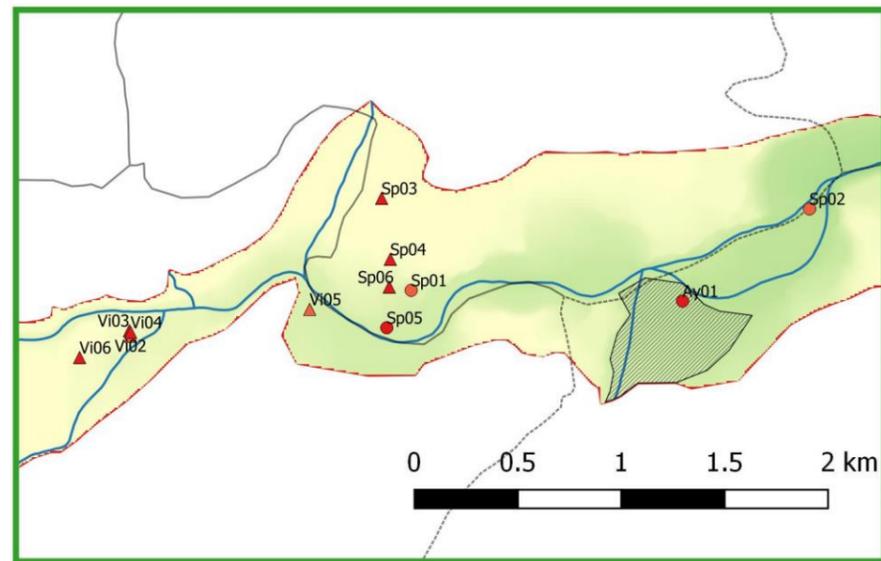
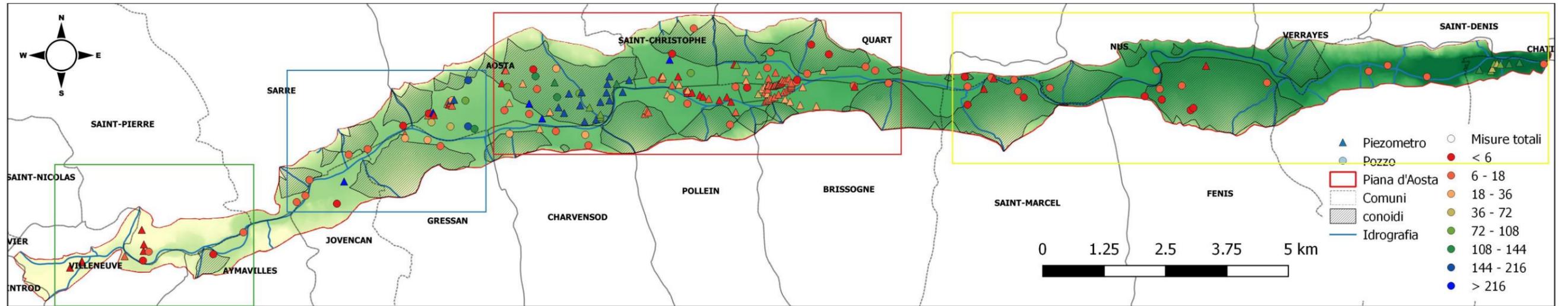


Figura 5.4: Inquadramento dei punti di monitoraggio nella piana d'Aosta, distinti in pozzi e piezometri, in scala di colore in funzione del numero di dati disponibili

5.3.2 Criticità relative alla disponibilità e distribuzione dei dati

Come è possibile notare dalla tabella, dai grafici e dalla carta, la piana è caratterizzata da una decisa disomogeneità di monitoraggio, sia dal punto di vista spaziale sia dal punto di vista temporale.

Le serie storiche appaiono consistenti solo nell'area centrale della piana, tra Aosta e Pollein, e diventano rapidamente più disperse territorialmente e rarefatte in frequenza proseguendo verso le zone occidentali e orientali.

- La presenza di serie storiche che coprano l'intero periodo 2000-2017 appare limitata alla sola zona del comune di Aosta, dove le misure sono comunque maggiormente concentrate intorno alle aree più antropizzate, in particolare sulla conoide del torrente Butthier verso la confluenza con la Dora Baltea. Si può notare una crescita dei punti monitorati nella zona soprattutto a partire dal 2006.

La frequenza di monitoraggio in questi punti appare comunque discreta, con numerosi anni descritti da rilievi mensili o anche maggiori. Tuttavia non pare essere stata mantenuta con costanza, e si possono riscontrare anni con decine di misure affiancati ad altri con misure semestrali o inferiori.

La presenza di punti di monitoraggio con anni mancanti o con una sola misura all'interno delle serie è notevole in valore assoluto, ma relativamente al gran numero di pozzi e piezometri presenti appare poco rilevante.

- La zona a monte della piana, nei comuni di Villeneuve, Saint-Pierre, Aymavilles, Sarre e Jovencan, è contraddistinta dalla presenza di pochi punti di monitoraggio, con serie inferiori ai 5 anni e dalle frequenze rade e discontinue, spesso con una sola misura annuale che risulta di fatto inutilizzabile. Inoltre le serie disponibili in questi comuni risalgono per la maggior parte al 2006-2009, durante la campagna condotta dall'Università degli Studi di Torino, e dunque lontano dal periodo recente.

Da bibliografia si apprende della presenza di 3 dataloggers (Vi06, Sp03, Jo02) installati nel 2010, tuttavia tali dati non sono pervenuti ad eccezione di Jo02 per cui si hanno misure in continuo tra il 2010 e il 2013.

- A Gressan i monitoraggi si riferiscono a soli 4 punti, di cui 2 (Gr01 e Gr02) con serie più lunghe, ma generalmente semestrali. Tuttavia anche queste si fermano al 2009 e

quindi non sono rappresentative degli anni recenti. L'unica serie recente si ha in Gr07, ma copre solamente 3 anni con frequenza disomogenea.

- In Charvensod sono presenti 5 punti di monitoraggio, ma le serie raccolte sono contraddistinte da brevi periodi, intervallati da interruzioni consistenti. Ch05 è l'unico piezometro che presenta dati recenti, talvolta abbonanti (11 misure nel 2016), ma nel 2010, 2012 e 2014 è stato misurato una sola volta nell'intero arco dell'anno.
- La zona a est di Aosta, dove sorgono Pollein e Saint-Christophe, invece collabora alla rete con 33 punti di monitoraggio. 22 di questi sono presenti a Pollein, tuttavia le misure registrate sono per la maggior parte riferite a periodi remoti, con numerosi e consistenti salti temporali, e limitate. Un'eccezione è costituita da Po02, che mostra la serie più lunga tra queste, dal 2002 al 2017, sebbene a sua volta non sia stata mantenuta una regolarità riguardo la frequenza ed è intervallata da anni con una sola misura, precisamente nel 2002, 2011, 2012 e 2014.

Saint-Christophe ha un numero minore di punti di monitoraggio ma una qualità maggiore delle serie che vi sono state raccolte con misurazioni più prossime agli anni recenti, sebbene anch'esse caratterizzate da scarsa continuità di misura. Va sottolineata la presenza di un datalogger, attivato in Sc05, che ha permesso la raccolta in continuo di dati tra il 2004 e il 2010. Nonostante la frequenza di misura sia calata repentinamente nel periodo successivo, questa serie si spinge comunque fino al 2017 permettendo valutazioni sia su lungo periodo che riferite al periodo recente.

- Tra Brissogne e Quart la densità della rete è maggiore, soprattutto nella zona occidentale. Brissogne presenta 42 punti di monitoraggio ed è secondo solo ad Aosta. La maggior parte di questi sono piezometri di controllo della discarica ivi presente e sono utilizzati relativamente al suo monitoraggio. Nonostante l'abbondanza di pozzi e piezometri tuttavia, le serie di cui si dispone sono per lo più estremamente brevi e riferite ad anni lontani dal presente. La maggior parte di questi punti presenta un monitoraggio mensile riferito al solo 2015. Pochi piezometri offrono serie lunghe e recenti, con frequenze per lo più semestrali o stagionali.

I punti presenti nella zona di Quart sono per la maggior parte provenienti da pozzi di prelievo e di irrigazione e presentano serie discontinue e saltuarie. Tuttavia Qu10, Sc11 e Qu16 sono caratterizzate da una consistente durata del monitoraggio e, nel caso di Qu10, anche una frequenza elevata.

- Procedendo verso est, nei comuni di Saint-Marcel, Nus, Fénis, Chambave e Verrayes, la situazione appare analoga all'estremo occidentale della piana, con misure limitate al 2006-2009 e caratterizzate da irregolarità nello sforzo di monitoraggio, nonostante la presenza di numerosi anni coperti da misure stagionali.
- L'area più occidentale della piana, in corrispondenza di Pontey, presenta gli stessi problemi della zona precedente, tuttavia dal 2012 è stato ripreso un monitoraggio con elevata frequenza (circa 24 misure all'anno) in 8 dei piezometri presenti, e per 6 di questi (Pn03, Pn07, Pn09, Pn08, Pn05, Pn06) è proseguito fino al 2015 permettendo di avere serie consistenti.

In generale si può quindi dire che nel periodo 2000-2017 l'unica zona completamente monitorata sia stata quella di Aosta, con evidenti problemi di rappresentatività delle altre aree della piana, soprattutto l'estremità occidentale e quella centro-orientale, come viene anche evidenziato dagli istogrammi.

L'irregolarità del monitoraggio rende difficile per queste aree sviluppare una valutazione di lungo periodo, in quanto la brevità e discontinuità delle serie può incidere sui risultati, come verrà approfondito nel capitolo 6.

6. APPLICAZIONE DEL TEST 1 – BILANCIO IDRICO

Nel corso di questo capitolo verranno presentate le procedure applicate per l'esecuzione del Test 1 relativo all'analisi di bilancio idrico, a cominciare dalla selezione dei punti di monitoraggio utilizzati e dallo studio dei dati e delle serie storiche, dei quali verranno evidenziati problemi derivanti dalla distribuzione spaziale dei pozzi e piezometri e dalla densità dei dati di cui dispongono. Verranno quindi illustrati i procedimenti per la valutazione dei trend su lungo periodo, approfondendo gli aspetti relativi al test di Mann-Kendall necessario a definirne la significatività, fino ad arrivare al calcolo dei valori di tendenza puntuale nei pozzi e piezometri selezionati.

Come definito dalle linee guida per la valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee (cfr. capitolo 3.2), per questa analisi è necessario selezionare punti di monitoraggio dotati di serie storiche significative che permettano di valutare l'evoluzione del carico idraulico su lungo periodo attraverso analisi statistiche fino a giungere alla stima di una tendenza dei livelli delle acque sotterranee, che può essere in diminuzione, stabile o in crescita.

Sulla base di questa valutazione viene quindi attribuito uno stato quantitativo *buono* o *scarso* al corpo idrico sotterraneo. Tale valutazione è valida limitatamente a questo test e si affianca ai giudizi ottenuti dagli altri test secondo il criterio di “*one out, all out*”, per il quale il peggior risultato è quello determinante per il giudizio complessivo.

Come introdotto nel capitolo 5 e approfondito nelle prossime pagine, si sono rese evidenti criticità riguardanti sia la significatività delle serie storiche di misure piezometriche sia la distribuzione di pozzi e piezometri sottoposte ad un monitoraggio tale da permettere l'esecuzione di questo test. Queste problematiche hanno reso necessario discostarsi da un'applicazione rigorosa delle istruzioni fornite dalle linee guida, che altrimenti non avrebbero permesso di giungere ad una valutazione dello stato quantitativo, in quanto i requisiti di base richiesti non erano pienamente soddisfatti. Ciononostante sono stati adottati accorgimenti che hanno permesso di definire comunque un giudizio per quanto riguarda le tendenze dei livelli piezometrici e l'attribuzione di uno stato di qualità al corpo idrico sotterraneo.

6.1 Selezione di punti di monitoraggio significativi

Secondo quanto proposto dalle linee guida per la valutazione dello stato quantitativo, per procedere alla valutazione delle tendenze su lungo periodo è necessario disporre di serie temporali pari ad almeno 10-15 anni, affinché non siano influenzate dai naturali cicli aridi ed umidi (Boni et al., 1993; Huh, 2005). Tuttavia questo lasso di tempo può essere ridotto a 6 anni di misure recenti, corrispondenti cioè al periodo sessennale di gestione del bacino.

La numerosità campionaria consigliata è tale da poter disporre di misure almeno mensili o eventualmente stagionali. Anche in questo caso, laddove si riscontri una periodicità inferiore, sono accettabili 2 misure/anno purché riferite ai periodi di ricarica della falda e di massimo esaurimento della risorsa.

Per prima cosa sono stati valutati i dataset potenzialmente disponibili per procedere all'analisi. Per far ciò è dunque stato posto il criterio di selezione meno restrittivo possibile rimanendo fedeli alle istruzioni delle linee guida, cioè sono stati ricercati i pozzi e i piezometri dotati di almeno 6 anni consecutivi di misure con almeno 2 misure all'anno nell'intero periodo, basandosi sulla *Tabella 5.3* riportata nel capitolo 5.3.1.

Da questa selezione tuttavia è emerso che le serie presenti, nella quasi totalità dei casi, non rispettavano le condizioni prescritte. Come precedentemente constatato e riportato nel capitolo 5, la maggior parte dei monitoraggi lungo la piana ha avuto luogo nel periodo compreso tra il 2006 e il 2009 tranne che ad Aosta e nei comuni limitrofi, dove le misurazioni sono state più regolari. Il numero di punti di monitoraggio selezionati ammontava a 44, quasi interamente collocati nel comune di Aosta, ad eccezione di 2 punti a Gressan (Gr01 e Gr02), 1 a Charvensod (Ch01), 3 a Pollein (Po13, Po02 e Po12), 2 a Saint-Christophe (Sc05 e Sc02), 1 a Quart (Qu10) e 2 a Brissogne (Br10 e Br04).

Tutti questi punti appartengono all'area centrale della piana (*Figura 6.1*), dunque non sono presenti serie che, secondo questi requisiti, siano accettabili per descrivere le zone occidentali a monte di Aosta e la metà orientale della piana verso est a partire dal centro del comune di Brissogne.

Inoltre la numerosità dei campioni appare buona per i punti situati ad Aosta, ma decisamente inferiore negli altri comuni, ad eccezione di Sc05 (dove nel periodo 2004-2010 era attivo un datalogger), Sc02 e Qu10 (*Tabella 6.1*).

A questa prima selezione è stato poi applicato un vincolo relativo all'età delle serie, così da restituire solamente quelle che giungono fino al 2017. Il numero di punti di monitoraggio così accettabili si è ridotto ulteriormente a 24, collocati esclusivamente ad Aosta, ad eccezione di Po13 situato a Pollein. Molte di queste serie infatti risalgono al periodo precedente al 2010 o si sono interrotte recentemente.

Codice	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	tot
Gr01			2	2	2	2	3	4	2	2									19
Gr02			2	2	2	2	2	4	4	2	1								21
Ao07			1				6	6	7	7	5	4	3	7	3				49
Ao51					66	362	241	4	4	3	2	2	1	2	1	2			692
Ao43			3	9	12	5	5	2	3	2									41
Ao46			5	12	13	13	13	12	12	12	14	11	9	11	12	15	12	4	180
Ao53				10	12	11	13	16	16	14	14	14	10	12	13	15	12	4	186
Ao06			2	2	2	2	2	1			12	12	12	14	12	14	10	3	100
Ao11			2	1	2	2	9	10	11	12	11	12	12	15	12	20	16	3	150
Ao05							16	18	24	17	13	12	12	14	12	14	10	3	165
Ao12			2	2			9	15	15	14	13	12	12	14	12	13	7		140
Ao03							8	11	10	11	12	12	12	15	7				98
Ao32	12	8	13	13	9	14	16	16	24	17	10	10	10	11	11	15	13	6	228
Ao10							9	14	13	11	11	12	12	15	12	13	7		129
Ao19	11	7	13	13	9	14	15	16	24	17	9	10	10	11	11	14	13	6	223
Ao68							1	15	14	15	13	14	12	15	13	15	11	4	142
Ao91							7	11	10	12	12	12	11	14	12	12	7		120
Ao23	10	8	12	13	9	13	15	16	17			8	4	11	11	11	13	6	177
Ao18	12	8	13	9	9	13	15	16	24	16	7	9	3	9	10	14	13	6	206
Ao35	12	8	13	13	9	14	15	15	24	16	7	9	3	9	10	15	13	6	211
Ao01								2		7	12	12	12	15	12	13	7		92
Ao17	12	7	12	9	9	14	11	16	23	16	9	8	9	9	10	15	13	6	208
Ao20	12	8	13	13	2	14	15	16	24	14	7	9	3	9	10	15	13	6	203
Ao16	12	8	12	9	9	14	16	16	24	16	7	8	9	9	10	14	13	6	212
Ch01			2	2	2	2	2	2	2	1						3	11	4	33
Ao22			2	1	1	2	1		8	8	7	8	9	9	10	13	13	6	98
Ao15	12	8	11	6	7	12	13	16	24	16	10	10	10	11	11	15	13	6	211
Ao39	12	8	13	13	9	14	15	16	24	14	7	8	9	9	10	14	13	6	214
Ao115									1	3	7	8	9	9	10	13	13	6	79
Ao116									1	3	7	8	9	9	10	13	13	6	79
Ao24	12	7	13	13	9	14	16	16	24	10	9	10	10	11	11	14	11		210
Ao21	12	8	13	13	2	14	15	16	24	16	7	8	9	9	10	15	13	6	210
Ao55					12	13	15	16	16	16	15	12	9	13	13	18	12	4	184
Ao14	11	8	13	9	6	14	15	16	24	15	7	8	9	9	10	15	13	6	208
Ao54					9	10	12	16	16	14	13	13	9	12	1	2			127
Po13					10	11	11	12	12	12	12	13	9	13	13	18	13	4	163
Ao56					12	13	16	16	16	15	12	13	9	13	13	16	13	3	180
Po02			1	2	2	2	4	4	4	3	3	1	1	2	1	6	10	4	50
Sc05					45	366	284	326	365	364	68	2	1	3	1	5	11	4	1845
Po12					2	2	2	2	4	3	2					2			19
Sc02		1	4	9	13	10	11	11	9	5									73
Qu10					9	12	9	12	11	11	10	13	8	11	1	1			108
Br10		9	3	7	11	4	3	4		1	1					12			55
Br04					2	4	3	4	4	4	3	2	1	4	1	13			41

Tabella 6.1: Selezione delle serie costituite da almeno 6 anni di misure con una frequenza di almeno 2 misure/anno; In azzurro sono evidenziati i punti di monitoraggio le cui serie arrivano fino al 2017

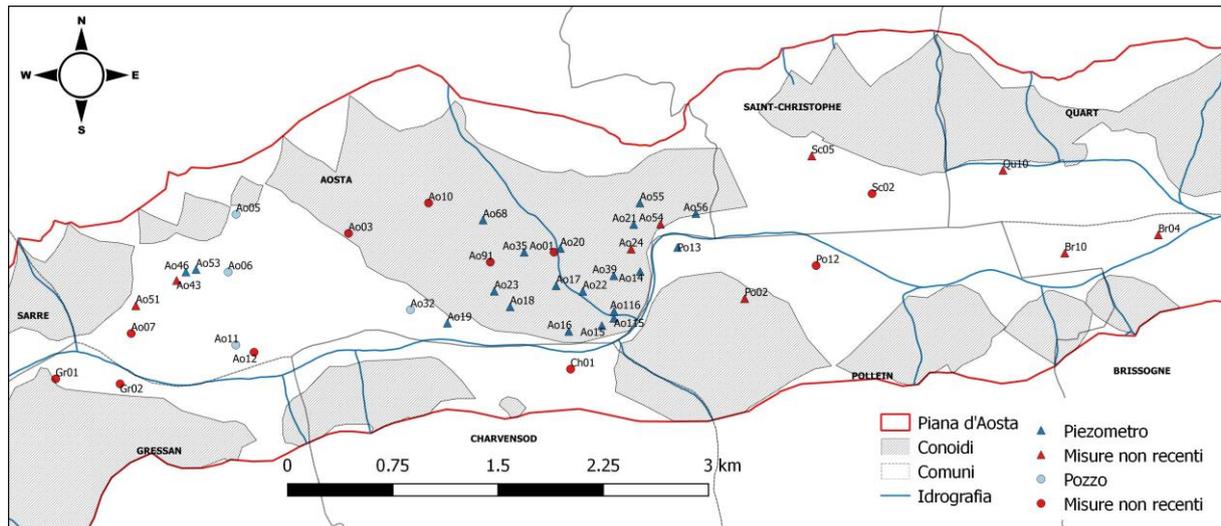


Figura 6.1: Inquadramento dei punti di monitoraggio dotati di almeno 6 anni consecutivi di monitoraggio con almeno 2 misure all'anno. In rosso i punti le cui serie non si spingono fino al 2017

Da questa prima analisi emerge l'impossibilità di applicare rigorosamente le linee guida pur con le condizioni meno restrittive proposte nel documento. Infatti in questo modo sarebbe possibile procedere con la valutazione dello stato quantitativo solo limitatamente al territorio del comune di Aosta, soprattutto in corrispondenza della conoide del torrente Buthier, senza poter valutare le altre aree della piana. Nell'ottica di dover estendere la valutazione alla scala dell'intero corpo idrico, la zona valutata sarebbe troppo limitata.

A maggior ragione, risulta ancor meno possibile ottenere una valutazione più approfondita, in quanto rendere più restrittivi i requisiti di accettabilità, esigendo una numerosità delle serie storiche di 4, 6 o 12 misure all'anno o aumentando la lunghezza minima delle serie stesse oltre i 6 anni, contrarrebbe ancora di più il numero di pozzi e piezometri utili, diminuendo ulteriormente l'area coperta.

Per poter comunque procedere ad una valutazione della piana, cercando di raggiungere il maggior numero di aree e fornire una descrizione più estesa, sono dunque state ridotte le condizioni applicate ai fini di questo lavoro.

In particolare si è deciso di utilizzare le serie storiche appartenenti ai punti di monitoraggio che presentano le seguenti caratteristiche:

- Almeno 4 anni di misure, di cui almeno 3 consecutivi
- Monitoraggio almeno fino al 2014

In questo modo sono stati inclusi anche quei pozzi e piezometri le cui serie, pur disponendo di una buona consistenza e giungere ad anni prossimi al presente, erano stati esclusi in quanto le misure disponibili non giungevano fino al 2017.

Il vincolo relativo alla frequenza di almeno 2 misure all'anno è stato parzialmente aggirato in funzione delle proprietà del test di Mann-Kendall (cfr. capitolo 6.3.1). Dal momento che questo test statistico è robusto rispetto alla presenza di dati mancanti, si è ritenuto accettabile per i fini del presente lavoro mantenere serie discontinue o con limitati anni dotati di una sola misura purché il resto di tali serie fosse significativo.

Questa modifica favorisce la rappresentatività spaziale contro la significatività delle analisi puntuali ma, dato il numero esiguo di dataset disponibili e adatti, è stato ritenuto un compromesso accettabile per esplorare i limiti imposti dalla rete di monitoraggio della Valle d'Aosta ed ottenere una approssimativa valutazione dei trend pluriennali.

Questa selezione ha permesso di considerare accettabili per l'analisi 64 punti di monitoraggio (*Tabella 6.2*). La collocazione risulta ancora concentrata nei pressi di Aosta, tuttavia con le nuove condizioni imposte è stato possibile mantenere piezometri che permettono di indagare parte della zona occidentale e l'estremità orientale della piana presso Pontey (*Figura 6.2*, *Figura 6.3* e *Figura 6.4*).

In particolare, i punti sono distribuiti come segue:

- 1 piezometro a Jovencan
- 26 piezometri e 11 pozzi ad Aosta
- 1 piezometro e 1 pozzo a Charvensod
- 6 piezometri a Pollein
- 3 piezometri a Saint-Christophe
- 3 piezometri a Quart
- 6 piezometri a Brissogne
- 6 piezometri a Pollein

La zona centro orientale della piana, dalla metà del territorio di Brissogne fino a Chambave, tuttavia risulta comunque sprovvista di punti di misura adatti alla valutazione, così come l'estremità occidentale tra Villeneuve e Aymavilles.

6. APPLICAZIONE DEL TEST 1 – BILANCIO IDRICO

Codice	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	tot
Jo02											16	365	366	12	1	1			761
Ao07			1				6	6	7	7	5	4	3	7	3				49
Ao51				2	66	362	241	4	4	3	2	2	1	2	1	2			692
Ao09			2				2	3	3	1					8	11	7		37
Ao46			5	12	13	13	13	12	12	12	14	11	9	11	12	15	12	4	180
Ao53				10	12	11	13	16	16	14	14	14	10	12	13	15	12	4	186
Ao06			2	2	2	2	2	1			12	12	12	14	12	14	10	3	100
Ao11			2	1	2	2	9	10	11	12	11	12	12	15	12	20	16	3	150
Ao05							16	18	24	17	13	12	12	14	12	14	10	3	165
Ao12			2	2			9	15	15	14	13	12	12	14	12	13	7		140
Ao61							4	2						2	1	5	11	3	28
Ao03							8	11	10	11	12	12	12	15	7				98
Ao73									2	2	2	1	2	1	5	10	3		28
Ao32	12	8	13	13	9	14	16	16	24	17	10	10	10	11	11	15	13	6	228
Ao10							9	14	13	11	11	12	12	15	12	13	7		129
Ch05											1	2	1	2	1	6	11	3	27
Ao19	11	7	13	13	9	14	15	16	24	17	9	10	10	11	11	14	13	6	223
Ao76													1			6	11	6	24
Ao68							1	15	14	15	13	14	12	15	13	15	11	4	142
Ao04			2	1	1		1	4	4	1	1		1	2		5	10	3	36
Ao91							7	11	10	12	12	12	11	14	12	12	7		120
Ao23	10	8	12	13	9	13	15	16	17			8	4	11	11	11	13	6	177
Ao18	12	8	13	9	9	13	15	16	24	16	7	9	3	9	10	14	13	6	206
Ao35	12	8	13	13	9	14	15	15	24	16	7	9	3	9	10	15	13	6	211
Ao01								2		7	12	12	12	15	12	13	7		92
Ao17	12	7	12	9	9	14	11	16	23	16	9	8	9	9	10	15	13	6	208
Ao20	12	8	13	13	2	14	15	16	24	14	7	9	3	9	10	15	13	6	203
Ao16	12	8	12	9	9	14	16	16	24	16	7	8	9	9	10	14	13	6	212
Ch01			2	2	2	2	2	2	2	1						3	11	4	33
Ao22			2	1	1	2	1		8	8	7	8	9	9	10	13	13	6	98
Ao15	12	8	11	6	7	12	13	16	24	16	10	10	10	11	11	15	13	6	211
Ao39	12	8	13	13	9	14	15	16	24	14	7	8	9	9	10	14	13	6	214
Ao115									1	3	7	8	9	9	10	13	13	6	79
Ao116									1	3	7	8	9	9	10	13	13	6	79
Ao24	12	7	13	13	9	14	16	16	24	10	9	10	10	11	11	14	11		210
Ao21	12	8	13	13	2	14	15	16	24	16	7	8	9	9	10	15	13	6	210
Ao55					12	13	15	16	16	16	15	12	9	13	13	18	12	4	184
Ao14	11	8	13	9	6	14	15	16	24	15	7	8	9	9	10	15	13	6	208
Ao54					9	10	12	16	16	14	13	13	9	12	1	2			127
Po13					10	11	11	12	12	12	12	13	9	13	13	18	13	4	163
Ao56					12	13	16	16	16	15	12	13	9	13	13	16	13	3	180
Po02			1	2	2	2	4	4	4	3	3	1	1	2	1	6	10	4	50
Sc16											1	1	1	3	1	6	11	4	28
Po34											1	2	1	2	1	6	10	3	26
Sc05					45	366	284	326	365	364	68	2	1	3	1	5	11	4	1845
Sc08								2	2	4	3	2	1	3	1	2			20
Po38										2				3	1	6	10	3	25
Po29									2	2	1			3	1	2			11
Po35											2	1	2	1	2				8
Qu10					9	12	9	12	11	11	10	13	8	11	1	1			108
Sc11								11	4	11	2	2	1	3	1	2			37
Br22											1	2	1	3	1	13			21
Br23													6	14	3	1			24
Br04					2	4	3	4	4	4	3	2	1	4	1	13			41
Br24													6	14	4	1			25
Br21									1	2	3	2	7	8		13			36
Br25													6	14	3	1			24
Qu16								3	4	4	2	2	1	2	1	2			21
Pn03								4	4	2	3		24	24	24	24			109
Pn07											3		24	24	23	24			98
Pn09											3		24	24	24	24			99
Pn08											3		24	24	24	24			99
Pn05								4	4	2	4		25	26	25	25			115
Pn06								4	4	2	3		24	24	24	24			109

Tabella 6.2: Punti di monitoraggio selezionati per la valutazione delle tendenze su scala pluriennale e consistenza delle relative serie storiche

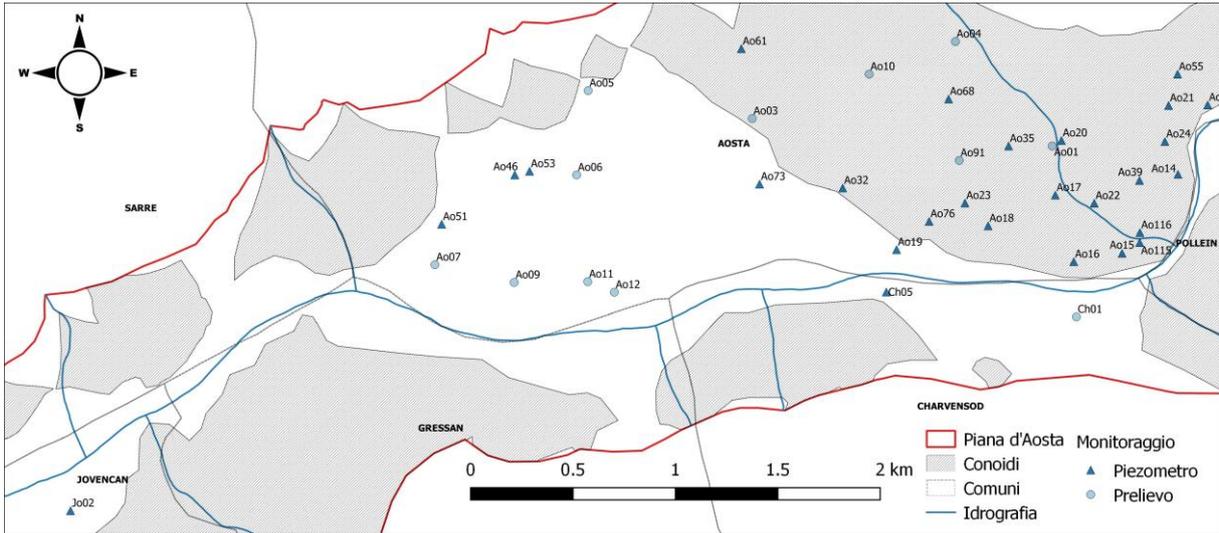


Figura 6.2: Inquadramento dei punti di monitoraggio selezionati nella zona centro-occidentale della piana d'Aosta

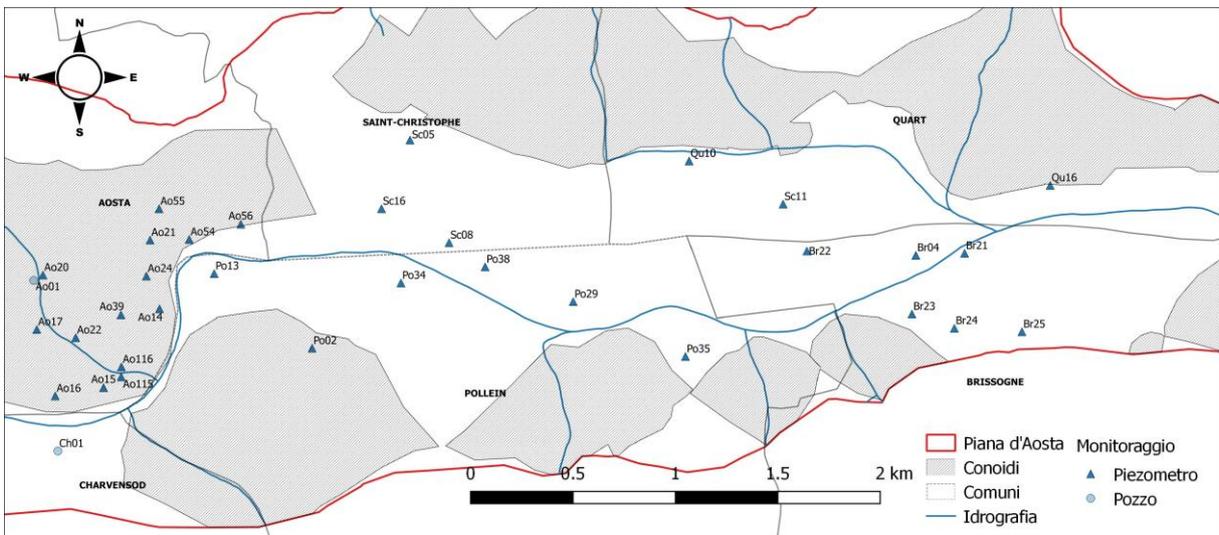


Figura 6.3: Inquadramento dei punti di monitoraggio selezionati nella zona centrale della piana d'Aosta

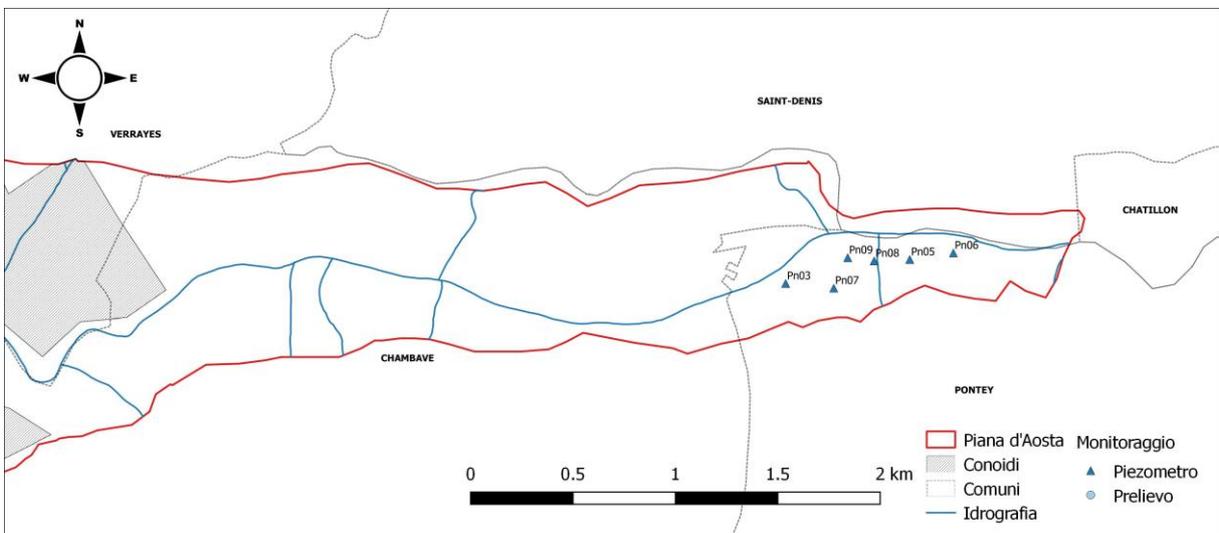


Figura 6.4: Inquadramento dei punti di monitoraggio selezionati nella zona orientale della piana d'Aosta

6.2 Analisi statistica delle serie storiche selezionate

Le serie storiche selezionate sulla base dei requisiti precedentemente descritti sono state sottoposte ad analisi statistica.

Attraverso la costruzione di grafici e il calcolo di indici statistici, per ogni stazione di monitoraggio selezionata è stato possibile:

- Esplorare graficamente la dinamica piezometrica
- Individuare la presenza di eventuali outliers
- Elaborare la retta di regressione e stimarne la pendenza
- Esprimere osservazioni circa l'abbondanza e l'omogeneità delle misure e la loro influenza sul calcolo della pendenza

6.2.1 Esplorazione grafica

Con l'ausilio di grafici di dispersione, sono state esplorate le serie storiche dei pozzi e dei piezometri per ricostruire la dinamica piezometrica e ottenere una prima valutazione della qualità dei dati.

I dataset sono stati raggruppati per comune e i punti di monitoraggio sono ordinati in direzione ovest-est, in accordo alla direzione di deflusso della falda.

Per consentire un confronto tra le serie, tutti i grafici sono stati costruiti con il medesimo range sia sull'asse verticale che sull'asse orizzontale. Sull'asse delle ordinate è stato riportato il carico idraulico, espresso in metri sopra il livello del mare, in un range di 15 m con intervallo di 1 m. L'asse delle ordinate riporta le date, dal 1 gennaio 2000 al 31 dicembre 2017, con un intervallo di 6 mesi.

In ogni grafico sono riportate al massimo 3 serie per permetterne una lettura sufficientemente chiara.

I dati delle serie sono stati collegati da una linea in modo da rendere evidente la presenza di dati mancanti o distanti cronologicamente e la presenza di valori fuori tendenza come supporto per la successiva ricerca degli outliers.

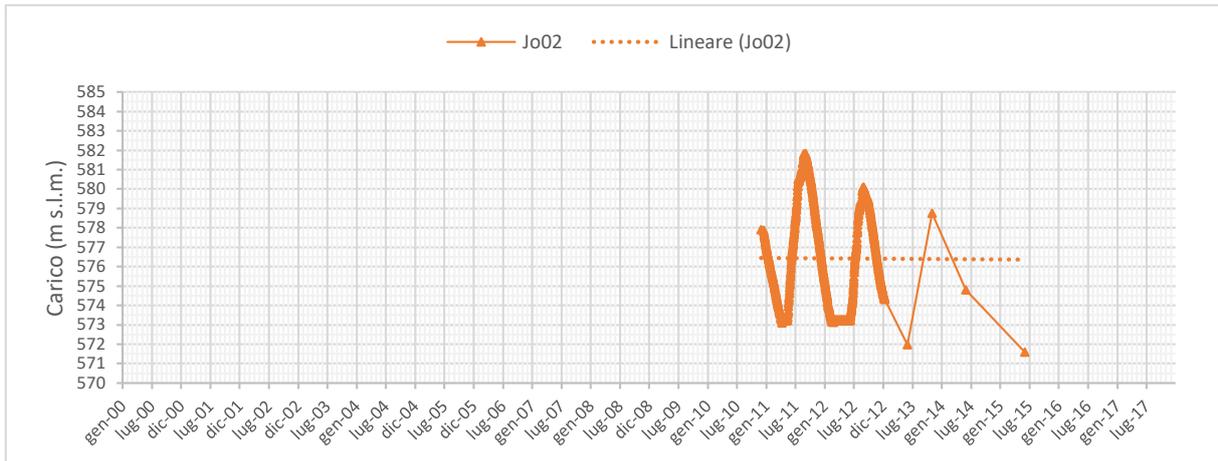
JOVENCAN:

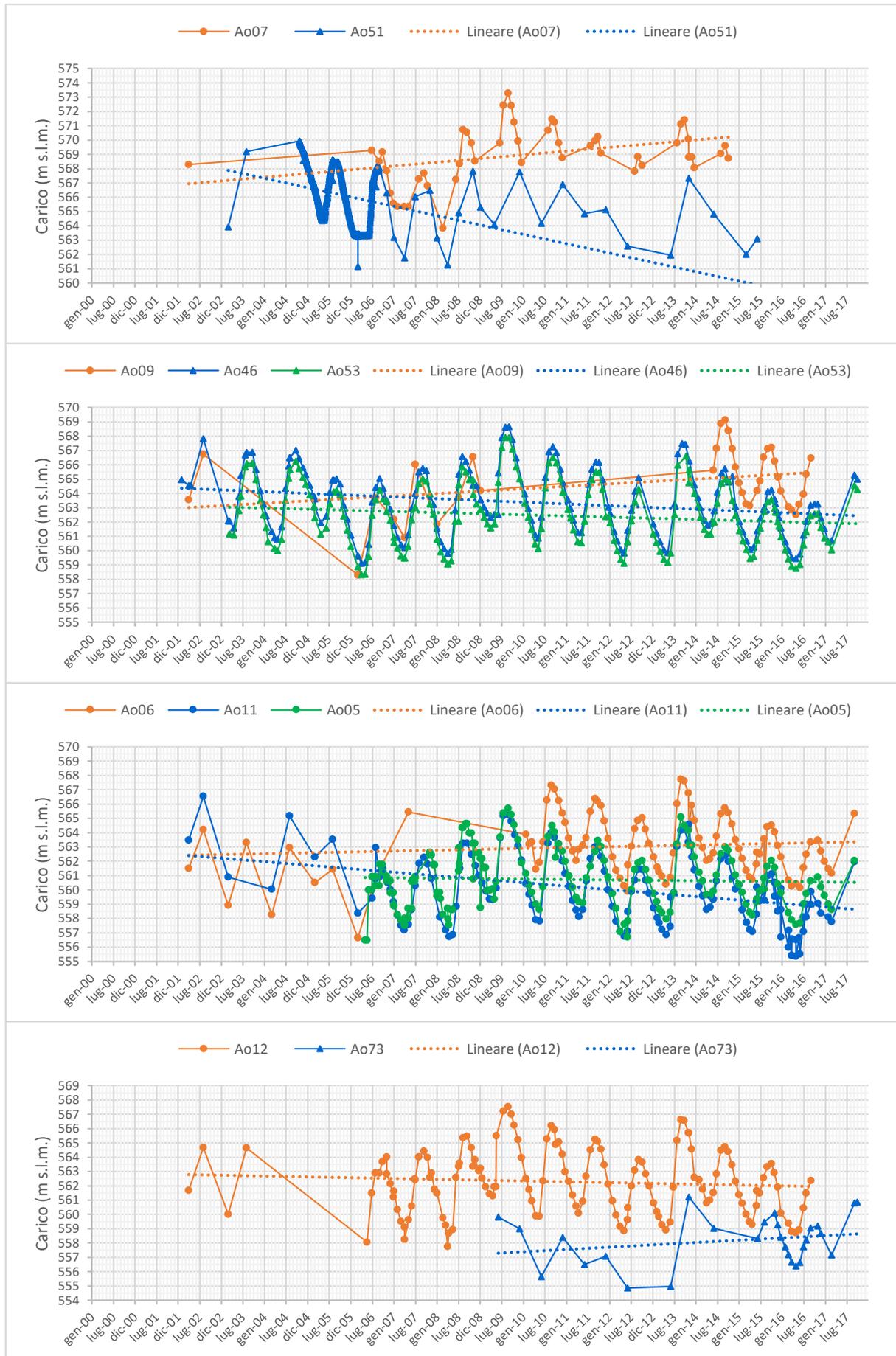
Figura 6.5: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Jovencan

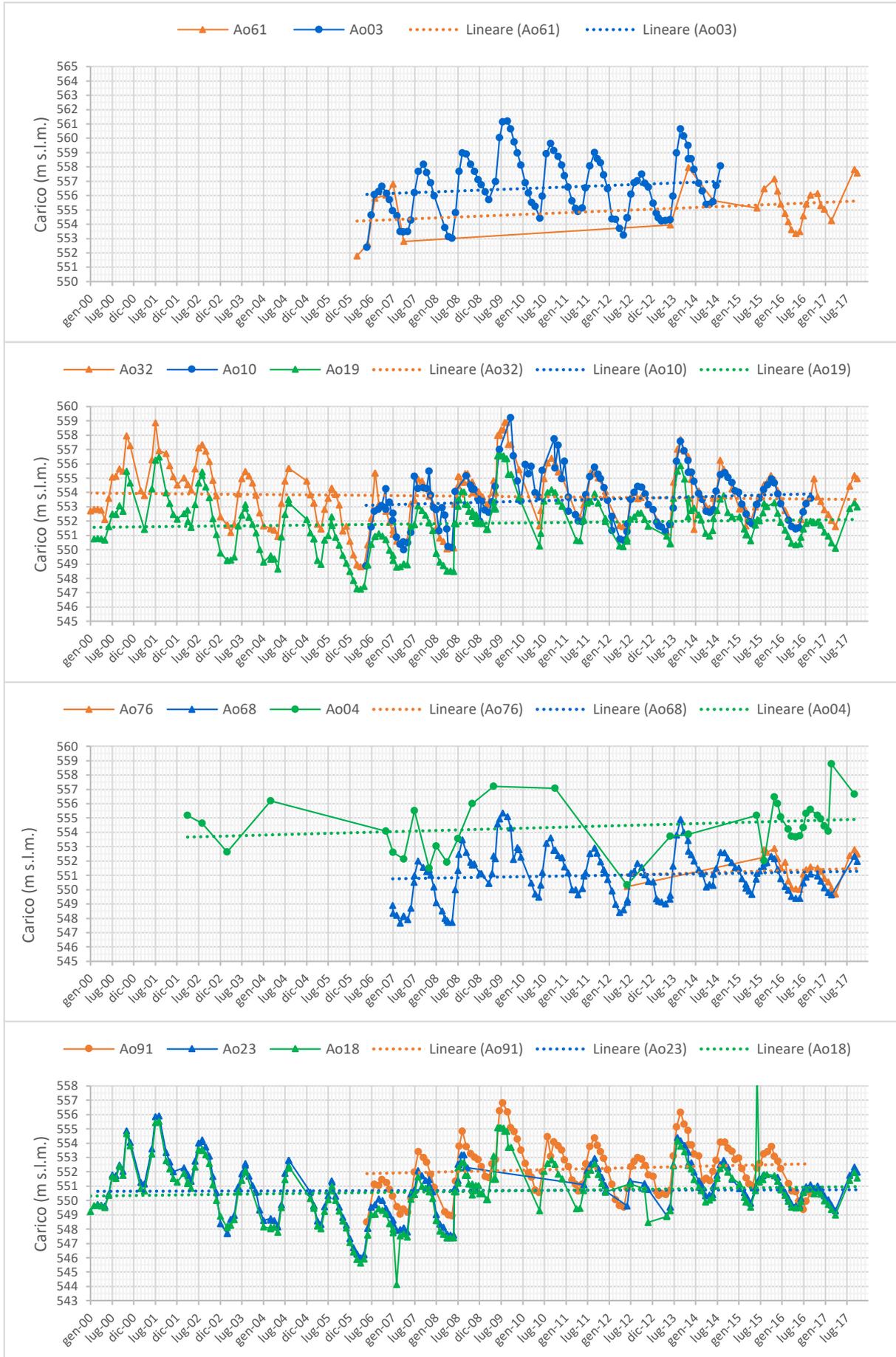
La piezometria nella zona di Jovencan è descritta da un solo piezometro, collocato in destra idrografica della Dora Baltea.

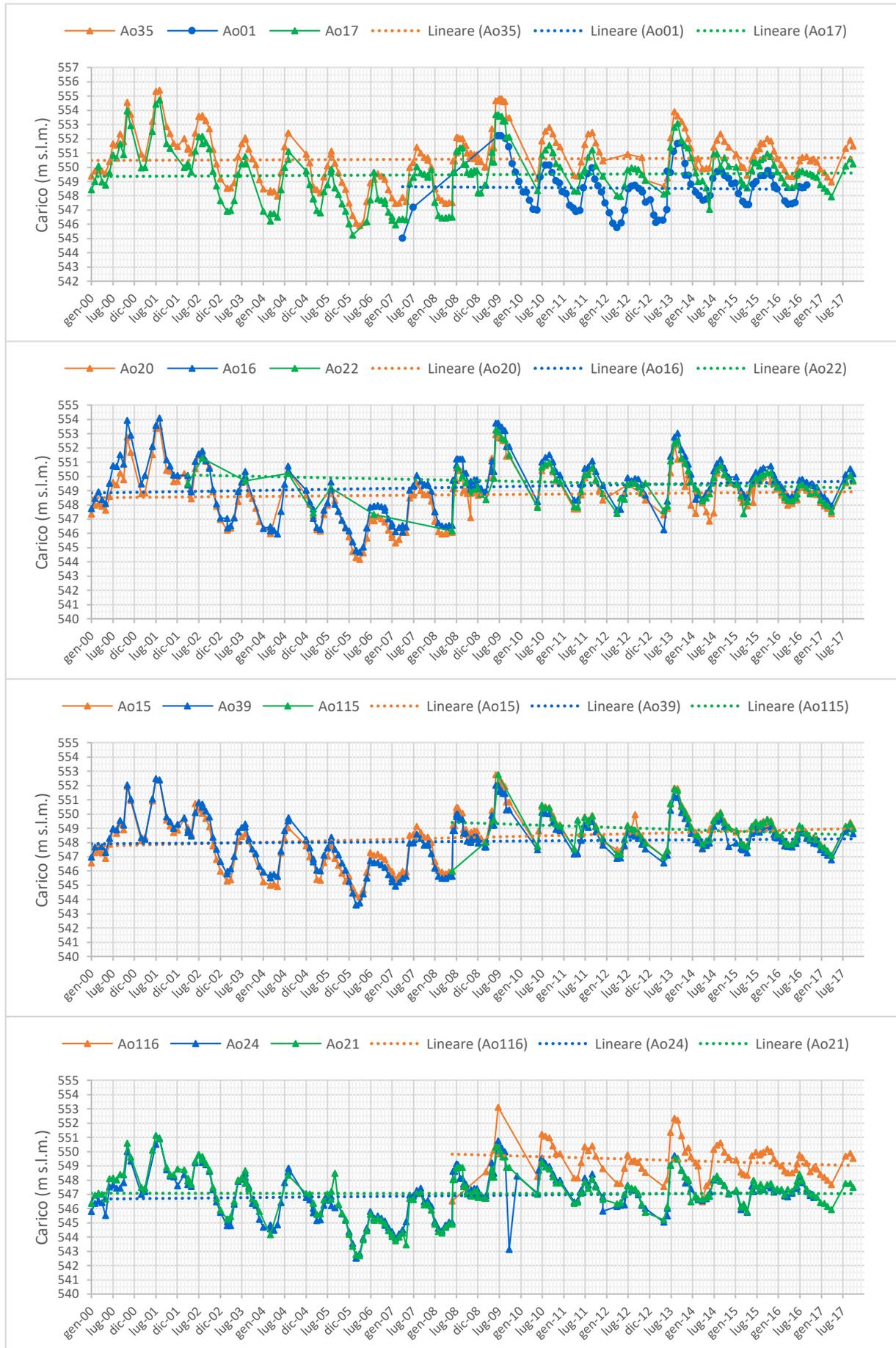
La serie fornita non gode di una lunghezza apprezzabile, coprendo solamente dall'inizio del 2011 alla metà del 2015. Tuttavia, essendo stato attivato un datalogger nel periodo compreso tra il 2011 e la fine del 2012, l'andamento piezometrico in quegli anni è rappresentato con precisione.

Il carico idraulico oscilla tra un massimo di circa 581.82 m s.l.m. ad un minimo di circa 571.60 m s.l.m. con un'escursione stagionale nell'ordine di circa 8 metri. Si notano un minimo primaverile e un massimo estivo, in accordo con quanto descritto nella sezione relativa all'inquadramento dell'area di studio (cfr. capitolo 4.6.1).

AOSTA:







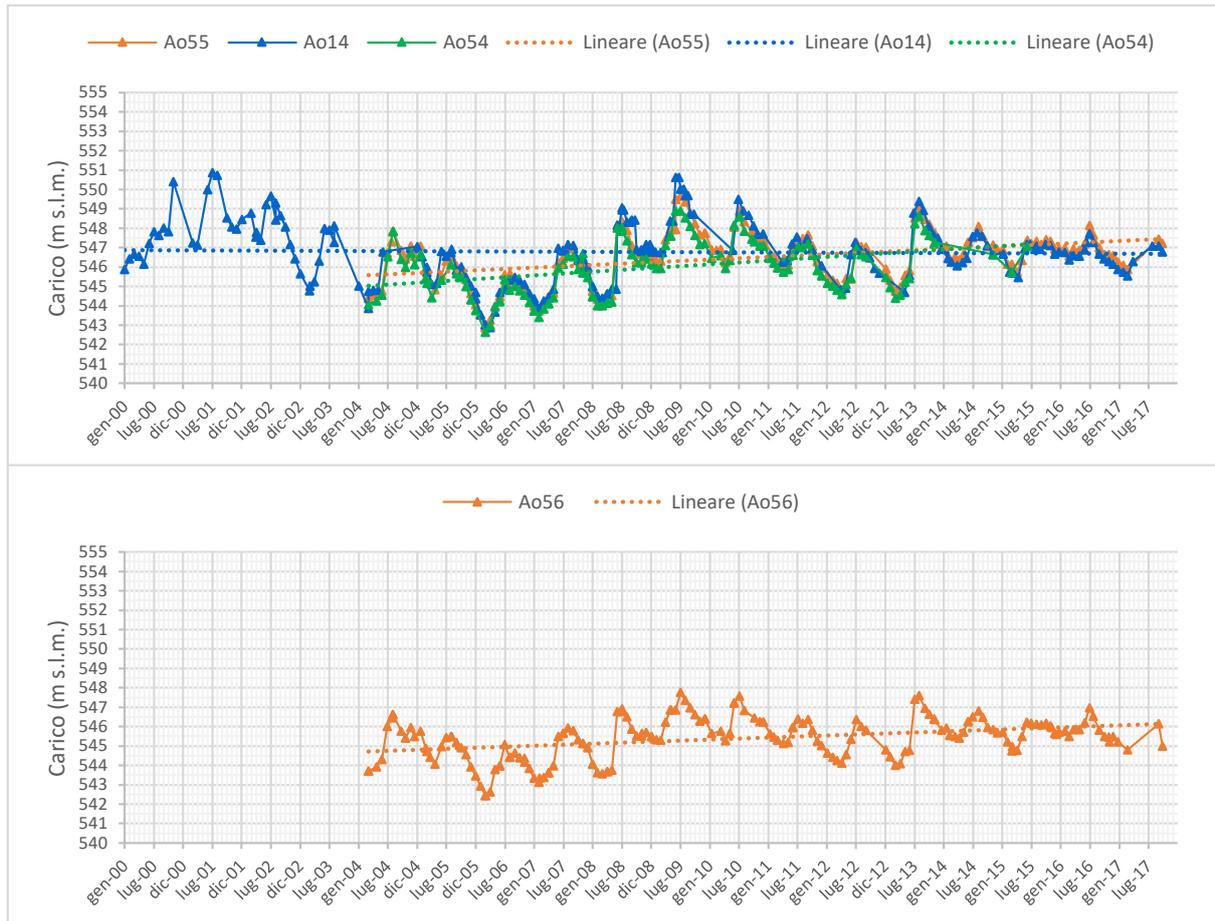


Figura 6.6: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Aosta

La piana nel comune di Aosta è descritta da 37 punti di monitoraggio, di cui 26 piezometri e 11 pozzi. Le serie storiche sono generalmente contraddistinte da una buona lunghezza temporale e da elevata numerosità campionaria.

Tra queste si possono tuttavia notare alcune serie discontinue, in cui i campionamenti sono stati interrotti e ripresi o mostrano periodi con una sola misura all'anno. In particolare, i più evidenti sono:

- Ao09 (pozzo) presenta un'interruzione dal 2003 al 2005, seguita da 4 anni di misure che si interrompono nuovamente fino al 2014;
- Ao06 (pozzo) è stato misurato con cadenza semestrale tra il 2002 e il 2006 ed un'ultima misura nel 2007 per poi essere sottoposto a monitoraggio mensile dal 2010;
- Ao12 (pozzo) ha subito un'interruzione nel 2004 e 2005;
- Ao61 (piezometro), con due soli anni di misure nel 2006 e 2007, non è stato più monitorato fino al 2013;

- Ao04 (pozzo) ha subito interruzioni nel 2005, 2011 e 2014, con anni in cui il livello piezometrico è stato misurato una sola volta (2002-2003, 2006, 2009-2010 e 2013);
- Ao23 (piezometro), nonostante presenti una buona numerosità campionaria, non è stato monitorato nel 2009 e nel 2010;

La frequenza di monitoraggio appare invece diffusamente elevata con cadenze da mensili a trimestrali, ad eccezione dei casi citati di discontinuità, e solo qualche puntuale misura semestrale o inferiore.

Il piezometro Ao51 presenta misure rilevate in continuo da un datalogger tra il 2004 e il 2006, tuttavia in seguito si sono ridotte a cadenza trimestrale o minore. Una prima valutazione visuale mostra una possibile influenza della densità delle misure sulla pendenza della retta di regressione, aspetto che verrà approfondito nel capitolo 6.2.3.

Per quanto riguarda la dinamica piezometrica, sono ben visibili i massimi estivi e i minimi primaverili. La fluttuazione stagionale si riduce progressivamente da ovest verso est, con un range di 5-6 metri nella zona occidentale e di 2-3 metri ad est del torrente Buthier.

All'estremità occidentale del comune il carico idraulico va da un massimo di 573.27 m s.l.m. ad un minimo di 565.34 m s.l.m. (Ao07), mentre all'estremità orientale il massimo è di 547.76 m s.l.m. e il minimo è di 542.45 m s.l.m. (Ao56), con una differenza di quota dell'ordine dei 24 metri da un capo all'altro del territorio di Aosta.

La lunghezza delle serie storiche permette di individuare un calo dei livelli piezometrici comune a tutti i punti nei primi anni del 2000 che raggiunge un minimo nel 2006, seguito da una ricarica della falda con un picco di massimo nel 2009. L'entità di questa variazione è di circa 3-4 metri in tutto il territorio di Aosta.

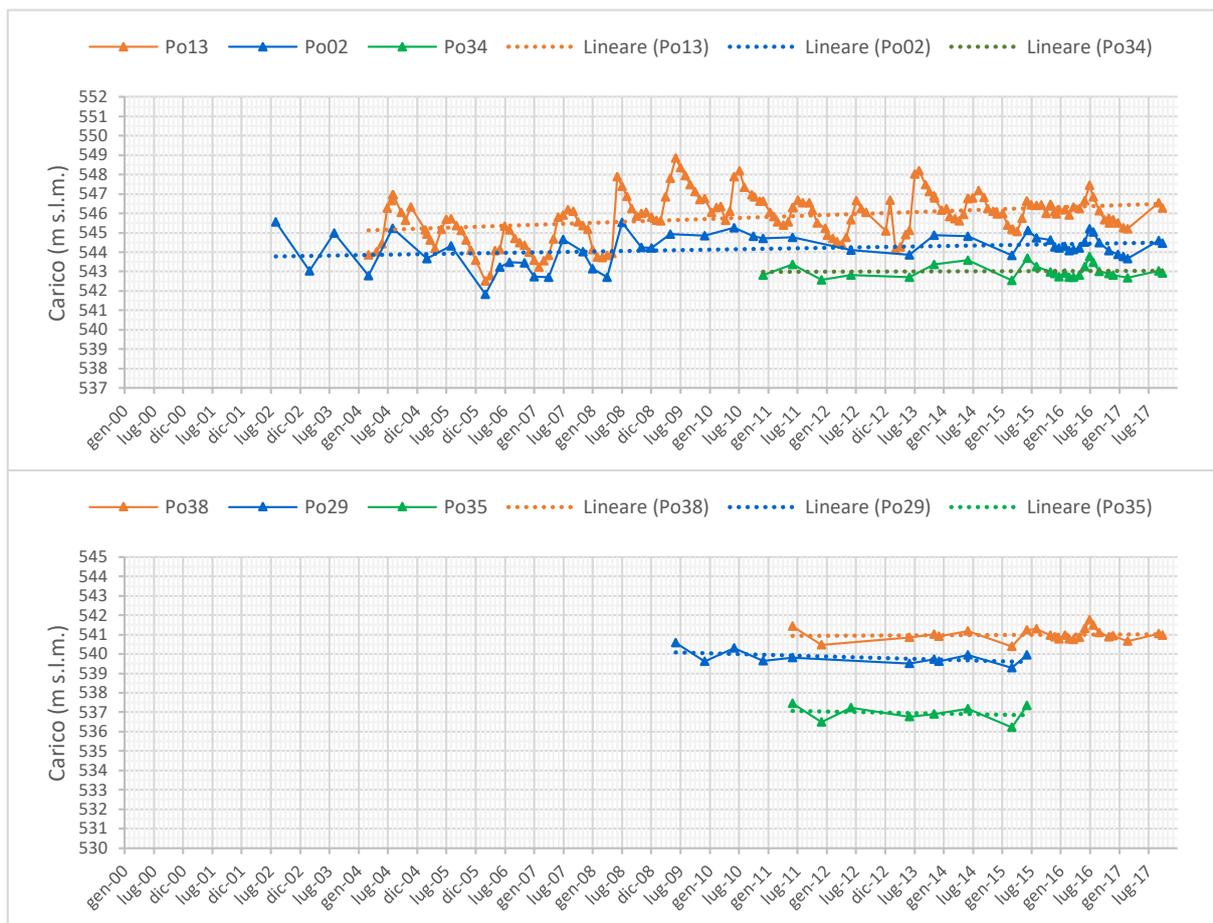
POLLEIN:

Figura 6.8: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Pollein

Nel territorio di Pollein sono presenti 2 piezometri in sinistra idrografica della Dora Baltea (Po38 e Po29) e 4 piezometri in destra idrografica, di cui 3 a monte della confluenza con il torrente d'Arpisson (Po13, Po02 e Po34) ed uno tra le conoidi generate da questo corso d'acqua e dal torrente du Val Moudzou.

Le serie storica più accurata appartiene a Po13, che ricopre un periodo di 14 anni dal 2004 al 2017 con misure a cadenza mensile o maggiore per quasi tutta la sua lunghezza.

Più estesa, ma con meno misure, è la serie storica di Po02, che è dotata di misure semestrali o trimestrali dal 2002 ad oggi, con un aumento della frequenza successivamente al 2015. Si sottolinea tuttavia la presenza di alcuni anni con una sola misura, precisamente nel 2002, 2011, 2012 e 2014, che si possono notare nel grafico dal momento che determinano un appiattimento dell'andamento in quanto non sono in grado di rappresentare le fluttuazioni stagionali.

Po34 e Po38, il primo in destra e il secondo in sinistra idrografica della Dora Baltea, hanno serie che arrivano al 2017, ma più brevi e caratterizzate dalle stesse criticità di Po02, con anni senza misure o con misura singola che non rendono conto della stagionalità della piezometria e conferiscono linearità ai relativi grafici.

Gli ultimi due piezometri, Po29 e Po35, presentano serie brevi e caratterizzate da monitoraggio discontinuo e poco omogeneo che si fermano al 2015.

Il confronto tra i grafici mostra un abbassamento del carico idraulico da ovest verso est in accordo all'andamento della piana e alla direzione di deflusso della Dora Baltea, con una diminuzione della quota della falda di circa 9 metri tra Po13 e Po35.

Le fluttuazioni stagionali della piezometria, come menzionato, sono visibili solo per Po13 e, in misura minore, per Po02, ma in queste due serie si possono notare il minimo primaverile in marzo-aprile ed il massimo estivo in luglio-agosto con un range di circa 3 metri.

Si possono notare il periodo di minimo piezometrico del 2006 seguito dalla risalita che porta al massimo del 2009. Per Po02 tuttavia il calo del monitoraggio maschera il picco e, fino al 2014, tutti i massimi estivi e minimi primaverili, anche se le misure presenti sono in accordo con quelle di Po34.

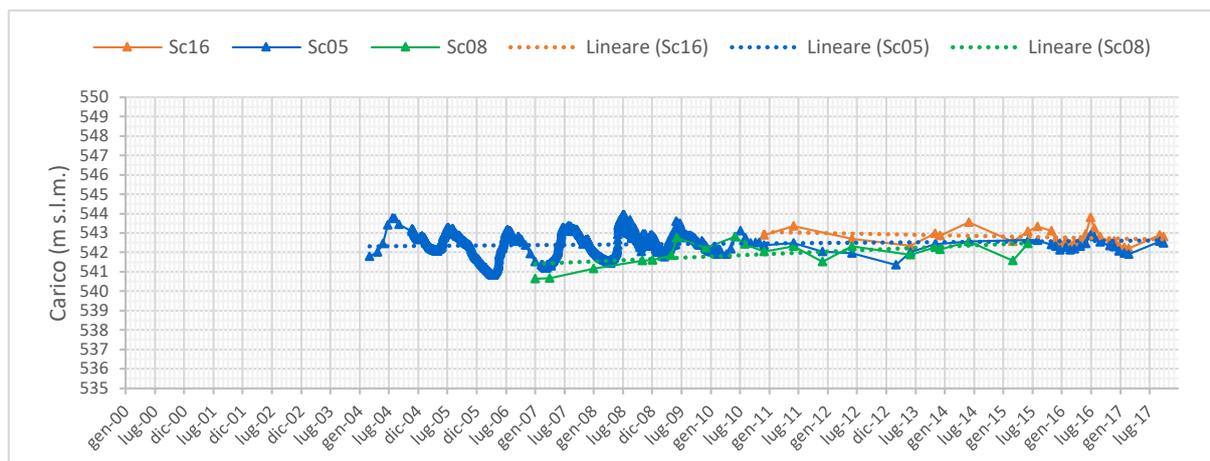
SAINT-CHRISTOPHE:

Figura 6.9: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Saint-Christophe

Il comune di Saint-Christophe ospita 3 piezometri, tutti posti in sinistra idrografica della Dora Baltea e posti più a monte di Po38 e Po29 che risiedono nel comune di Pollein sulla stessa sponda del fiume.

I punti Sc16 e Sc08 sono collocati nei pressi del fiume, mentre Sc05 si trova più a monte lungo il versante, in prossimità della conoide presente.

Il piezometro Sc05 è stato dotato di un datalogger che ha registrato dati in continuo tra il 2004 e il 2010, tuttavia in seguito la frequenza di monitoraggio è calata a misure semestrali per poi essere nuovamente incrementata a misure mensili dopo il 2015. Inoltre il 2012 e il 2014 presentano un solo valore registrato. Nonostante la precisione della ricostruzione della dinamica piezometrica tra il 2004 e il 2010, la riduzione dei monitoraggi crea un appiattimento del grafico nel periodo successivo che non permette di visualizzare i massimi e i minimi annuali.

La serie di Sc08, iniziata nel 2007 e conclusa nel 2015, presenta una frequenza di monitoraggio che oscilla tra trimestrale e semestrale, generalmente con rilevamenti effettuati in giugno e in dicembre, che non permettono di visualizzare le fluttuazioni stagionali.

In maniera analoga, Sc16 presenta un dataset estremamente ridotto, con una sola misura all'anno tra il 2010 e il 2014, ad eccezione del 2013 in cui la falda è stata misurata 3 volte. Come per Sc05, dal 2015 la frequenza di monitoraggio è stata incrementata prima a 6 e poi a 11 misure all'anno, con una rappresentazione più precisa delle oscillazioni della quota della falda.

Basandosi sui dati rilevati in continuo, in Sc05 si può notare la fluttuazione stagionale della falda, dell'ordine di 2 metri, con minimi in marzo-aprile e massimi in luglio.

Queste misure permettono inoltre di visualizzare il minimo del 2006 e il massimo del 2009, che però appaiono di entità minore rispetto alle zone più a monte lungo la piana, con una variazione di circa 1 metro. La variazione pluriennale in questo punto oscilla tra 540.82 m s.l.m. e i 543.93 m s.l.m.

La direzione di deflusso della falda sembra mantenersi in direzione ovest-est, con un abbassamento del carico di circa 1 metro tra Sc16 e Sc08.

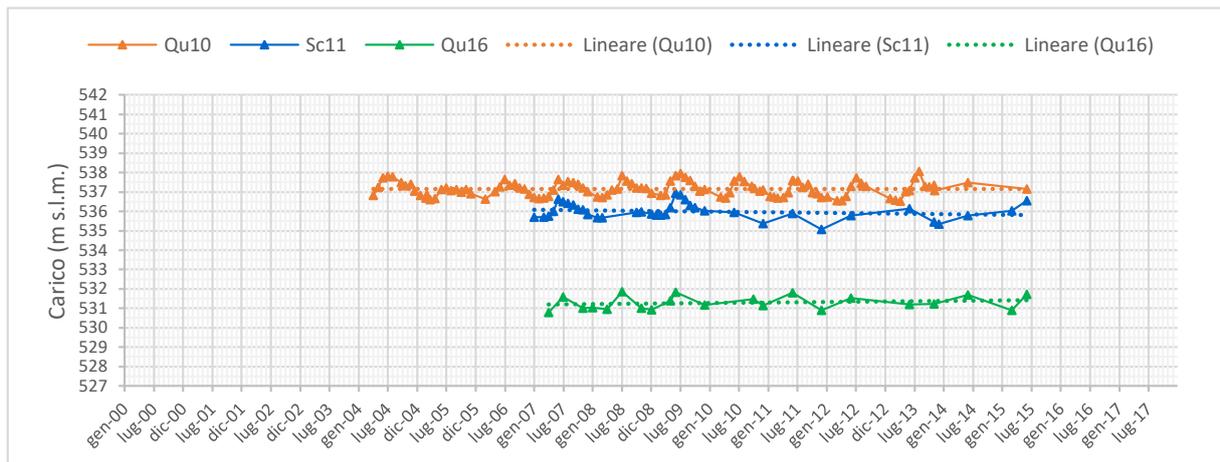
QUART:

Figura 6.10: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Quart

I tre piezometri presenti nel comune di Quart sono tutti collocati in sinistra idrografica della Dora Baltea, due di essi (Qu10 e Sc11) a monte della confluenza dei tributari nel corso d'acqua principale, mentre Qu16 più a valle. Inoltre Qu10 e Qu16 sono posti in prossimità delle conoidi, mentre Sc11 in una zona intermedia tra i fiumi.

La serie storica di Qu10 appare consistente e abbondante, con misure mensili tra il 2004 e il 2013, tuttavia essa si interrompe nel 2015, dopo due anni monitorati una sola volta, e dunque non si spinge fino al presente. Dal grafico è possibile identificare i minimi primaverili intorno a marzo e i massimi estivi in luglio, con una fluttuazione stagionale di circa 1.5 metri.

Il minimo del 2006 e il massimo del 2009 registrati nei punti di monitoraggio più a monte non risultano evidenti, con una variazione di circa 20-30 cm nello stesso periodo.

Sc11 e Qu16 hanno serie della medesima durata, dal 2007 al 2015, ma differiscono per omogeneità temporale di monitoraggio. Qu16 infatti presenta misure trimestrali o semestrali per quasi tutto il periodo, mentre Sc11 presenta minore costanza, con 11 misure nel 2007 e nel 2009 a fronte di misure semestrali nel resto del periodo. In entrambi i piezometri è stata effettuata una sola misurazione sia nel 2012 sia nel 2014.

Le misure semestrali sono state generalmente rilevate in giugno e dicembre e non sono quindi rappresentative dei massimi e minimi livelli di falda annuali.

Da ovest ad est la quota della falda si riduce di circa 6 metri, con un carico compreso tra i 536.52 e i 538.07 m s.l.m. in Qu10 e tra i 530.78 e i 531.85 m s.l.m. in Qu16, confermando la direzione di deflusso ovest-est.

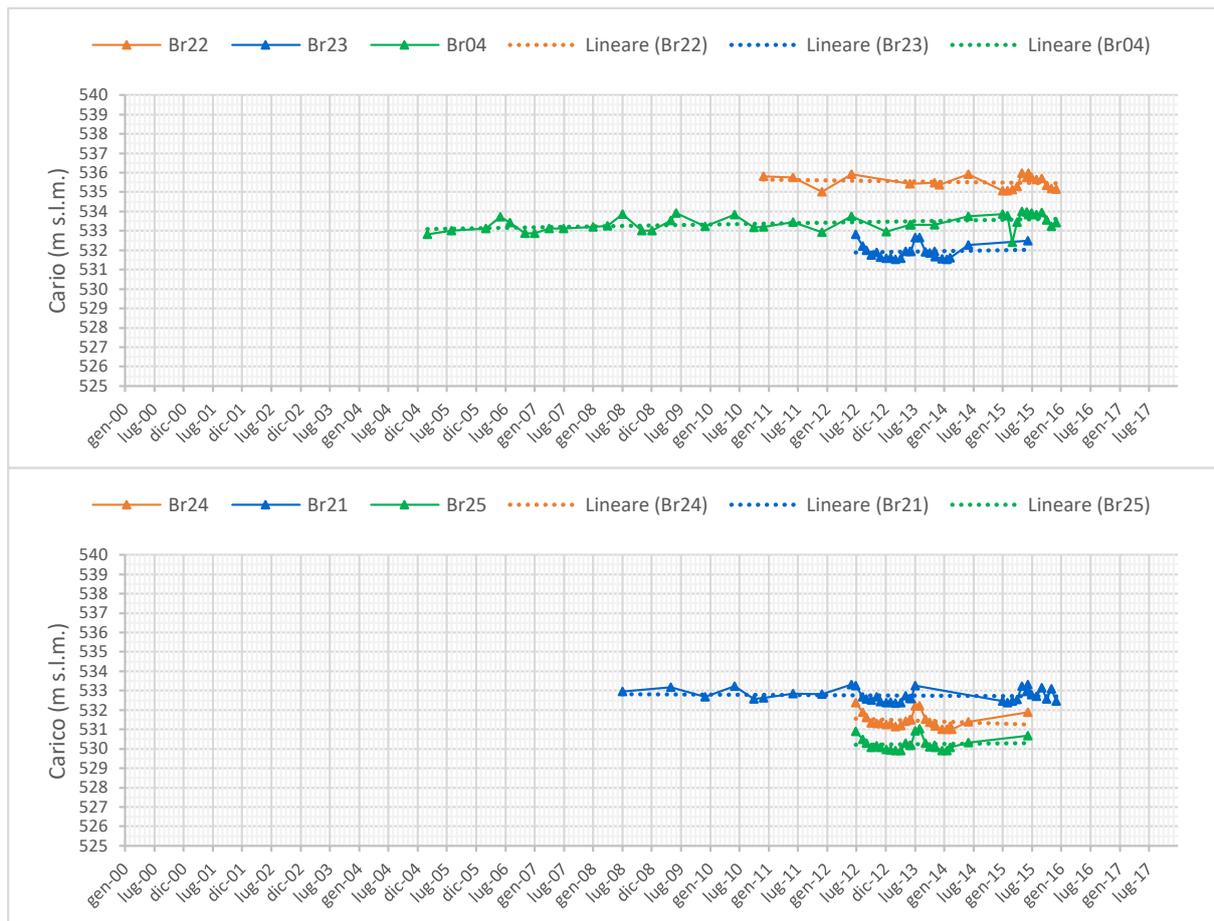
BRISOGNE:

Figura 6.11: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Brissogne

Dei 6 punti di monitoraggio presenti a Brissogne, 2 sono situati in sinistra idrografica della Dora Baltea (Br22 e Br04) e sono piezometri di controllo per la discarica posta nella zona, mentre 4 sono in destra idrografica (Br23, Br24, Br21 e Br25).

Le serie di cui si dispone per questi piezometri sono generalmente brevi, poco numerose, non omogenee e interrotte prima del 2017. Ad eccezione di Br04 e di Br21 che sono stati monitorati più a lungo, gli altri piezometri presentano meno di 6 anni di misure, con anni privi di misure o con un solo dato piezometrico.

Per ognuno dei 6 piezometri è tuttavia presente un anno contraddistinto da elevata numerosità campionaria, in particolare il 2013 con 14 misure piezometriche per Br23, Br24 e Br25, e il 2015 con 13 misure piezometriche per Br22, Br04 e Br21.

Sulla base dei pochi anni ben descritti, si può vedere che il minimo annuale è maggiormente esteso temporalmente rispetto ai punti di monitoraggio nelle zone più a monte, con livelli simili

tra febbraio e maggio, mentre il massimo si colloca in luglio-agosto. La fluttuazione stagionale dei livelli di falda, limitatamente al 2013 e al 2015, è di circa 1-1.5 metri.

Per gli anni con una frequenza campionaria inferiore, le misure registrate fanno riferimento per la maggior parte a giugno e dicembre, dunque mesi che non sembrano essere descrittivi degli estremi di abbassamento o ricarica della falda. I grafici che ne conseguono sono caratterizzati da una certa stabilità che non mostra evidenti fluttuazioni stagionali.

Ad un'analisi visiva, non appaiono evidenze per identificare il 2006 e il 2009 come anni rispettivamente di minimo e massimo pluriennali come mostrato invece dai piezometri posti più a monte lungo la piana.

Il deflusso della falda mantiene una predominante direzione ovest-est, ma mostra anche una tendenza verso sud, con i piezometri settentrionali contraddistinti da carichi maggiori a parità di longitudine. I livelli della falda decrescono di circa 5-6 metri da nord-ovest, con fluttuazioni tra un minimo di 535.02 m s.l.m. e un massimo di 535.97 m s.l.m. in Br22, verso sud-est, con fluttuazioni tra un minimo di 529.90 m s.l.m. e un massimo di 531.03 m s.l.m. in Br25. Tale aspetto viene enfatizzato confrontando le piezometrie dei punti di monitoraggio di Brissogne con quella di Qu16 che è posto in posizione più orientale ma presenta carichi maggiori.

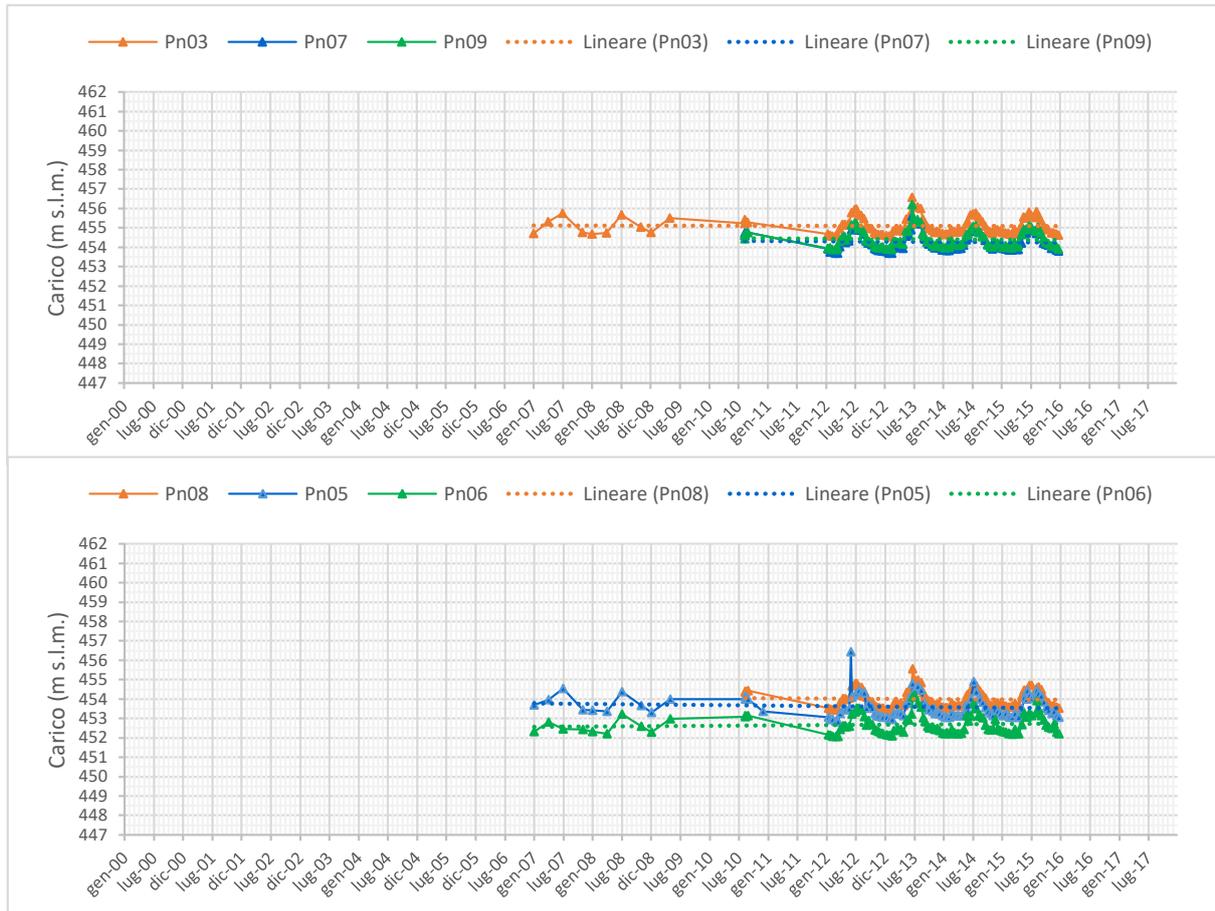
PONTEY:

Figura 6.12: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Pontey

Nel comune di Pontey sono stati mantenuti 6 piezometri, tutti posti in destra idrografica della Dora Baltea, dove la piana si restringe.

Nonostante tutte le serie si interrompano nel 2015, i quattro anni precedenti sono contraddistinti da un'elevata numerosità campionaria, pari ad almeno 2 misure al mese, che forniscono una robusta immagine dell'evoluzione piezometrica di quel periodo.

Questi piezometri sembrano essere stati sottoposti a due piani di monitoraggi diversi. Il primo, caratterizzato da una frequenza minore tra semestrale e trimestrale, ha coperto il periodo tra il 2007 e il 2010 per Pn03, Pn05 e Pn06, ed il solo 2010 per Pn07, Pn09 e Pn08. Tutti i piezometri comunque non sono stati monitorati durante il 2011.

Le serie mostrano una fluttuazione stagionale dell'ordine di circa 1.5 metri, che presenta un breve picco massimo in estate, a cavallo di luglio, e un calo inizialmente repentino e poi più graduale, con bassi livelli piezometrici nei mesi invernali e minimo in gennaio-febbraio.

Le misure semestrali, rilevate in luglio e gennaio, corrispondono ai periodi di massima ricarica e minimo piezometrico annuali e quindi sono in grado di rappresentare le fluttuazioni stagionali anche negli anni meno coperti da monitoraggio.

La lunghezza delle serie non fornisce informazioni relative al 2006 e alla riduzione del carico idraulico registrato nei piezometri più a monte, ma le misure relative al 2009 non mostrano apprezzabili differenze rispetto alle misure successive e non forniscono evidenze della risalita della falda.

La direzione di deflusso della falda si mantiene in direzione ovest-est, in accordo con l'andamento della valle e allo scorrimento della Dora Baltea. I carichi idraulici si riducono di circa 2.5 metri tra Pn03, dove si registrano oscillazioni tra i 454.5 m s.l.m. e i 456.09 m s.l.m., e Pn06, che presenta oscillazioni tra i 452.06 m s.l.m. e i 454.19 m s.l.m.

6.2.2 Ricerca degli outliers

Per individuare gli outliers e ripulire le serie storiche da eventuali dati fuori tendenza o aberranti, è stato adottato un procedimento in due fasi:

- Approccio statistico basato sul calcolo di indici di posizione;
- Approccio grafico e visivo per l'individuazione di eventuali falsi positivi restituiti dal metodo statistico o di falsi negativi non riconosciuti;

Nella prima fase, per ogni serie storica sono stati calcolati:

- Primo quartile (Q_1), corrispondente al valore che delimita il 25% minore delle misure;
- Terzo quartile (Q_3), corrispondente al valore che delimita il 25% maggiore delle misure;
- Range interquartile (IQR), pari alla differenza tra primo e terzo quartile;
- Limite inferiore, corrispondente al primo quartile, meno una volta e mezza l'IQR

$$\text{Limite inferiore} = Q_1 - 1.5 * IQR$$

- Limite superiore, corrispondente al terzo quartile, più una volta e mezza l'IQR

$$\text{Limite superiore} = Q_3 + 1.5 * IQR$$

Confrontando ogni misura con i limiti inferiore e superiore relativi al proprio dataset, sono stati identificati i valori che si discostano considerevolmente dalla relativa popolazione campionaria (Figura 6.13).

Questo approccio tuttavia non riconosce eventuali outliers interni, simili alla media ma diversi dai valori vicini, come quelli che per esempio possono essere presenti nelle misure di mesi non corrispondenti a minimi o massimi annuali.

Inoltre, considerando che il 2006 è stato un anno con misure discretamente inferiori e il 2009 è stato un anno con misure superiori, alcuni di questi valori potrebbero essere erroneamente interpretati come outliers.

Pertanto questa prima ricerca è stata seguita da una seconda analisi utilizzando i grafici per individuare gli outliers interni e correggere eventuali errori di interpretazione del test statistico basato sugli indici di posizione (Figura 6.14).

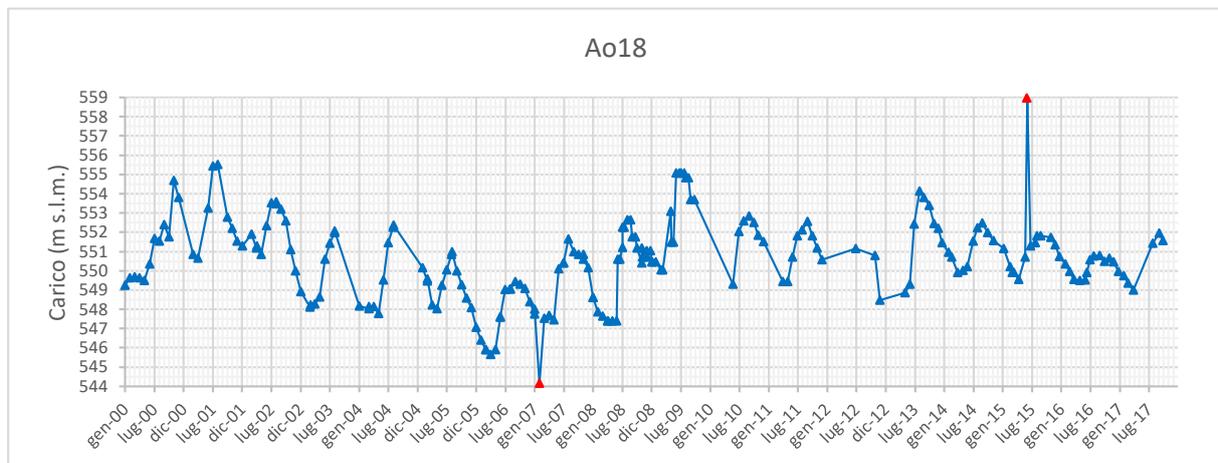


Figura 6.13: Esempio di outliers riconosciuti dal test statistico per la serie del piezometro Ao18, evidenziati in rosso

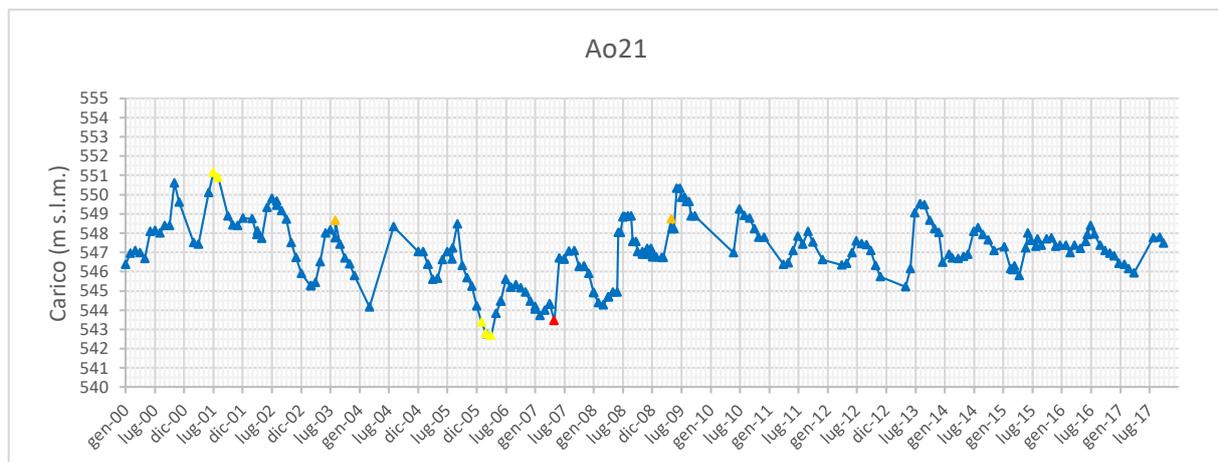


Figura 6.14: Esempio di valutazione grafica degli outliers. In rosso gli outliers riconosciuti in base agli indici di posizione, in giallo i falsi positivi riconosciuti erroneamente dal test statistico, in arancio i falsi negativi non riconosciuti dal test.

È stata tenuta traccia di ogni misura, mantenendo i dataset originali ed evidenziando i valori da escludere, inserendo un filtro che permette di visualizzare le serie con o senza outliers e aggiornare di conseguenza i grafici in modo automatico per visualizzarne le differenze.

L'abbondanza di dati per ogni serie storica prima e dopo la ricerca degli outliers è stata annotata e riportata in tabella a scopo di confronto.

Le serie ripulite degli outliers sono state utilizzate per le successive analisi della tendenza puntuale dei livelli piezometrici.

6.2.3 Calcolo della pendenza

Per giungere alla successiva valutazione dei trend piezometrici a scala puntuale, per ogni dataset è stata calcolata la retta di regressione e la relativa pendenza, corrispondente al coefficiente angolare dell'equazione.

In primo luogo sono state elaborate le rette di regressione per ogni serie storica utilizzando l'intero dataset disponibile per ogni pozzo o piezometro, ripulito dagli eventuali outliers.

Tuttavia, durante l'elaborazione, si è notata una possibile interferenza della disomogeneità temporale dei dati sul calcolo della pendenza. In particolare, per quelle serie che presentano una marcata differenza di misure annuali al proprio interno, il peso esercitato dalla densità dei dati altera l'andamento della retta di regressione.

È il caso, per esempio, di quei piezometri che sono stati dotati di un datalogger per un periodo durante il loro monitoraggio. L'effetto risulta tanto più evidente quanto minore è la frequenza di monitoraggio adottata senza il dispositivo per la rilevazione di misure in continuo.

Per esplorare questa criticità sono quindi state confrontate le rette di regressione ottenute dall'intero dataset e quelle ottenute utilizzando le medie mensili.

Dal confronto si è notato che una sostanziale differenza nella numerosità campionaria tra periodi diversi può influire sul calcolo della retta di regressione portando ad una sovrastima (*Figura 6.15*) o ad una sottostima (*Figura 6.16*) della pendenza e quindi della tendenza su lungo periodo.

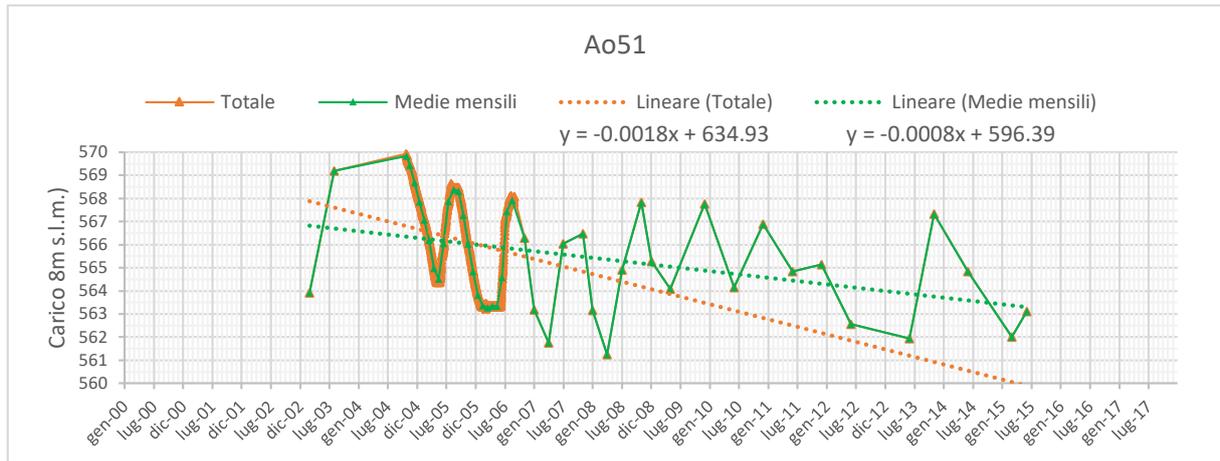


Figura 6.15: Confronto tra retta di regressione ottenuta dall'intero dataset e retta di regressione ottenuta dalle medie mensili per il piezometro Ao51. La pendenza è sovrastimata

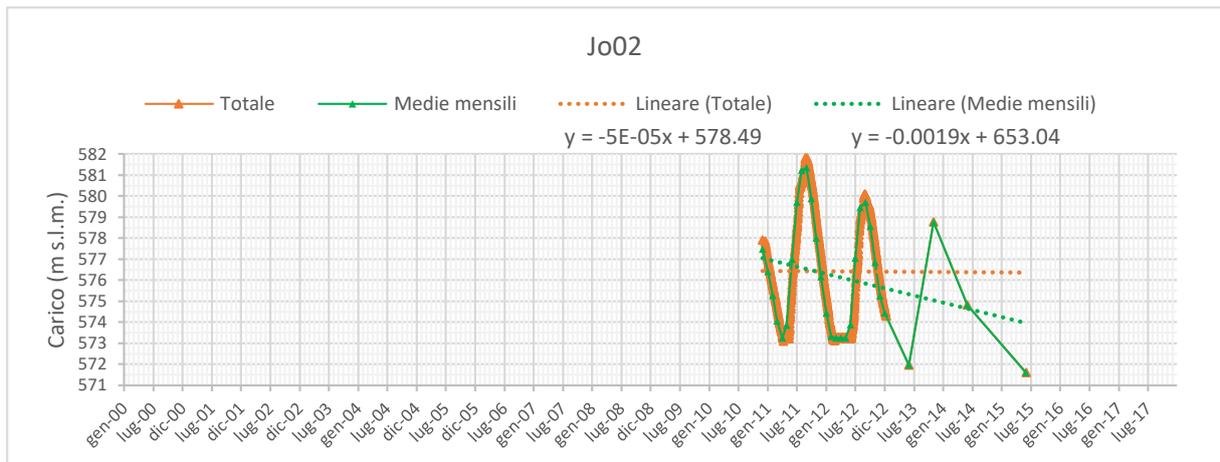


Figura 6.16: Confronto tra retta di regressione ottenuta dall'intero dataset e retta di regressione ottenuta dalle medie mensili per il piezometro Jo02. La pendenza è sottostimata

Come si può notare nei due grafici, il peso esercitato dalla numerosità campionaria del monitoraggio in continuo determina un andamento della retta di regressione che, dove le misure sono meno abbondanti, si discosta dai valori sperimentali.

Utilizzando le medie mensili si forza un'omogeneizzazione della distribuzione temporale della popolazione riducendo l'interferenza della differenza di numerosità ed ottenendo una retta di regressione che segue più fedelmente i valori sperimentali.

Per il calcolo della pendenza è quindi stato deciso di utilizzare le medie mensili, per migliorare la rappresentatività delle rette di regressione.

Il confronto le pendenze ottenute con l'intero dataset e quelle ottenute con le medie mensili, e l'abbondanza delle relative popolazioni di dati sono riportate nella *Tabella 6.3*.

Codice ente	Inizio	Fine	Abbondanza misure totali	Abbondanza senza outliers	Abbondanza medie mensili	Pendenza misure totali	Pendenza senza outliers	Pendenza medie mensili
Jo02	dic-10	giu-15	761	761	30	-5.04E-05	-5.04E-05	-1.88E-03
Ao07	apr-02	ott-14	49	48	44	7.12E-04	6.44E-04	6.62E-04
Ao51	mar-03	giu-15	692	688	47	-1.79E-03	-1.78E-03	-7.85E-04
Ao09	apr-02	ago-16	37	37	34	4.62E-04	4.62E-04	4.53E-04
Ao46	gen-02	set-17	180	179	162	-3.35E-04	-3.35E-04	-3.52E-04
Ao53	mar-03	set-17	186	183	162	-2.19E-04	-2.25E-04	-2.86E-04
Ao06	apr-02	set-17	100	97	87	1.64E-04	2.17E-04	2.20E-04
Ao11	apr-02	set-17	148	133	120	-6.66E-04	-5.35E-04	-5.87E-04
Ao05	mag-06	set-17	165	154	115	-7.72E-05	-8.39E-05	-2.15E-04
Ao12	apr-02	ago-16	140	137	119	-1.59E-04	-2.13E-04	-2.01E-04
Ao61	mar-06	set-17	28	28	27	3.30E-04	3.30E-04	2.84E-04
Ao03	mag-06	lug-14	98	97	87	3.04E-04	3.40E-04	2.94E-04
Ao73	giu-09	set-17	28	28	27	4.41E-04	4.41E-04	3.33E-04
Ao32	gen-00	set-17	228	220	173	-6.90E-05	-1.43E-05	-3.58E-05
Ao10	mag-06	ago-16	129	111	96	2.08E-04	2.50E-04	2.39E-04
Ch05	dic-10	set-17	27	27	27	-2.38E-04	-2.38E-04	-2.40E-04
Ao19	feb-00	set-17	223	220	175	8.80E-05	9.08E-05	6.09E-05
Ao76	giu-12	set-17	24	23	21	2.25E-04	2.44E-04	1.89E-04
Ao68	dic-06	set-17	142	140	110	1.36E-04	1.48E-04	1.05E-04
Ao04	apr-02	set-17	36	33	33	2.20E-04	1.92E-04	1.93E-04
Ao91	mag-06	ago-16	120	119	106	1.84E-04	1.86E-04	8.73E-05
Ao23	mar-00	set-17	177	177	145	1.55E-05	1.55E-05	-8.72E-06
Ao18	gen-00	set-17	206	198	163	1.03E-04	7.06E-05	4.56E-05
Ao35	gen-00	set-17	211	204	168	3.00E-05	6.68E-05	4.62E-05
Ao01	apr-07	ago-16	92	92	79	-5.09E-05	-5.09E-05	-5.01E-05
Ao17	gen-00	set-17	208	201	164	3.96E-05	4.73E-05	1.01E-05
Ao20	gen-00	set-17	203	197	165	6.51E-05	6.56E-05	3.88E-05
Ao16	gen-00	set-17	212	204	170	1.26E-04	1.14E-04	9.56E-05
Ch01	apr-02	set-17	33	33	32	6.08E-05	6.08E-05	4.54E-05
Ao22	apr-02	set-17	98	97	92	-1.61E-04	-1.61E-04	-1.52E-04
Ao15	gen-00	set-17	211	207	172	1.89E-04	1.86E-04	1.59E-04
Ao39	gen-00	set-17	214	212	175	5.51E-05	5.44E-05	2.64E-05
Ao115	mag-08	set-17	79	78	75	-2.60E-04	-2.52E-04	-2.79E-04
Ao116	mag-08	set-17	79	77	74	-2.31E-04	-2.26E-04	-2.55E-04
Ao24	gen-00	ott-16	210	204	169	7.41E-05	7.98E-05	5.88E-05
Ao21	gen-00	set-17	210	206	169	-7.27E-06	-7.82E-06	-3.67E-05
Ao55	mar-04	set-17	184	183	151	3.72E-04	3.74E-04	3.52E-04
Ao14	gen-00	set-17	208	203	169	-2.80E-05	-2.88E-05	-6.35E-05
Ao54	mar-04	giu-15	127	124	112	5.23E-04	5.31E-04	4.75E-04
Po13	mar-04	set-17	163	162	148	2.77E-04	2.75E-04	3.05E-04
Ao56	mar-04	set-17	180	177	148	2.92E-04	2.98E-04	2.85E-04
Po02	ago-02	set-17	50	50	49	1.25E-04	1.25E-04	1.25E-04
Sc16	dic-10	set-17	28	28	27	-1.47E-04	-1.47E-04	-1.62E-04
Po34	dic-10	set-17	26	26	25	2.26E-05	2.26E-05	2.74E-05
Sc05	mar-04	set-17	1845	1844	107	6.22E-05	6.22E-05	-3.92E-05
Sc08	gen-07	giu-15	20	14	14	3.48E-04	-1.77E-04	-1.77E-04
Po38	giu-11	set-17	25	25	24	3.34E-05	3.34E-05	3.57E-05
Po29	giu-09	giu-15	11	11	11	-2.30E-04	-2.30E-04	-2.30E-04
Po35	giu-11	giu-15	8	8	8	-1.57E-04	-1.57E-04	-1.59E-04
Qu10	apr-04	giu-15	108	108	105	1.37E-06	1.37E-06	-7.51E-06
Sc11	gen-07	giu-15	37	37	37	-8.97E-05	-8.97E-05	-8.98E-05
Br22	dic-10	dic-15	21	21	20	-9.91E-05	-9.91E-05	-1.23E-04
Br23	giu-12	giu-15	24	24	21	1.16E-04	1.16E-04	1.02E-04
Br04	mar-05	dic-15	41	40	38	1.35E-04	1.59E-04	1.57E-04
Br24	giu-12	giu-15	25	25	21	-2.86E-04	-2.86E-04	-2.51E-04
Br21	lug-08	dic-15	36	36	32	-4.29E-05	-4.29E-05	-5.30E-05
Br25	giu-12	giu-15	24	24	21	7.98E-05	7.98E-05	6.76E-05
Qu16	apr-07	giu-15	21	21	21	7.82E-05	7.82E-05	7.82E-05
Pn03	gen-07	dic-15	109	108	59	-9.61E-06	-1.05E-05	-3.64E-06
Pn07	ago-10	dic-15	98	97	49	-4.49E-05	-3.53E-05	-2.19E-05
Pn09	ago-10	dic-15	99	98	49	-3.61E-05	-2.32E-05	-1.78E-05
Pn08	ago-10	dic-15	99	98	49	-3.21E-05	-2.07E-05	-2.26E-06
Pn05	gen-07	dic-15	115	114	60	-7.48E-05	-5.93E-05	-7.75E-05
Pn06	gen-07	dic-15	109	109	59	5.01E-05	5.01E-05	6.26E-05

Tabella 6.3: Confronto delle abbondanze di dati e delle pendenze delle rette di regressione tra i dataset comprensivi della totalità delle misure, i dataset ripuliti dagli outliers e i dataset costruiti utilizzando le medie mensili

6.3 Valutazione dei trend pluriennali

Per valutare le tendenze dei livelli di falda a scala puntuale, per ogni pozzo e piezometro è stato utilizzato il dataset costruito sulle medie mensili per migliorare l'omogeneità della distribuzione temporale dei dati.

Per prima cosa è stata calcolata l'entità della variazione dei livelli piezometrici per singolo pozzo. Questo valore è stato ottenuto moltiplicando il coefficiente angolare della retta di regressione dei dati di ogni punto di monitoraggio per 365, così da ottenere l'andamento pluriennale della quota della falda espresso in metri all'anno (*Tabella 6.4*).

I dataset di ogni stazione piezometrica sono successivamente stati sottoposti al test non-parametrico di Mann-Kendall con livello di significatività al 5% utilizzando il software ProUCL 5.1, per valutare la significatività dei trend e definire dunque se l'eventuale variazione sia da interpretare come un'effettiva tendenza a scala pluriennale o se invece sia non statisticamente significativa.

6.3.1 Il test di Mann-Kendall

Il test di Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) è un test non-parametrico basato sul concetto di *ranking*, cioè sulle caratteristiche di ordinamento della serie storica in esame.

I principali vantaggi nell'utilizzo di questo test sono che:

- può essere utilizzato anche in caso di dati mancanti nella serie temporale;
- essendo un test non-parametrico, non è necessario che i dati seguano una distribuzione normale;
- è robusto rispetto alla presenza di eventuali outliers;

Come tutti i test statistici, il test di Mann-Kendall prevede che siano definite due ipotesi operative e che il risultato del test permetta di accettare o rifiutare l'ipotesi nulla. Nella fattispecie, il test di Mann-Kendall prevede:

- *Ipotesi nulla H_0* : assenza di un trend (serie storica stazionaria);
- *Ipotesi alternativa H_1* : esistenza di un trend (ascendente o discendente);

Si assume che l'ipotesi nulla sia vera e quindi si verifica se i dati osservati siano consistenti con tale ipotesi. Se l'ipotesi nulla viene rigettata, si accetta l'ipotesi alternativa.

Data una serie temporale composta da n osservazioni, si definiscono x_i , con $i = 1, \dots, n-1$, e x_j , con $j = i+1, \dots, n$ come sottoinsiemi della serie in esame. Il test si basa sul confronto delle coppie di osservazioni (x_i, x_j) per accertare se $x_i > x_j$ o se $x_i < x_j$.

Indicando con C le coppie del primo tipo e con D le coppie del secondo tipo, la statistica del test è definita come

$$S = C - D$$

che rappresenta la differenza tra il numero delle volte in cui un'osservazione x_i è maggiore delle successive osservazioni e il numero delle volte in cui una osservazione x_i è superata dalle osservazioni successive. La logica del test si basa sull'ipotesi che, in assenza di trend, una osservazione x_i sia seguita da un numero approssimativamente uguale di osservazioni con valore maggiore e minore di essa, cosicché $S \approx 0$.

Intuitivamente, questo significa che, confrontando ogni valore con tutti i valori successivi nella serie, se il valore $x_i < x_j$ allora la statistica S viene incrementata di 1, viceversa, se il valore $x_i > x_j$ la statistica S diminuisce di 1.

Quindi una serie storica che presenta una tendenza ascendente “perfetta” è caratterizzata dal fatto che considerata una qualsiasi osservazione $x(\underline{t})$ effettuata ad un tempo \underline{t} , tutte le osservazioni effettuate per $t > \underline{t}$ avranno valori superiori a $x(\underline{t})$ mentre tutte le osservazioni effettuate per $t < \underline{t}$ avranno valori inferiori a $x(\underline{t})$; viceversa per una serie storica discendente “perfetta”.

La statistica S è costruita in modo da quantificare quanto la serie storica in esame si discosti da una serie caratterizzata da una tendenza ascendente o discendente “perfetta”.

Formalmente, la statistica S del test di Mann-Kendall è calcolata tramite la relazione:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j)$$

dove

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & \text{se } x_i < x_j \\ 0 & \text{se } x_i = x_j \\ -1 & \text{se } x_i > x_j \end{cases}$$

La statistica di Mann-Kendall S è dunque definita dalla somma degli indicatori $\text{sgn}(x_i - x_j)$ su tutte le $\frac{n(n-1)}{2}$ possibili combinazioni delle n osservazioni.

Quando la serie storica è sufficientemente lunga (approssimativamente $n > 40$) si suppone che la funzione S sia normalmente distribuita con media e varianza rispettivamente:

$$\mu_S = 0$$

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^g t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}$$

dove il secondo termine è introdotto per operare la correzione necessaria in presenza di gruppi di osservazioni uguali che generano i cosiddetti *tied values* (o *nodì*), ovvero gruppi di valori uguali che non permettono l'assegnazione di un'unica posizione nella classifica dei valori (il caso in cui $S = 0$). In particolare g è il numero dei gruppi di osservazioni con valore uguale e t_i il numero di nodi nel gruppo i -esimo.

Si definisce infine la statistica test:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma} & \text{se } S < 0 \end{cases}$$

La statistica Z è usata al posto di S perché è dimostrabile che la sua distribuzione è normale standard. Ciò consente di calcolare agevolmente i *p-value* corrispondenti al valore di Z calcolato, o in alternativa di calcolare i valori della statistica test sotto l'ipotesi nulla per un fissato livello di significatività α (tipicamente 5%).

L'ipotesi nulla H_0 è rigettata se il valore di Z calcolato per la serie in esame ha un *p-value* minore del livello di significatività α prescelto, o analogamente se il valore di Z è superiore al valore della variabile normale standard con probabilità di superamento uguale al livello di significatività fissato (Hipel et al. 2005; Braca et al., 2013; Guerra et al., 2017).

6.3.2 Il software ProUCL 5.1

Su ogni serie storica oggetto della valutazione è stato effettuato il test di Mann-Kendall utilizzando il software ProUCL 5.1 sviluppato e reso liberamente disponibile da US EPA (*United States Environmental Protection Agency*)¹.

Questo software permette l'inserimento di serie storiche di dati su cui possono essere eseguiti in maniera automatizzata i principali test statistici.

L'input del software prevede l'inserimento dei valori della variabile di interesse ed eventualmente la variabile temporale a cui sono associati (Figura 6.17). Nel caso i dati cronologici non vengano forniti, il software definisce autonomamente un indice equidistribuendo i valori su di un asse costruito ad hoc.

Ai fini del test di Mann-Kendall non è necessario fornire una variabile temporale a cui plottare i valori piezometrici. Trattandosi di un test basato sul ranking dei valori, il risultato restituito dipende solo dal rapporto tra i valori stessi secondo l'ordinamento in cui sono forniti. L'inserimento delle date delle misure tuttavia permette al software di elaborare il grafico dei valori e di determinare la retta di regressione, la pendenza e l'intercetta.

Se i dati piezometrici vengono plottati alla variabile temporale, il software considera automaticamente eventuali dati mancanti corrispondenti alle celle vuote.

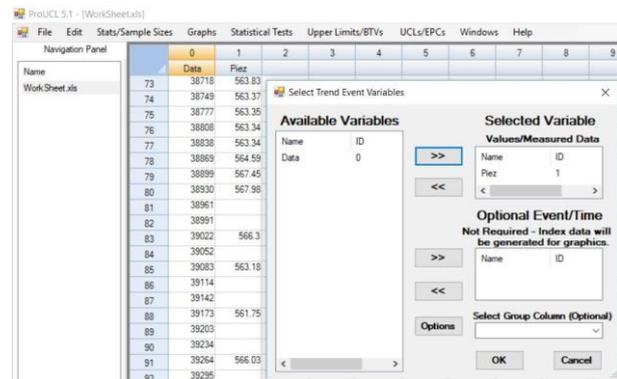


Figura 6.17: Schermata degli input del software ProUCL 5.1

General Statistics	
Number of Events Reported (m)	216
Number of Missing Events	169
Number of Reported Events Used	47
Number Values Reported (n)	186
Number Values Missing	139
Number Values Used	47
Minimum	561.3
Maximum	569.8
Mean	565.5
Geometric Mean	565.5
Median	565.1
Standard Deviation	2.255
Coefficient of Variation	0.00399
Mann-Kendall Test	
M-K Test Value (S)	-388
Critical Value (0.05)	-1.645
Standard Deviation of S	109
Standardized Value of S	-3.549
Approximate p-value	1.9305E-4
Statistically significant evidence of a decreasing trend at the specified level of significance.	

Figura 6.18: Schermata degli output

¹ <http://www.epa.gov/land-research/proucl-software>

L'output del programma è costituito dai principali indici statistici di interesse e dai risultati del test di Mann-Kendall (*Figura 6.18*) e da un grafico a dispersione comprensivo della retta di regressione, sia che sia stato fornito un asse temporale sia che siano stati forniti i soli dati piezometrici (*Figura 6.19* e *Figura 6.20*). I risultati della statistica test comunque non variano nei due casi.

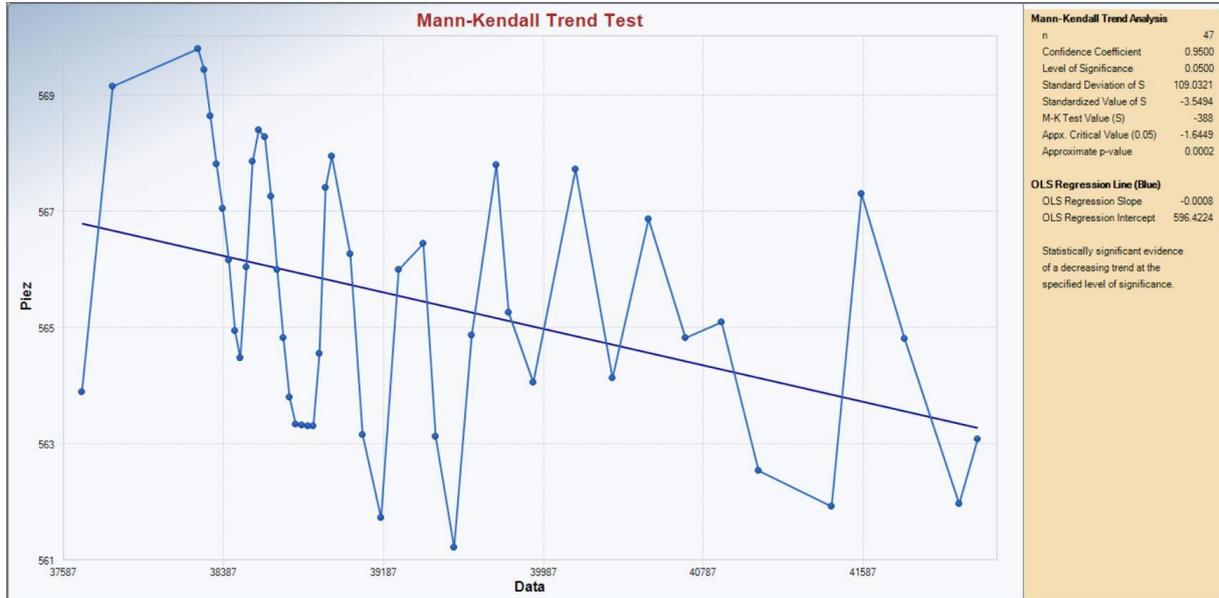


Figura 6.19: Output grafico piezometria/tempo

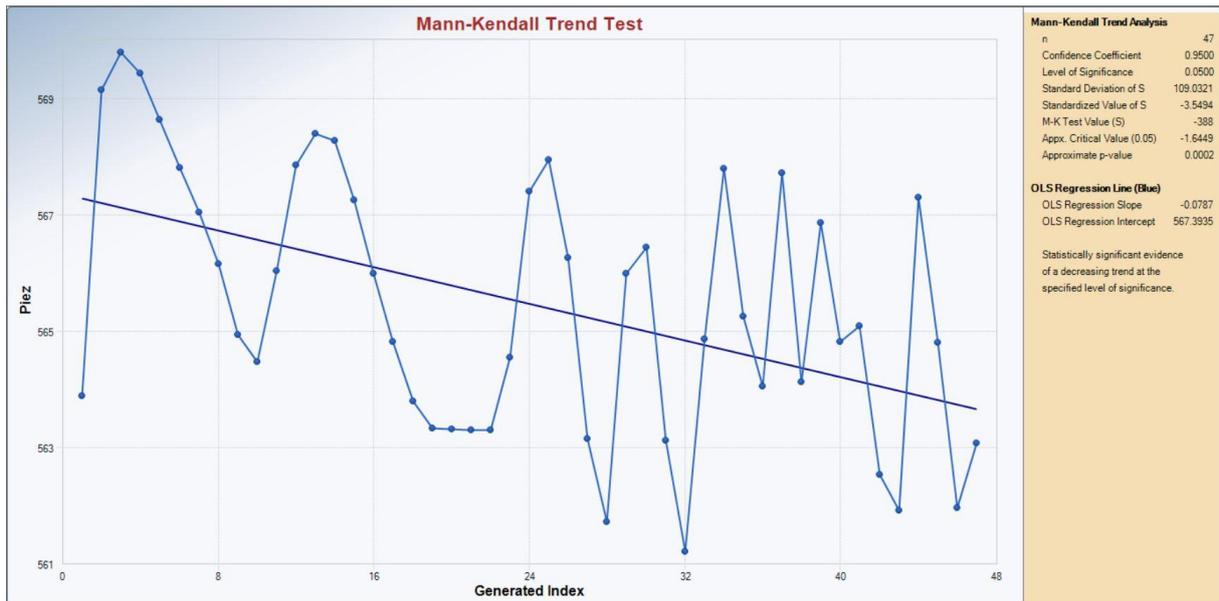


Figura 6.20: Output grafico piezometria/indice costruito

6.4 Risultati della valutazione delle tendenze a scala puntuale

I risultati del test di Mann-Kendall ed il relativo p -value sono stati confrontati con un livello di significatività al 95% (corrispondente ad un $\alpha = 0.05$) ed è stato assegnato un giudizio al trend in base alla pendenza m della retta di regressione, secondo il criterio:

- $se p - value > \alpha = trend non statisticamente significativo o assente$
- $se p - value < \alpha \begin{cases} se m > 0 = trend significativamente ascendente \\ se m < 0 = trend significativamente discendente \end{cases}$

I risultati per ogni stazione di monitoraggio, unitamente alla quantificazione della tendenza in metri all'anno precedentemente ottenuta, sono riportati in *Tabella 6.4*.

Le tendenze sono state rappresentate cartograficamente, riportando anche l'entità della variazione in metri all'anno e i grafici relativi alle serie che hanno mostrato una tendenza discendente o ascendente (*Figura 6.22*), secondo lo schema:

- freccia verde verso l'alto per trend positivi;
- freccia rossa verso il basso per trend negativi;
- cerchio giallo per trend assenti o non statisticamente significativi;

In questo modo è stato possibile valutare se esistesse uno schema nelle tendenze a livello di singolo pozzo.

In generale si può notare una diffusa stabilità dei trend per i vari punti di monitoraggio. In particolare, le 64 stazioni analizzate sono così suddivise:

- 49 punti di monitoraggio con tendenza assente o non statisticamente significativa;
- 8 punti di monitoraggio con tendenza negativa, di cui 7 nel territorio di Aosta e 1 nel territorio di Saint-Christophe;
- 7 punti di monitoraggio con tendenza positiva, di cui 5 nel territorio di Aosta, 1 nel territorio di Pollein e 1 nel territorio di Brissogne;

Codice ente	Tipologia	Inizio	Fine	Misure	Minimo	Massimo	Range	Media	S	p-value	Pendenza	Variazione (m/y)	Trend
Jo02	Piezometro	dic-10	giu-15	30	571.60	581.34	9.74	576.12	-67	0.1190	-1.88E-03	-0.685	No
Ao07	Prelievo	apr-02	ott-14	44	565.34	573.27	7.93	569.12	222	0.0127	6.62E-04	0.242	Positivo
Ao51	Piezometro	mar-03	giu-15	47	561.25	569.83	8.58	565.50	-388	0.0002	-7.85E-04	-0.287	Negativo
Ao09	Irrigazione	apr-02	ago-16	34	558.30	569.14	10.84	564.75	14	0.4240	4.53E-04	0.166	No
Ao46	Piezometro	gen-02	set-17	162	559.13	568.66	9.53	563.35	-2182	0.0008	-3.52E-04	-0.128	Negativo
Ao53	Piezometro	mar-03	set-17	162	558.31	567.94	9.63	562.53	-1810	0.0044	-2.86E-04	-0.104	Negativo
Ao06	Prelievo	apr-02	set-17	87	556.63	567.71	11.08	563.06	-224	0.2070	2.20E-04	0.080	No
Ao11	Prelievo	apr-02	set-17	120	556.49	566.54	10.05	560.34	-1508	0.0003	-5.87E-04	-0.214	Negativo
Ao05	Prelievo	mag-06	set-17	115	556.46	565.69	9.23	560.76	-646	0.0595	-2.15E-04	-0.078	No
Ao12	Prelievo	apr-02	ago-16	119	558.06	567.52	9.46	562.31	-614	0.0796	-2.01E-04	-0.073	No
Ao61	Piezometro	mar-06	set-17	27	551.78	557.96	6.18	555.10	21	0.3380	2.84E-04	0.104	No
Ao03	Prelievo	mag-06	lug-14	87	552.39	561.19	8.80	556.69	169	0.2690	2.94E-04	0.107	No
Ao73	Piezometro	giu-09	set-17	27	554.86	561.22	6.36	558.05	21	0.3380	3.33E-04	0.121	No
Ao32	Piezometro	gen-00	set-17	173	548.81	558.89	10.08	553.62	-721	0.1720	-3.58E-05	-0.013	No
Ao10	Prelievo	mag-06	ago-16	96	548.89	559.22	10.33	553.46	329	0.1500	2.39E-04	0.087	No
Ch05	Piezometro	dic-10	set-17	27	550.73	554.04	3.31	552.08	-62	0.1020	-2.40E-04	-0.088	No
Ao19	Piezometro	feb-00	set-17	175	547.25	556.56	9.30	551.77	441	0.2850	6.09E-05	0.022	No
Ao76	Piezometro	giu-12	set-17	21	549.70	552.88	3.18	551.21	-35	0.1520	1.89E-04	0.069	No
Ao68	Piezometro	dic-06	set-17	110	547.71	555.35	7.64	550.97	119	0.3800	1.05E-04	0.038	No
Ao04	Prelievo	apr-02	set-17	33	551.49	557.22	5.73	554.53	87	0.0913	1.93E-04	0.070	No
Ao91	Prelievo	mag-06	ago-16	106	548.50	556.80	8.30	552.27	43	0.4540	8.73E-05	0.032	No
Ao23	Piezometro	mar-00	set-17	145	545.99	555.90	9.91	550.72	-501	0.1960	-8.72E-06	-0.003	No
Ao18	Piezometro	gen-00	set-17	163	545.64	555.52	9.88	550.60	268	0.3510	4.56E-05	0.017	No
Ao35	Piezometro	gen-00	set-17	168	545.91	554.81	8.90	550.50	171	0.4080	4.62E-05	0.017	No
Ao01	Prelievo	apr-07	ago-16	79	545.01	552.21	7.20	548.54	-118	0.3100	-5.01E-05	-0.018	No
Ao17	Piezometro	gen-00	set-17	164	545.24	554.74	9.50	549.48	141	0.4210	1.01E-05	0.004	No
Ao20	Piezometro	gen-00	set-17	165	544.17	553.50	9.33	548.69	418	0.2780	3.88E-05	0.014	No
Ao16	Piezometro	gen-00	set-17	170	544.69	554.10	9.41	549.20	982	0.0931	9.56E-05	0.035	No
Ch01	Irrigazione	apr-02	set-17	32	544.73	551.52	6.79	548.81	-37	0.2800	4.54E-05	0.017	No
Ao22	Piezometro	apr-02	set-17	92	546.17	553.20	7.03	549.45	-631	0.0168	-1.52E-04	-0.055	Negativo
Ao15	Piezometro	gen-00	set-17	172	544.18	552.77	8.59	548.24	1734	0.0109	1.59E-04	0.058	Positivo
Ao39	Piezometro	gen-00	set-17	175	543.62	552.48	8.86	548.07	179	0.4090	2.64E-05	0.010	No
Ao115	Piezometro	mag-08	set-17	75	546.01	552.77	6.76	548.86	-534	0.0074	-2.79E-04	-0.102	Negativo
Ao116	Piezometro	mag-08	set-17	74	546.54	553.11	6.57	549.37	-460	0.0161	-2.55E-04	-0.093	Negativo
Ao24	Piezometro	gen-00	ott-16	169	542.52	550.94	8.42	546.95	544	0.2300	5.88E-05	0.021	No
Ao21	Piezometro	gen-00	set-17	169	542.68	551.14	8.46	547.08	-454	0.2690	-3.67E-05	-0.013	No
Ao55	Piezometro	mar-04	set-17	151	542.90	549.68	6.78	546.46	2503	0.0000	3.52E-04	0.128	Positivo
Ao14	Piezometro	gen-00	set-17	169	542.89	550.87	7.98	546.75	-687	0.1750	-6.35E-05	-0.023	No
Ao54	Piezometro	mar-04	giu-15	112	542.65	548.90	6.25	545.96	1359	0.0003	4.75E-04	0.173	Positivo
Po13	Piezometro	mar-04	set-17	148	542.52	548.86	6.34	545.78	2298	0.0001	3.05E-04	0.111	Positivo
Ao56	Piezometro	mar-04	set-17	148	542.45	547.76	5.31	545.40	2351	0.0000	2.85E-04	0.104	Positivo
Po02	Piezometro	ago-02	set-17	49	541.82	545.57	3.75	544.19	85	0.2350	1.25E-04	0.046	No
Sc16	Piezometro	dic-10	set-17	27	542.20	543.79	1.59	542.80	-97	0.0226	-1.62E-04	-0.059	Negativo
Po34	Piezometro	dic-10	set-17	25	542.54	543.79	1.25	543.02	4	0.4720	2.74E-05	0.010	No
Sc05	Piezometro	mar-04	set-17	107	540.88	543.78	2.90	542.40	-535	0.075	-3.92E-05	-0.014	No
Sc08	Piezometro	gen-07	giu-15	14	541.53	542.81	1.28	542.24	-17	0.1910	-1.77E-04	-0.065	No
Po38	Piezometro	giu-11	set-17	24	540.38	541.75	1.37	541.00	6	0.4510	3.57E-05	0.013	No
Po29	Piezometro	giu-09	giu-15	11	539.28	540.57	1.29	539.82	-10	0.2410	-2.30E-04	-0.084	No
Po35	Piezometro	giu-11	giu-15	8	536.21	537.45	1.24	536.95	-2	0.4510	-1.59E-04	-0.058	No
Qu10	Piezometro	apr-04	giu-15	105	536.52	538.07	1.55	537.16	-141	0.3490	-7.51E-06	-0.003	No
Sc11	Piezometro	gen-07	giu-15	37	535.08	536.94	1.86	536.00	-59	0.2240	-8.98E-05	-0.033	No
Br22	Piezometro	dic-10	dic-15	20	535.02	535.96	0.94	535.49	-25	0.2180	-1.23E-04	-0.045	No
Br23	Piezometro	giu-12	giu-15	21	531.54	532.81	1.27	531.95	-22	0.2630	1.02E-04	0.037	No
Br04	Piezometro	mar-05	dic-15	38	532.83	534.01	1.18	533.41	288	0.0002	1.57E-04	0.057	Positivo
Br24	Piezometro	giu-12	giu-15	21	531.01	532.39	1.38	531.49	-47	0.0821	-2.51E-04	-0.091	No
Br21	Piezometro	lug-08	dic-15	32	532.35	533.29	0.94	532.74	-54	0.1950	-5.30E-05	-0.019	No
Br25	Piezometro	giu-12	giu-15	21	529.90	531.03	1.13	530.26	-6	0.4400	6.76E-05	0.025	No
Qu16	Piezometro	apr-07	giu-15	21	530.78	531.85	1.07	531.29	36	0.1450	7.82E-05	0.029	No
Pn03	Piezometro	gen-07	dic-15	59	454.56	456.09	1.53	455.09	37	0.4070	-3.64E-06	-0.001	No
Pn07	Piezometro	ago-10	dic-15	49	453.72	455.27	1.55	454.26	35	0.3850	-2.19E-05	-0.008	No
Pn09	Piezometro	ago-10	dic-15	49	453.89	455.42	1.53	454.41	-15	0.4520	-1.78E-05	-0.006	No
Pn08	Piezometro	ago-10	dic-15	49	453.45	454.97	1.52	453.99	29	0.4050	-2.26E-06	-0.001	No
Pn05	Piezometro	gen-07	dic-15	60	452.90	454.65	1.76	453.58	-116	0.2310	-7.75E-05	-0.028	No
Pn06	Piezometro	gen-07	dic-15	59	452.07	453.99	1.92	452.68	98	0.2630	6.26E-05	0.023	No

Tabella 6.4: Risultati della valutazione delle tendenze a scala puntuale su lungo periodo

Rivolgendo l'attenzione in particolare alle stazioni di monitoraggio che hanno registrato un trend discendente, 4 di esse (Ao51, Ao46, Ao53 e Ao11) sono concentrate nella zona occidentale di Aosta a breve distanza l'una dall'altra. L'entità della diminuzione dei livelli di falda in questi punti di monitoraggio varia tra i 10 e i 30 cm all'anno, con valori maggiori a ovest e a sud.

Il periodo di riferimento è quasi coincidente, tra il 2002-2003 e il 2017, con l'eccezione di Ao51 la cui serie si ferma al 2015.

Ao51 presenta un numero di misure sensibilmente inferiore in quanto, ad eccezione del periodo 2004-2006 in cui era dotato di un datalogger dalle cui misure sono state ricavate le medie mensili, per il restante monitoraggio la falda è stata misurata con cadenza al massimo stagionale. Pertanto la valutazione su questo punto risulta meno significativa delle altre per via delle minori completezza e omogeneità del dataset.

Le altre stazioni che registrano un trend in diminuzione nella zona di Aosta si trovano sulla conoide del torrente Buthier, dove quest'ultimo si unisce alla Dora Baltea. Nel dettaglio, Ao22 si trova più a monte della conoide e registra una diminuzione di circa 5 cm all'anno, mentre Ao115 e Ao116 si trovano in prossimità della confluenza, rispettivamente in destra e sinistra idrografica, e registrano una diminuzione di circa 10 cm all'anno.

La durata delle serie storiche è analoga per Ao115 e Ao116, dal 2008 al 2017 con un simile numero di misure, ma risulta più lunga per Ao22 dove il monitoraggio risale al 2002. Anche la frequenza delle misure in Ao22 differisce, passando da circa 2 misure all'anno fino al 2008, ad una frequenza paragonabile a quella di Ao115 e Ao116 negli anni successivi. Dunque le variazioni sono confrontabili per Ao115 e Ao116 ma non direttamente correlabili ad Ao22.

L'ultimo punto che mostra un trend decrescente è Sc16, posto nel comune di Saint-Christophe, dove si registra una diminuzione di circa 6 cm all'anno. La serie tuttavia risulta di lunghezza modesta, tra il 2010 e il 2017, e con sole 27 misure, maggiormente concentrate negli ultimi due anni. Nonostante il trend sia statisticamente significativo, la rappresentatività di questo piezometro è limitata da scarse numerosità campionaria e omogeneità dei dati.

Per quanto riguarda le stazioni di monitoraggio che hanno registrato un trend in aumento, queste si trovano maggiormente concentrate tra Aosta e Pollein, dove 4 piezometri sono posti in prossimità del tratto in cui la Dora Baltea subisce una stretta deviazione, modificando la propria direzione da sud-nord a ovest-est.

Di questi punti di monitoraggio, 3 si trovano in sinistra idrografica ad Aosta (Ao55, Ao54 e Ao56), mentre uno si trova in destra idrografica a Pollein (Po13).

La variazione annua dei livelli di falda è simile, nell'ordine dei 10-13 cm all'anno, ad eccezione di Ao54 che mostra una crescita leggermente maggiore, di 17 centimetri all'anno.

Questa differenza può essere dovuta al periodo di monitoraggio che, dal 2004, arriva fino al 2017 tranne per Ao54, le cui misure si fermano al 2015 e non rispondono della diminuzione della quota di falda registrata nel 2017 negli altri due piezometri.

Queste serie risultano comunque robuste e significative per lunghezza, numerosità campionaria e omogeneità dei dati.

In posizione più occidentale, in prossimità di Ao115 e Ao116 che hanno registrato trend negativo, si trova Ao15 che, viceversa, mostra una tendenza in risalita con entità di circa 6 cm all'anno.

Questa differenza, a così breve distanza, può essere imputabile alla diversa durata del monitoraggio. Ao15 infatti è fornito di una serie storica lunga e accurata, costituita da misure quasi mensili dal 2000 al 2017, che lo rendono rappresentativo del lungo periodo. Le serie di Ao115 e Ao116 invece hanno inizio nel 2008 e dunque nel periodo di picco piezometrico con conseguente lettura di un calo dei livelli. Questo aspetto verrà maggiormente approfondito nel corso del capitolo 9.

Sempre nel territorio di Aosta, nell'estremità occidentale del comune, Ao07 registra un ulteriore trend positivo, a breve distanza dalla concentrazione di piezometri che hanno invece registrato una tendenza opposta. L'entità della variazione di livello è di circa 24 centimetri all'anno di risalita, contro i circa 20-30 centimetri all'anno di diminuzione registrati da Ao51, Ao46, Ao53 e Ao11.

In questo caso, la qualità della serie è minata da numerosi anni senza misure e dall'interruzione del monitoraggio nel 2014. Inoltre, se si esclude la singola misura risalente al 2002, la serie inizia nel 2006 registrando solamente l'aumento successivo della quota di falda.

L'ultima stazione che registra una tendenza positiva è Br04 e si trova nel comune di Brissogne, in sinistra idrografica, nelle vicinanze della confluenza dei tributari.

Questo è l'unico piezometro nella zona, oltre a Br21, che presenta una serie superiore ai 6 anni di misure. Il dataset, che conta 38 misure, è uniformemente distribuito nel periodo, tranne

per il 2015 in cui c'è stato un monitoraggio mensile. La significatività della serie risulta comunque maggiore di quella degli altri punti limitrofi ed è possibile leggere chiaramente una risalita della falda, anche se di entità modesta, nell'ordine dei 6 centimetri all'anno.

Per quanto riguarda le stazioni di monitoraggio che non hanno registrato un trend significativo, costituiscono la maggioranza dei pozzi e piezometri considerati. Tuttavia, a fronte di una diffusa robustezza e significatività delle serie ad Aosta e parzialmente a Pollein e Quart, la qualità dei dataset è molto variabile nel resto della piana.

Molte serie, nonostante presentino una pronunciata pendenza positiva o negativa della retta di regressione, non risultano statisticamente significative per giustificare l'esistenza di un trend a causa della scarsità nel numero di misure o nella lunghezza su cui questo viene valutato.

Un caso particolarmente emblematico è costituito da Jo02, in Jovencan, dove nonostante una pendenza negativa accentuata, il livello di confidenza raggiunto dal test è di 0.119 e quindi non sufficiente a confermare il trend (*Figura 6.21*).

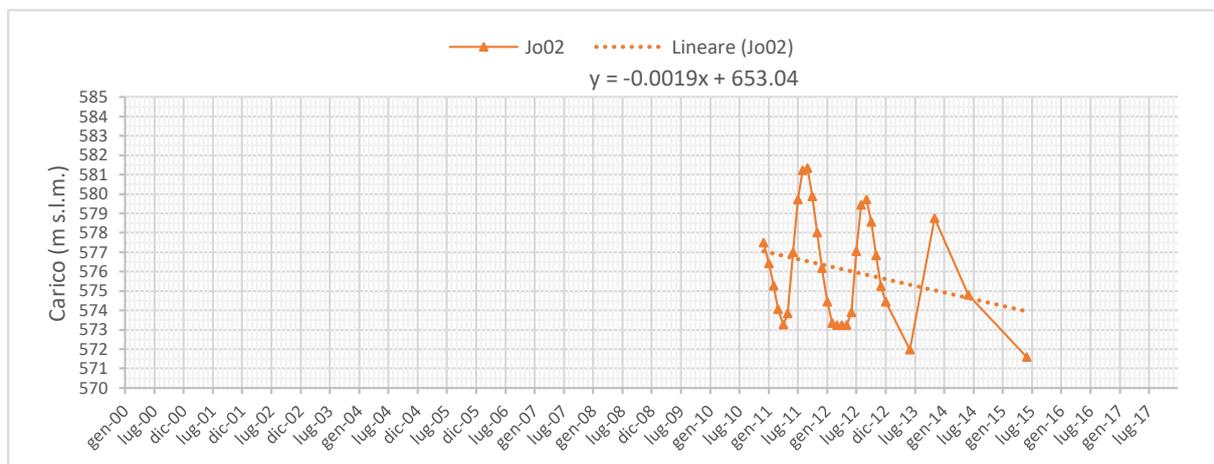


Figura 6.21: Tendenza ricavata dalle medie mensili per Jo02

Tuttavia, dal momento che secondo quanto definito dalle linee guida, l'assenza di tendenza o la presenza di tendenza positiva prevedrebbero la prosecuzione della valutazione mediante calcolo dei volumi e analisi di bilancio idrico, i trend non significativi non costituiscono una criticità rilevante in questa fase dal momento che il loro studio verrebbe approfondito in una fase ulteriore.

La differente rappresentatività delle analisi su singolo pozzo, nonché la mancanza di stazioni di monitoraggio idonee in alcune zone della piana, non permette una efficiente e significativa

spazializzazione dei risultati per ottenere informazioni areali con interpolazione delle variazioni dei livelli di falda, pertanto la valutazione è stata mantenuta a livello locale con informazioni puntuali.

Questi risultati sono stati presentati ad ARPA Valle d'Aosta, illustrando le problematiche riscontrate e le considerazioni fin qui esposte per quanto riguarda la qualità delle serie, i periodi e le frequenze di monitoraggio, il calcolo delle tendenze e la composizione della rete di monitoraggio.

L'Agenzia ha comunque ritenuto la presentazione soddisfacente e le informazioni ricavate adeguate a considerare il corpo idrico sotterraneo in *buono stato quantitativo* secondo questo test.

Le variazioni dei livelli di falda infatti sono generalmente di pochi centimetri, al massimo pochi decimetri, a fronte di un unico acquifero dalla potenza stimata di circa 80-100 metri fino ad Aosta (Triganon, 2003; Bianquin, 2010), dove i prelievi sono più intensi. Procedendo verso valle, da Pollein, il corpo idrico sotterraneo si divide in due acquiferi, uno superficiale della potenza tra i 25 e i 30 metri, con un minimo di 12 metri a Brissogne, e uno semiconfinato di spessore decrescente, ma i prelievi si concentrano nel freatico e le serie piezometriche significative disponibili non mostrano un calo dei livelli.

A seguito della stima delle tendenze dei livelli di falda a scala pluriennale, le linee guida indicano che, in caso di trend stabile o positivo, si proceda all'analisi di bilancio idrico per verificare che le captazioni siano in equilibrio con la risorsa disponibile. L'analisi di bilancio idrico non è stata effettuata in questa sede in quanto richiede un approfondito studio condotto per mezzo di dati idrologici e meteo-climatici per la definizione dei valori volumetrici di ricarica da confrontare con il censimento delle captazioni, così da determinare un bilancio tra ricarica e prelievi per verificare che la risorsa non sia depauperata.

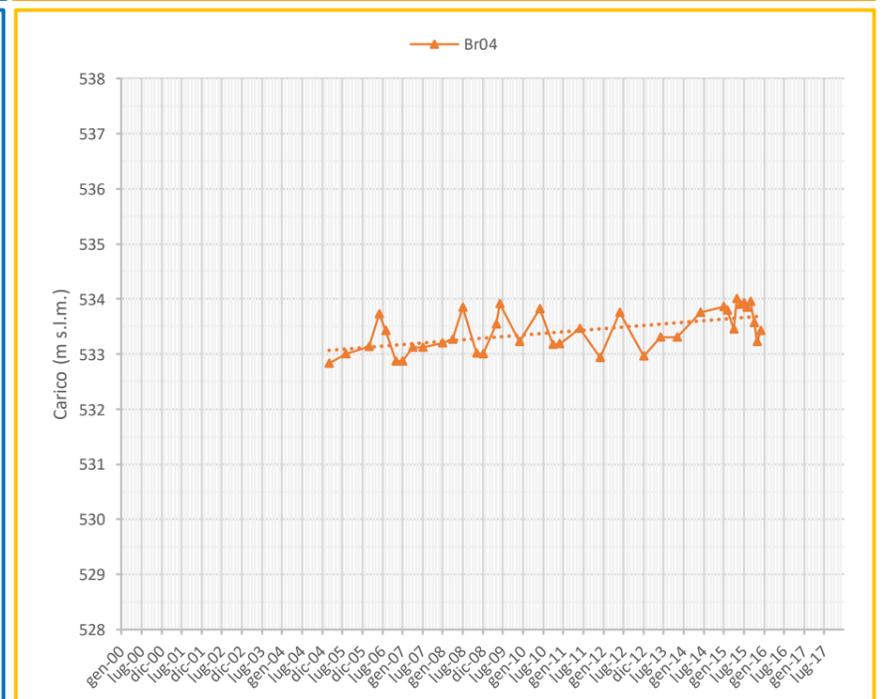
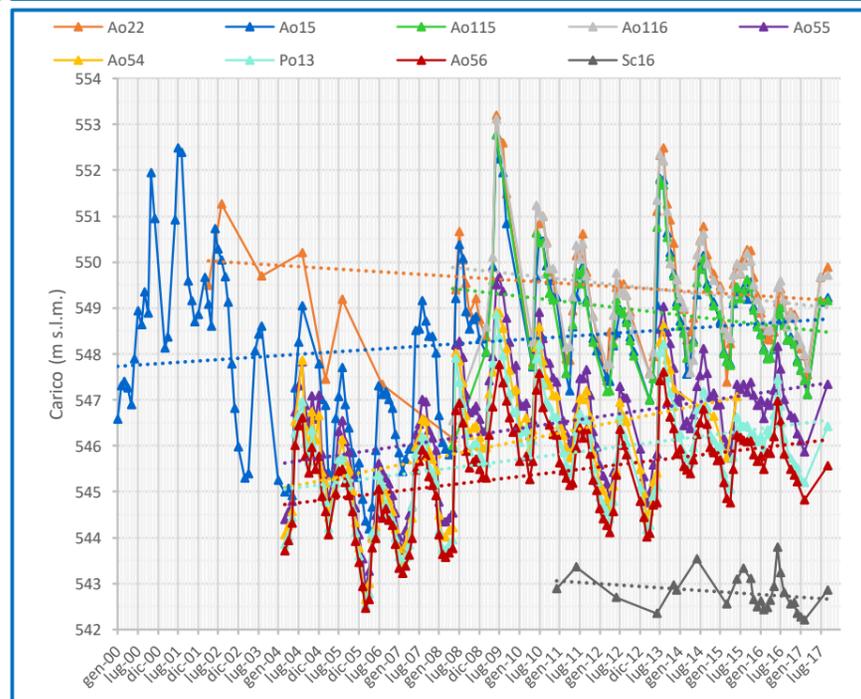
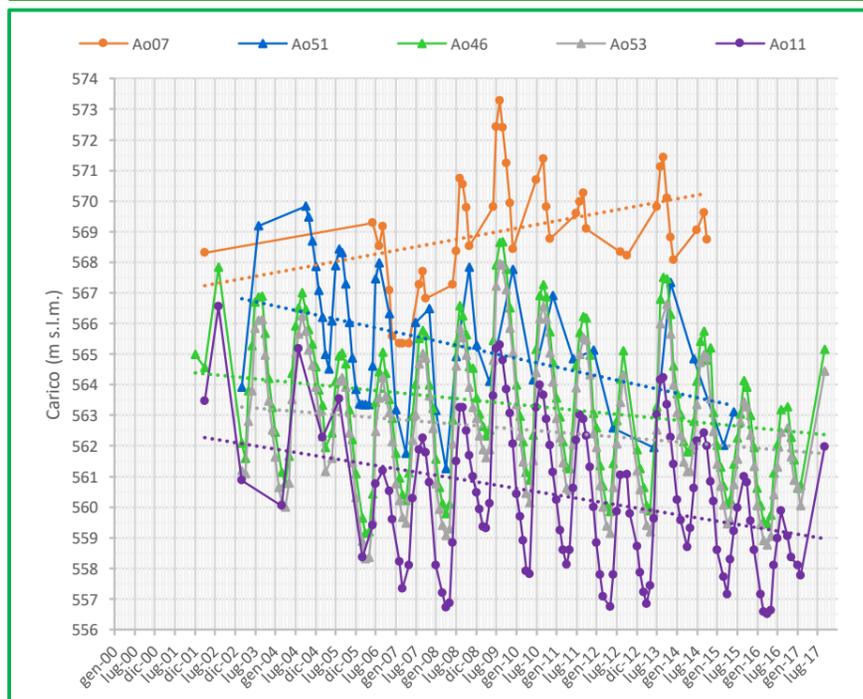
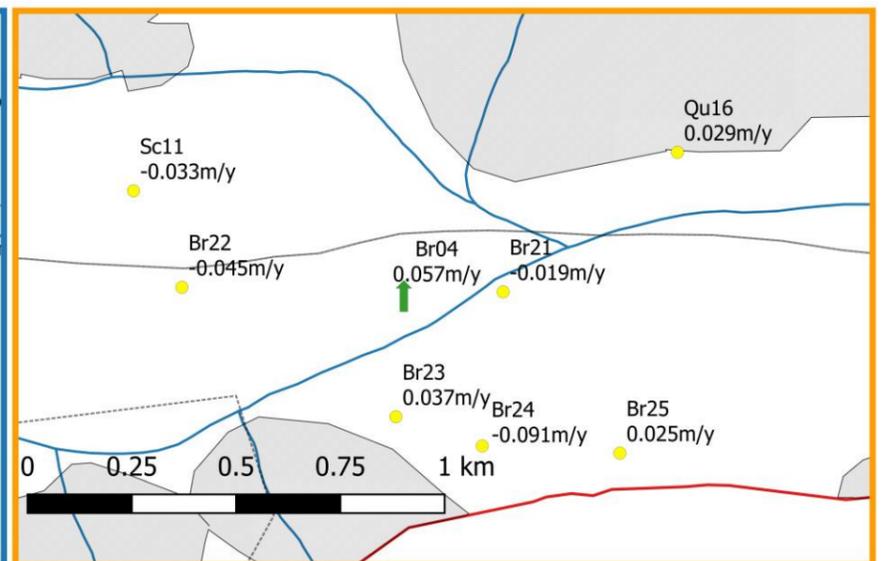
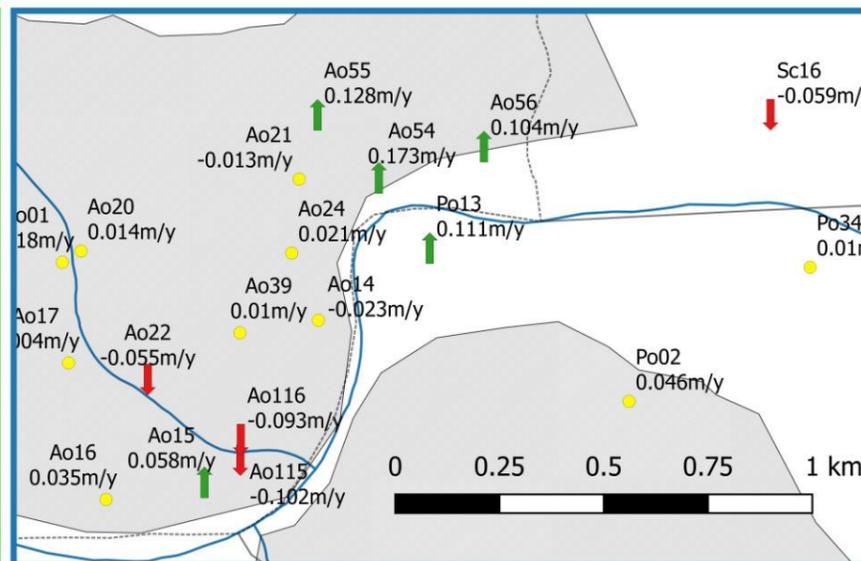
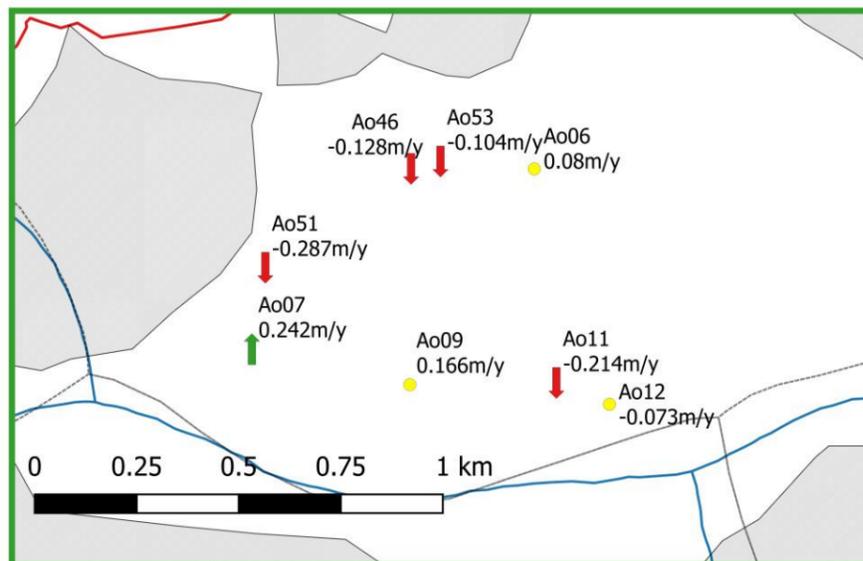
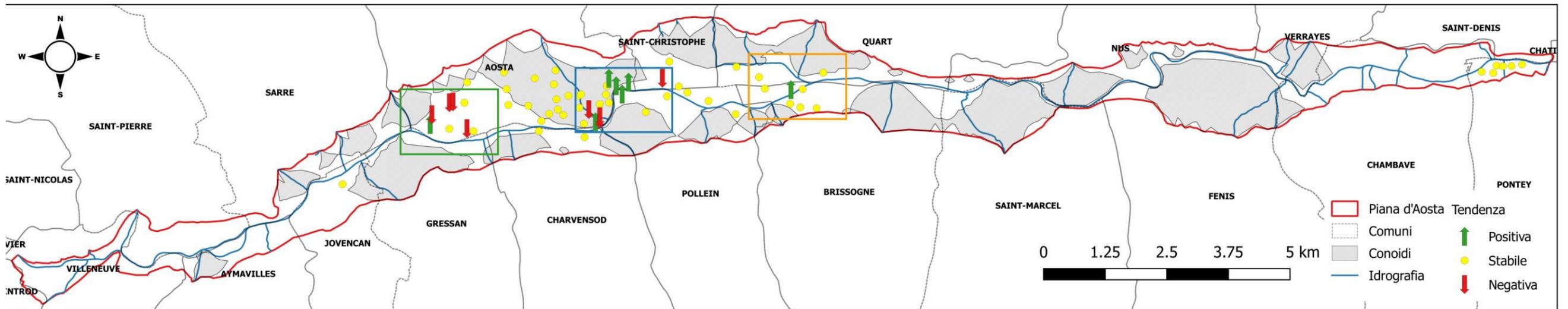


Figura 6.22: Tendenza dei livelli piezometrici a scala di singolo pozzo su lungo periodo

7. APPLICAZIONE DEL TEST 2 – ACQUE SUPERFICIALI

Le linee guida per la valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee prevedono che i corpi idrici sotterranei vengano valutati anche in funzione delle relazioni che intrattengono con i corpi idrici superficiali.

Nella fattispecie, le metodologie proposte consistono nel verificare che, qualora le acque superficiali falliscano nel raggiungimento dei propri obiettivi di qualità chimica ed ecologica, tale fallimento sia imputabile o meno allo stato quantitativo delle acque sotterranee (cfr. capitolo 3.3).

Per sua stessa definizione quindi, questa analisi è limitata in primo luogo ai corsi d'acqua superficiali che siano in stato qualitativo scarso e, in secondo luogo, solo a quelli che siano in comunicazione con la falda, secondo quanto definito dal modello concettuale.

Per l'applicazione di questo test sono quindi state raccolte le informazioni relative alla classificazione qualitativa dei corpi idrici superficiali prodotte da ARPA Valle d'Aosta¹ e dall'Autorità di Bacino del Fiume Po², al cui distretto idrografico appartiene anche la Dora Baltea e, di conseguenza, la piana d'Aosta.

Sulla base delle valutazioni chimiche ed ecologiche è quindi stato possibile verificare quali corsi d'acqua non raggiungono uno stato qualitativo complessivo compatibile con gli obiettivi di qualità, quali tra questi scorrono nella piana d'Aosta e per quali di essi esistono gli estremi per procedere al test 2 proposto dalle linee guida per le acque sotterranee.

Di seguito verranno illustrati i giudizi di qualità espressi dagli enti, divisi in stato chimico ed ecologico, e le valutazioni effettuate in questa sede riguardo lo stato quantitativo delle acque sotterranee in relazione a quelle superficiali.

¹ ARPA V.d.A. (2017): "Classificazione dei corpi idrici superficiali al termine del I PdGPO (2010-2015)"; <http://www.arpa.vda.it/it/acqua/acque-superficiali/acque-correnti/2771-classificazione-dei-corpi-idrici-superficiali-al-termini-del-i-pdgpo-2010-2015>

² Autorità di Bacino del Fiume Po (2016): "Piano di Gestione del distretto idrografico del Fiume Po"

7.1 Metodi di classificazione delle acque superficiali

La definizione dello stato di qualità dei corpi idrici superficiali consiste in un giudizio complessivo definito dal valore più basso tra il suo stato chimico ed il suo stato ecologico³ (Figura 7.1).

Per la definizione di stato chimico occorre verificare che le concentrazioni media e massima annuali degli inquinanti, riportati negli allegati del testo normativo, rispettino gli standard di qualità ambientale (SQA) previsti dal decreto stesso.

Per la definizione di stato ecologico, definito come espressione della qualità della struttura e del funzionamento degli ecosistemi acquatici, la valutazione affronta diversi elementi:

- Elementi di Qualità Biologica (EQB);
- Elementi fisico-chimici e chimici a sostegno degli elementi biologici;
- Elementi idromorfologici a sostegno degli elementi biologici;

In particolare per gli elementi idromorfologici è prevista la valutazione di elementi come il regime idrologico, la continuità fluviale e le condizioni morfologiche, attraverso l'indice IDRAIM; per la valutazione degli elementi fisico-chimici e chimici si valutano rispettivamente le concentrazioni di inquinanti specifici e l'indice LIMeco (Livello di Inquinamento dai Macrodescriptors per lo stato ecologico); gli elementi di qualità biologica vengono valutati tramite indicatori biologici (macroinvertebrati bentonici, diatomee epilittiche, macrofite, pesci).

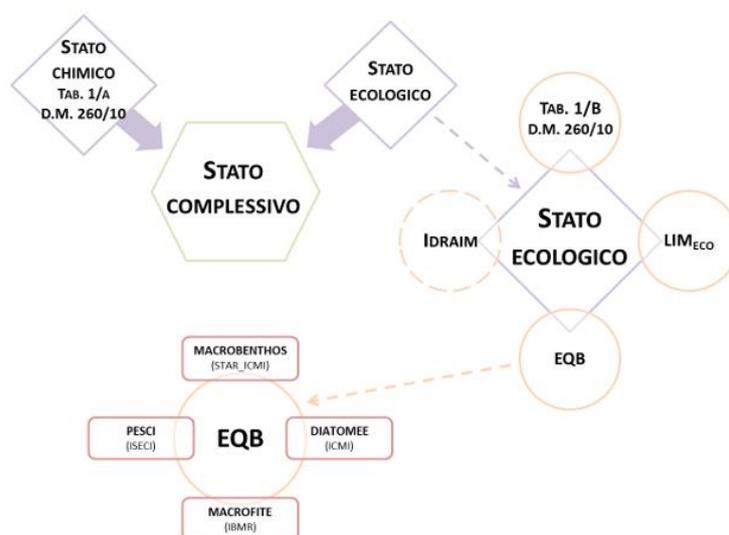


Figura 7.1: Schema procedurale per la valutazione dello stato complessivo dei corpi idrici superficiali (ARPA Valle d'Aosta)

³ D. Lgs. 152/2006, art. 74, comma 2, lettera p

7.2 Risultati della classificazione

7.2.1 Stato ecologico dei corsi d'acqua

STATO ECOLOGICO 2014-2016

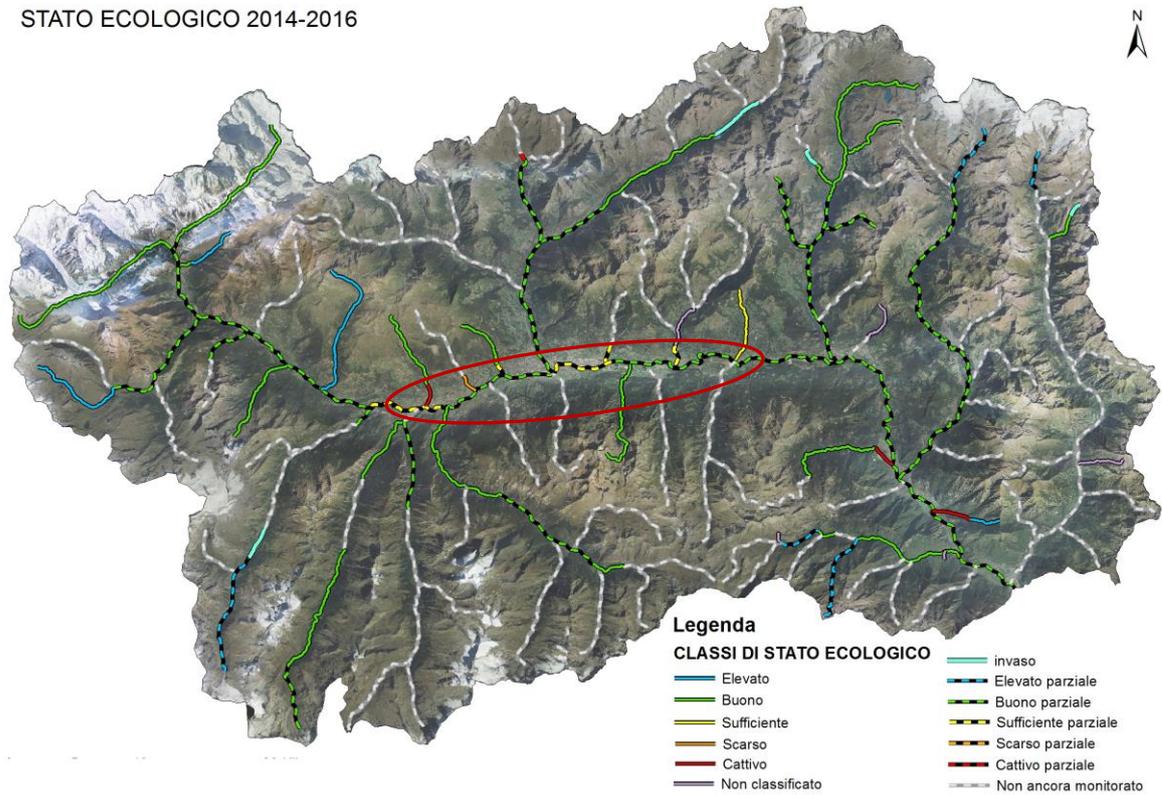


Figura 7.2: Classificazione dello stato ecologico dei corsi d'acqua superficiali nel triennio 2014-2016 (ARPA Valle d'Aosta)

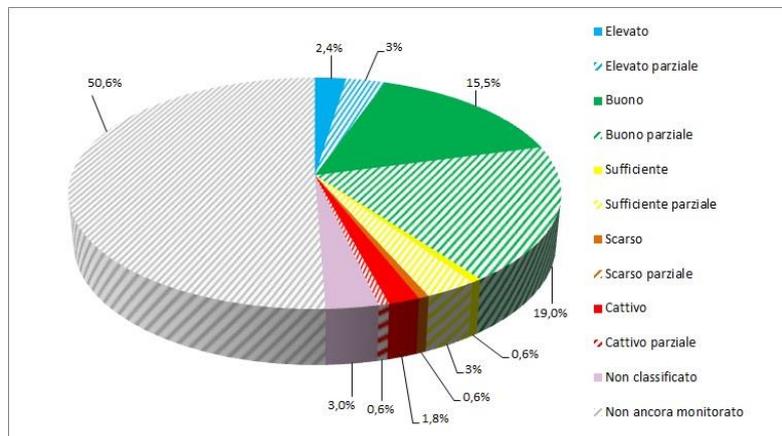


Figura 7.3: Distribuzione delle classi di qualità ecologica (ARPA Valle d'Aosta)

Al 2016, una minima percentuale di corpi idrici non raggiunge l'obiettivo di buono stato ambientale previsto dalla normativa (Figura 7.3). Si tratta, in genere, di tratti terminali di piccoli affluenti della Dora Baltea, situati in territori fortemente antropizzati, che hanno subito profonde alterazioni di tipo idromorfologico, definiti *corpi idrici fortemente modificati*.

7.2.2 Stato chimico dei corsi d'acqua

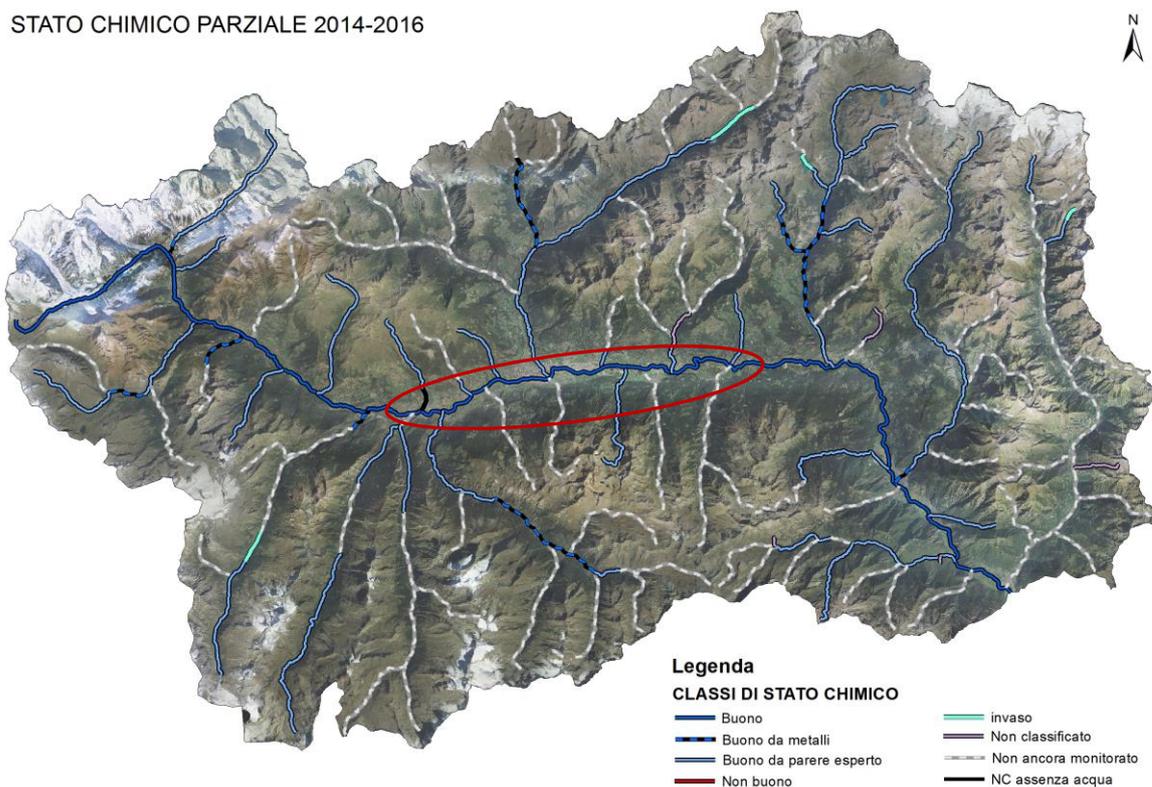


Figura 7.4: Classificazione dello stato chimico dei corsi d'acqua superficiali nel triennio 2014-2016 (ARPA Valle d'Aosta)

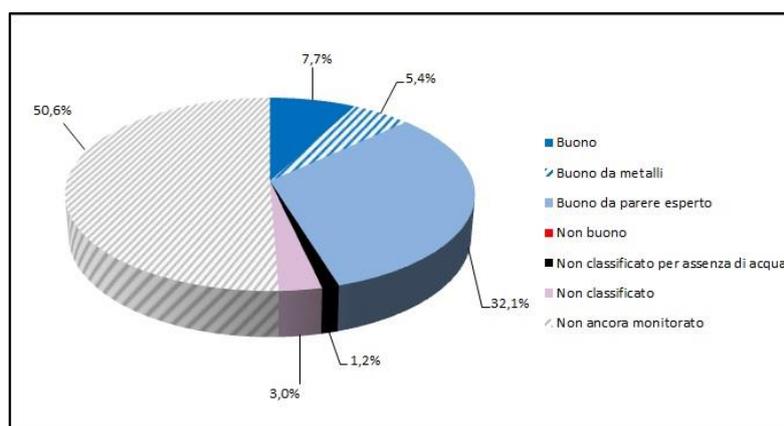


Figura 7.5: Distribuzione delle classi di qualità chimica (ARPA Valle d'Aosta)

La classificazione dello stato chimico dei corpi idrici monitorati dal 2014 al 2016 è da considerarsi provvisoria in quanto alcuni cicli di monitoraggio non sono conclusi.

Al 2016, comunque tutti i corpi idrici monitorati raggiungono il buono stato chimico. Tali risultati verranno mediati con quelli del secondo triennio di monitoraggi. I giudizi espressi come “buono da parere esperto” sono riferiti a corpi idrici su cui non insistono pressioni significative ai sensi della valutazione dello stato chimico (Figura 7.5).

7.2.3 Stato complessivo

Dal momento che i corpi idrici monitorati al 2016 presentano tutti uno stato chimico buono, lo stato ambientale complessivo è determinato dallo stato ecologico.

Suddividendo per tipologia i corpi idrici indagati, la maggior distribuzione tra le classi per lo stato ecologico si osserva in quelli da scorrimento superficiale.

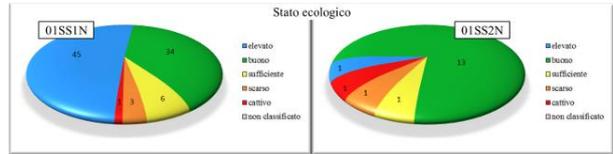


Figura 7.6: Classi di qualità per corpi a scorrimento superficiale (ARPA Valle d'Aosta)

Tutti i corpi idrici classificati come *scarsa* o *cattivo* e quasi tutti quelli classificati come *sufficiente* nel I Piano di gestione del Distretto Idrografico del Fiume Po rientrano in questa tipologia (Figura 7.6).

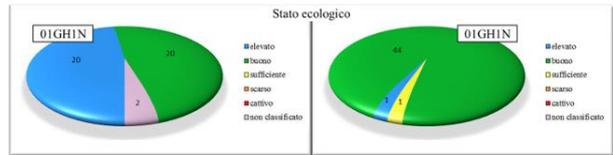


Figura 7.7: Classi di qualità per corpi di origine glaciale (ARPA Valle d'Aosta)

Infatti questi sono maggiormente soggetti, soprattutto nel periodo estivo, a periodi di mancanza d'acqua che può incidere, spesso in maniera significativa, sul giudizio di qualità finale. Si tratta inoltre principalmente di *corpi idrici altamente modificati*, cioè corpi idrici che hanno subito profonde alterazioni morfologiche e, a causa di queste, non sono più in grado di raggiungere il buono stato ecologico, ma solamente il buon *potenziale ecologico*.

STATO CHIMICO	CORPI IDRICI	STATO ECOLOGICO
BUONO	Buthier - 0765va	BUONO
BUONO	d'Arly - 0261va	BUONO
non classificato	d'Arpisson - 0342va	non classificato
BUONO	Dora Baltea - 08va	BUONO
BUONO	Dora Baltea - 09va	BUONO
BUONO	Dora Baltea - 010va	BUONO
BUONO	Dora Baltea - 011va	BUONO
BUONO	Dora Baltea - 012va	BUONO
BUONO	Dora Baltea - 013va	BUONO
BUONO	Grand Eyvia - 0437va	BUONO
BUONO	Savara - 0447va	BUONO

Figura 7.8: Classificazione dei corpi idrici naturali della piana d'Aosta (ARPA VdA, modificato)

I corpi idrici di origine glaciale, suddivisi in base alla distanza dalla sorgente, mostrano invece una minor distribuzione tra le classi e ricadono quasi interamente in classe di qualità *buono* (Figura 7.7).

STATO CHIMICO	CORPI IDRICI HMWB	STATO ECOLOGICO
BUONO	Buthier - 0766va	BUONO
BUONO	Clou Neuf - 0752va	SUFFICIENTE
BUONO	de Cluse Iliaz - 0712va	SCARSO
BUONO	de Comboué - 0361va	SCARSO
BUONO	de Crétaz - 0821va	SUFFICIENTE
BUONO	de Gressan - 0402va	SUFFICIENTE
BUONO	de Saint-Barthélemy - 0804va	SUFFICIENTE
BUONO	de Verrogne - 0702va	CATTIVO
BUONO	des Laures - 0302va	non class. sfidato
BUONO	du Château de Quart - 0792va	SUFFICIENTE
BUONO	Saint-Marcel - 0292va	SUFFICIENTE

Figura 7.9: Classificazione dei corpi idrici altamente modificati della piana d'Aosta (ARPA VdA, modificato)

Nei limiti della piana d'Aosta, la classificazione dei corpi idrici naturali (Figura 7.8) descrive una situazione generalmente buona,

in cui tutte le aste fluviali possono essere definite in buono stato di conservazione.

Per i corpi idrici che si discostano dalle condizioni di naturalità (*Figura 7.9*) invece si rivela una situazione più negativa, con 3 corsi d'acqua (torrente de Clusellaz, torrente de Comboué e torrente de Verrogne) che falliscono i propri obiettivi di qualità, mentre gli altri raggiungono uno stato sufficiente, ad eccezione del torrente Buthier che viene classificato in stato buono.

Tuttavia queste aste fluviali appartengono alla categoria dei *corpi idrici altamente modificati*, le cui criticità derivano quindi da modificazioni antropiche dell'alveo e derivazioni di acque superficiali che determinano una degradazione del loro stato ecologico e della vocazionalità, dunque indipendenti dalle interazioni con le acque sotterranee.

7.3 Risultati del Test 2 – Acque Superficiali Connesse

Secondo le indicazioni delle linee guida e in base a quanto emerso dalla valutazione dello stato quantitativo delle acque superficiali nella piana d'Aosta, il presente test non necessita di essere effettuato.

I soli corpi idrici superficiali che falliscono i propri obiettivi di qualità sono il torrente de Clusellaz, il torrente de Comboué ed il torrente de Verrogne. Tuttavia questi, essendo classificati come *corpi idrici altamente modificati*, sono in cattivo stato di conservazione per effetti antropici indipendenti dallo stato quantitativo delle acque sotterranee.

Inoltre per questi corsi d'acqua, ed in particolare per quelli occidentali (torrente de Verrogne e torrente de Clusellaz), da bibliografia si esclude una comunicazione diretta con la falda (Triganon et al., 2003; Bianquin, 2010; Bonomi et al., 2013), dunque non rispondono ai requisiti necessari a svolgere il test.

Pertanto, in accordo con quanto definito dalle linee guida, non è necessario procedere alla valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee relativa alle interazioni con le acque superficiali connesse e può essere attribuito uno *stato quantitativo buono* per definizione, secondo questo test.

8. APPLICAZIONE DEL TEST 3 – ECOSISTEMI TERRESTRI

Analogamente a quanto definito per le acque superficiali connesse, le linee guida prevedono che lo stato quantitativo delle acque sotterranee sia valutato anche in funzione della capacità di sopprimere alle necessità degli ecosistemi terrestri che da esse dipendono.

Come il precedente, anche in questo caso si tratta di un test a livello locale che mira a valutare lo stato quantitativo delle acque sotterranee laddove si riscontri un cattivo stato di conservazione degli ecosistemi terrestri dipendenti e determinare se il fallimento degli obiettivi di qualità sia imputabile al corpo idrico sotterraneo (cfr. capitolo 3.4).

Per verificare la necessità di effettuare il test e identificare le località per le quali sia eventualmente necessario, sono state raccolte le valutazioni relative allo stato di conservazione degli ecosistemi elaborate dal Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), attraverso il lavoro di ISPRA e di ARPA Valle d’Aosta, nell’ambito del progetto LIFE+¹, della Strategia Nazionale per la Biodiversità (SNB)² e della rete Natura2000³.

A seguire verrà fornita la definizione di *ecosistema connesso alle acque sotterranee* (GDE) e verranno illustrate le carte di distribuzione degli ecosistemi e il relativo stato di conservazione, con particolare riferimento ai siti Natura2000 presenti nella piana d’Aosta.

¹ <http://www.minambiente.it/pagina/life-2014-2020>

² <http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/biodiversita/documenti/strategia-nazionale-per-la-biodiversita;>
[ftp://ftp.minambiente.it/pnm/Strategia Nazionale Biodiversita/](ftp://ftp.minambiente.it/pnm/Strategia_Nazionale_Biodiversita/)

³ [http://www.minambiente.it/pagina/rete-natura-2000;](http://www.minambiente.it/pagina/rete-natura-2000) <http://www.regione.vda.it/risorsenaturali/conservazione/natura2000/>

8.1 Ecosistema dipendente dalle acque sotterranee (GDE)

Le zone umide e le acque sotterranee sono tra loro fisicamente correlate. Tale connessione è stata percepita come cruciale ai fini del funzionamento degli ecosistemi di superficie solo in tempi recenti.

È noto che i corpi idrici sotterranei dialogano in maniera più o meno diretta con le zone umide: la WFD stessa include esplicitamente nella definizione di zone umide gli habitat, acquatici o terrestri, che dipendono dal livello delle acque sotterranee. Più in particolare, gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee sono ecosistemi la cui composizione in specie viventi e i cui processi ecologici sono condizionati più o meno direttamente dalle acque sotterranee (Brunke & Gonser, 1997). Di conseguenza, se l'apporto di acqua sotterranea dovesse diminuire, o il rapporto tra acqua sotterranea e superficiale dovesse alterarsi in termini volumetrici e di profondità alla quale esso si instaura, i GDE potrebbero esserne gravemente minacciati o danneggiati (Hatton & Evans, 1998).

Molte specie vegetali utilizzano l'acqua sotterranea durante il proprio ciclo vitale e, tra queste, le specie vegetali che utilizzano l'acqua affiorata in superficie o le specie le cui radici captano la falda in profondità.

Le specie animali che intrattengono relazioni con le acque sotterranee sono invece oggetto di uno studio più complesso, a causa della carenza di dati e della difficile accessibilità degli habitat subsuperficiali, e comprendono macro e microinvertebrati che abitano gli spazi interstiziali nella zona satura o insatura.

Appare dunque evidente l'importanza delle acque sotterranee sia per la fauna stigobica che per gli ecosistemi ecotonali, in particolare nelle aree di risalita, quali ad esempio le zone di upwelling, le risorgive e i fontanili, da cui dipendono anche complessi ecosistemi terrestri (Figura 8.1).

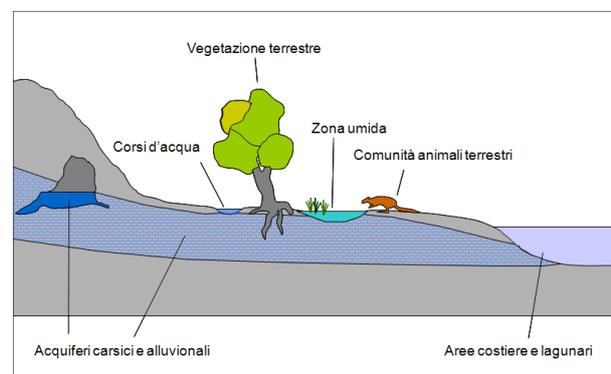


Figura 8.1: Tipi di ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee (Clifton & Evans, 1998)

Il grado di dipendenza dall'acqua sotterranea può variare anche di molto e senza soluzione di continuità, andando da ecosistemi che all'apparenza non hanno alcuna dipendenza diretta dalla risorsa, come per esempio le pozze alimentate da acque meteoriche, ad ecosistemi completamente dipendenti da essa, come i laghi carsici. Tale dipendenza inoltre può dipendere sia

dalle caratteristiche stesse dell'ecosistema, relativamente a parametri chimico-fisici, che dalla localizzazione.

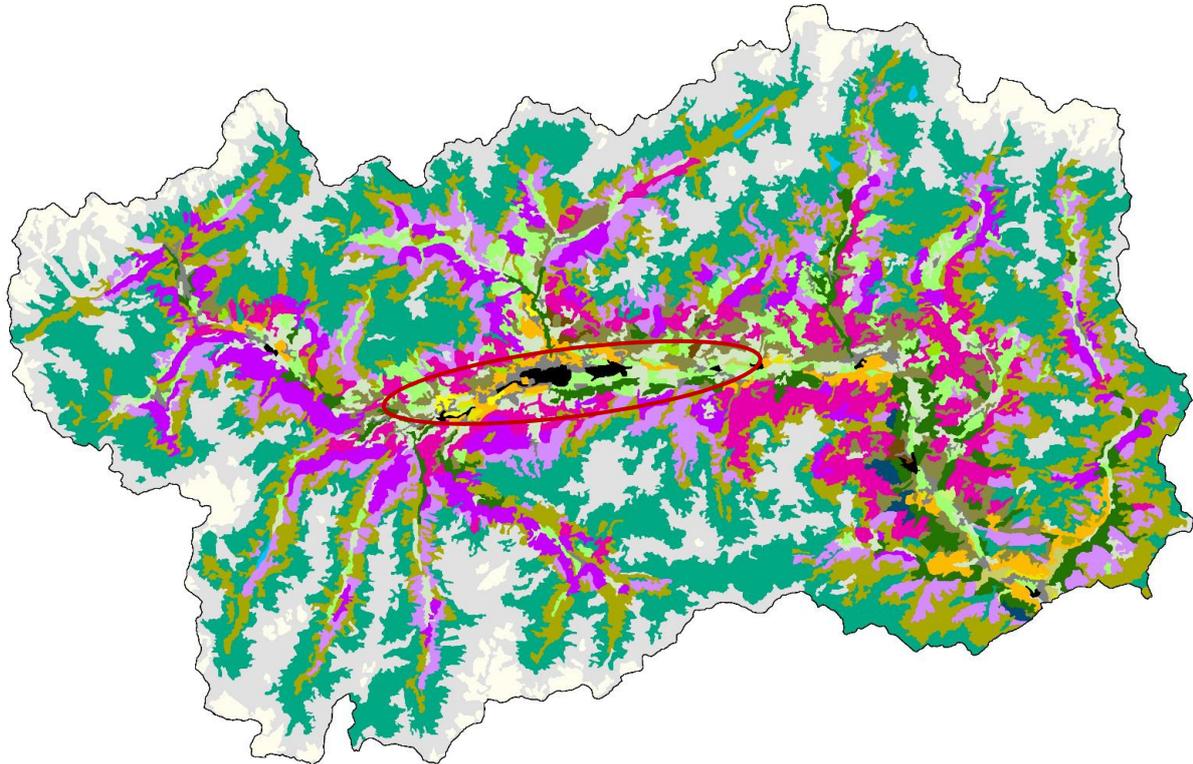
Sulla base degli aspetti geomorfologici e sulla dinamica di flusso dell'acqua sotterranea, i GDE possono essere classificati come:

- affioramenti di acque sotterranee relativamente profonde che vanno a formare sorgenti distinte associate a zone umide, come nel caso delle risorgive;
- affioramenti di acque sotterranee poco profonde o di acquiferi pensili, come nel caso degli acquitrini e delle paludi che si formano nelle depressioni del terreno;
- affioramenti di acquiferi estesi che forniscono un flusso, permanente o intermittente, anche in periodi siccitosi nei tratti più a monte delle zone umide;
- affioramenti di acque sotterranee in lagune e altre zone umide costiere, con conseguente diluizione della salinità;
- ecosistemi terrestri, semi-aridi o umidi, dove non affiora l'acqua sotterranea, ma la cui vegetazione è rappresentata dalle freatofite, cioè specie vegetali con apparato radicale profondo in grado di assorbire l'acqua direttamente dalla falda;

Per l'individuazione degli ecosistemi interessanti ai fini dell'applicazione del test 3 per la valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee sono quindi state confrontate le carte della naturalità della Valle d'Aosta, della vegetazione reale e potenziale, nonché le liste dei siti Natura2000 per quanto riguarda in particolare le aree umide ed i relativi giudizi riguardo lo stato di conservazione.

8.2 Stato di conservazione degli ecosistemi

8.2.1 Carta degli ecosistemi



- Ecosistemi forestali alpini e prealpini a dominanza di querce caducifoglie (*Quercus petraea*, *Q. pubescens*, *Q. robur* e/o *Q. cerris*)
- Ecosistemi forestali alpini, prealpini e del Carso a dominanza di *Ostrya carpinifolia*, *Fraxinus excelsior* e/o *Carpinus betulus*
- Ecosistemi forestali alpini e prealpini a dominanza di *Castanea sativa*
- Ecosistemi forestali alpini e prealpini montani a dominanza di *Fagus sylvatica* con *Picea abies*, *Abies alba*, *Sorbus aucuparia*, ecc.
- Ecosistemi forestali alpini, prealpini e del Carso a dominanza di *Pinus sylvestris* e/o *P. nigra*
- Ecosistemi forestali alpini e prealpini a dominanza di *Picea abies* e/o *Abies alba*
- Ecosistemi forestali alpini e prealpini a dominanza di *Pinus cembra* e/o *Larix decidua*
- Ecosistemi erbacei d'altitudine delle Alpi (fasce alpina, subalpina e alto-montana) a *Kobresia myosuroides*, *Carex curvula*, *C. firma*, *Festuca violacea*, *F. dimorpha*, *Sesleria sphaerocephala*, ecc.
- Ecosistemi erbacei montani e collinari delle Alpi (fasce montana, submontana e collinare) a *Trisetum flavescens*, *Brachypodium pinnatum*, *Lolium perenne*, ecc.
- Ecosistemi erbacei basso-collinari e pedemontani delle Alpi e planiziali (Pianura Padana) a *Arrhenatherum elatius*, *Alopecurus pratensis*, *Sanguisorba officinalis*, *Chrysopogon gryllus*, ecc.
- Ecosistemi arbustivi d'altitudine delle Alpi (fasce subalpina e alto-montana) a *Pinus mugo*, *Rhododendron ferrugineum*, *R. hirsutum*, *Juniperus communis* subsp. *alpina*, *Vaccinium* sp.pl., ecc.
- Ecosistemi arbustivi montani e collinari delle Alpi e del Carso (fasce montana, submontana e collinare) a *Alnus viridis*, *Salix* sp.pl., *Berberis vulgaris*, *Erica carnea*, *Juniperus communis*, ecc.
- Ecosistemi arbustivi basso-collinari e pedemontani delle Alpi e planiziali (Pianura Padana) a *Calluna vulgaris*, *Genista cinerea*, *Cytisus scoparius*, ecc.
- Ecosistemi igrofilici dulcicoli alpini (sponde fluviali e zone umide a copertura vegetale variabile)
- Ecosistemi casmofitici, comofitici e glareicoli alpini
- Ecosistemi idrofittici dulcicoli lotici alpini (a idrofite radicanti sommerse e elfofite)
- Ecosistemi idrofittici dulcicoli lentici alpini (a idrofite natanti e radicanti)
- Ghiacciai e nevi perenni
- Superfici artificiali
- Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado
- Vigneti
- Frutteti e frutti minori
- Prati stabili (foraggiere permanenti)
- Zone agricole eterogenee
- Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti

Figura 8.2: Carta degli ecosistemi della Valle d'Aosta (ISPRA)

8.2.2 Carta dello stato di conservazione

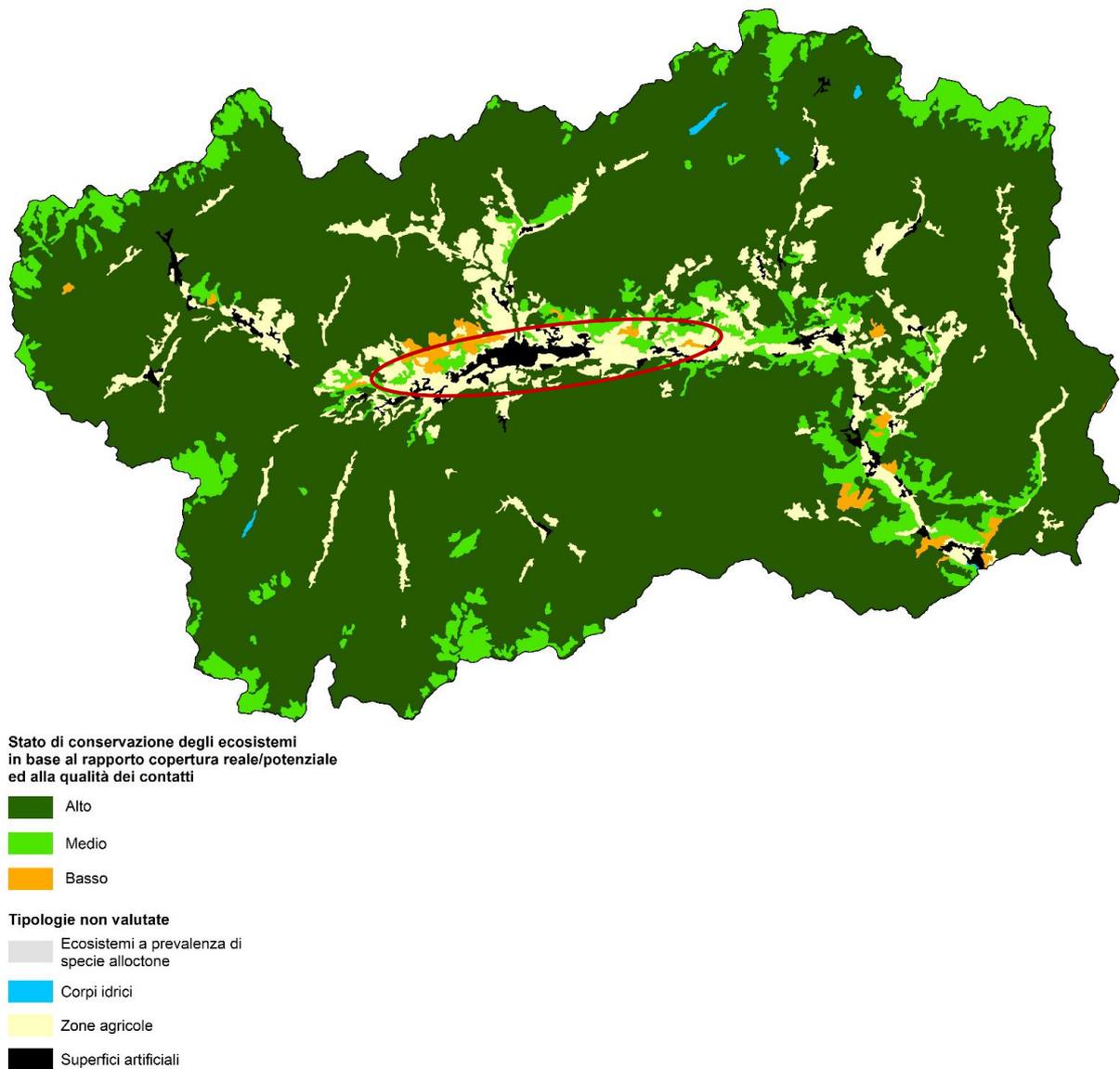


Figura 8.3: Carta dello stato di conservazione degli ecosistemi della Valle d'Aosta (ISPRA)

8.2.3 Carta della vegetazione naturale potenziale

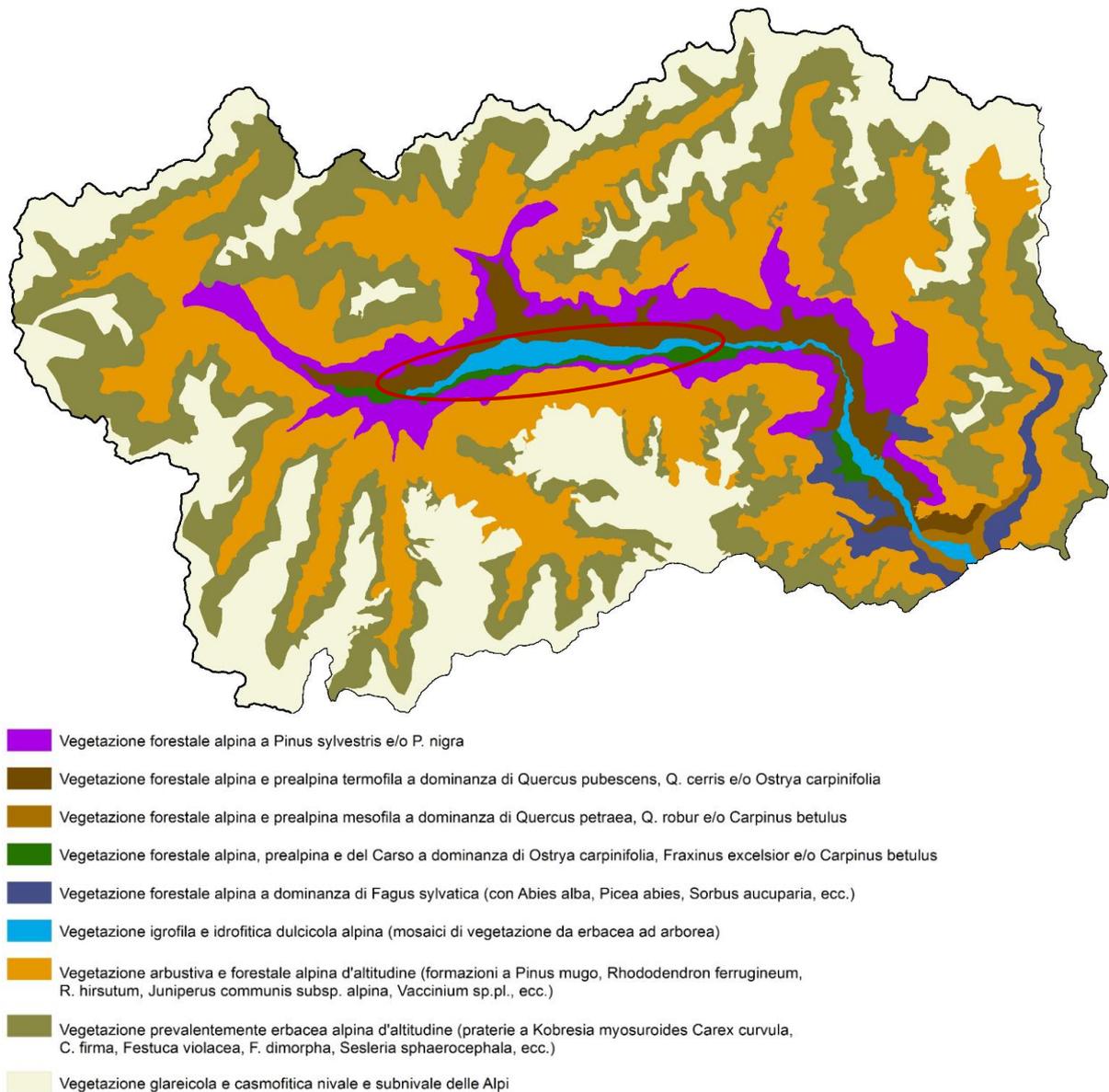


Figura 8.4: Carta della vegetazione naturale potenziale della Valle d'Aosta (ISPRA)

8.2.4 Copertura e stato di conservazione degli ecosistemi

VALLE D'AOSTA (325.992 ettari) (ILC: Valle d'AOSTA = 0,94; Italia = 0,65)	% rispetto alla copertura nazionale	Ettari	% di copertura	N° di poligoni	Area media (Ha) dei poligoni	Rapporto reale/potenziale	Qualità dei contatti	% protetta	STATO DI CONSERVAZIONE	
									Nazionale	Regionale
ECOSISTEMI MATURI (ITALIA = 49 VALLE D'AOSTA = 11)										
Ecosistemi erbacei d'altitudine delle Alpi (fasce alpina, subalpina e alto-montana) a Kobresia myosuroides Carex curvula, C. firma, Festuca violacea, F. dimorpha, Sesleria sphaerocephala, ecc.	11,8	86.050	26,39	420	205	Alto	Altissima	36	Alto	Alto
Ecosistemi casmofitici, comofitici e giareicoli alpini	16,5	66.304	20,34	58	1143	Alto	Altissima	52	Alto	Alto
Ecosistemi arbustivi d'altitudine delle Alpi (fasce subalpina e alto-montana) a Pinus mugo, Rhododendron ferrugineum, R. hirsutum, Juniperus communis subsp. alpina, Vaccinium sp. pl., ecc.	16,9	43.889	13,46	354	124	Alto	Altissima	51	Alto	Alto
Ecosistemi forestali alpini e prealpini a dominanza di Pinus cembra e/o Larix decidua	8,8	26.003	7,98	169	154	Alto	Altissima	19	Alto	Alto
Ecosistemi forestali alpini e prealpini a dominanza di Picea abies e/o Abies alba	2,3	17.509	5,37	61	287	Alto	Alta	18	Alto	Alto
Ecosistemi forestali alpini, prealpini e del Carso a dominanza di Pinus sylvestris e/o P. nigra	19,4	16.200	4,97	59	275	Alto	Alta	14	Alto	Alto
Ghiacciai e nevi perenni	0,3	14.948	4,58	62	241	Medio	Altissima	68	Alto	Medio
Ecosistemi forestali alpini, prealpini e del Carso a dominanza di Ostrya carpinifolia, Fraxinus excelsior e/o Carpinus betulus	1,6	8.483	2,60	56	151	Alto	Alta	2	Alto	Alto
Ecosistemi forestali alpini e prealpini montani a dominanza di Fagus sylvatica con Picea abies, Abies alba, Sorbus aucuparia, ecc.	0,2	693	0,21	4	173	Medio	Altissima	8	Alto	Medio
Ecosistemi forestali alpini e prealpini a dominanza di querce caducifoglie (Quercus petraea, Q. pubescens, Q. robur e/o Q. cerris)	1,4	551	0,17	8	69	Alto	Medio Bassa	0	Medio	Alto
Ecosistemi igrofilici dulcicoli alpini (sponde fluviali e zone umide a copertura vegetale variabile)	0,4	54	0,02	1	54	Basso	Altissima	100	Medio	Basso
ECOSISTEMI SUCCESIONALIS O DI SOSTITUZIONE (ITALIA = 29; VALLE D'AOSTA = 6)										
Ecosistemi arbustivi montani e collinari delle Alpi e del Carso (fasce montana, submontana e collinare) a Alnus viridis, Salix sp. pl., Berberis vulgaris, Erica carnea, Juniperus communis, ecc.	5,6	9.519	2,92	70	136	Medio	Alta	4	Medio	Medio
Ecosistemi forestali alpini e prealpini a dominanza di Castanea sativa	1,2	2.420	0,74	11	220	Medio	Altissima	0	Medio	Medio
Ecosistemi forestali alpini, prealpini e del Carso a dominanza di Pinus sylvestris e/o P. nigra	1,9	1.685	0,52	7	241	Basso	Alta	1	Basso	Basso
Ecosistemi arbustivi basso-collinari e pedemontani delle Alpi e pianiziali (Pianura Padana) a Calluna vulgaris, Genista cinerea, Cytisus scoparius, ecc.	1,0	499	0,15	4	125	Basso	Alta	0	Basso	Basso
Ecosistemi erbacei montani e collinari delle Alpi (fasce montana, submontana e collinare) a Trisetum flavescens, Brachypodium pinnatum, Lolium perenne, ecc.	0,3	379	0,12	6	63	Basso	Alta	1	Basso	Basso
Ecosistemi erbacei basso-collinari e pedemontani delle Alpi e pianiziali (Pianura Padana) a Arrhenatherum elatius, Alopecurus pratensis, Sanguisorba officinalis, Chrysopogon gryllus, ecc.	1,3	112	0,03	2	56	Basso	Altissima	0	Basso	Basso

Figura 8.5: Stato di conservazione degli ecosistemi della Valle d'Aosta (ISPRA, modificato)

8.2.5 Individuazione degli ecosistemi a rischio

Dal riepilogo riguardante lo stato di conservazione degli ecosistemi (Figura 8.5) risulta che gli ecosistemi igrofilici dulcicoli alpini (sponde fluviali e zone umide a copertura vegetale variabile) sono in *basso stato di conservazione* a livello regionale.

Secondo tale valutazione, per questi ecosistemi potrebbe quindi essere necessario procedere all'applicazione del Test 3 delle linee guida per verificare se tale condizione sia da ricondurre allo stato quantitativo delle acque sotterranee.

Portando l'attenzione a livello più locale e concentrandosi sulla piana d'Aosta per individuare le zone sulle quali condurre eventualmente il test, dalla carta della vegetazione naturale potenziale (Figura 8.4) si può notare che le aree vocate a vegetazione igrofila e idrofita dulcicola alpina si concentrano nella zona di centro valle, dove è presente la falda e scorre la Dora Baltea.

Dalla carta dello stato di conservazione degli ecosistemi (Figura 8.3) tuttavia emerge che tali zone sono caratterizzate da un tessuto fortemente urbanizzato e agricolo, in cui lo stato di naturalità è compromesso dalla destinazione stessa del territorio e non sono state valutate dal punto di vista dello stato di conservazione di tali ecosistemi.

Le aree che non rientrano in questa categoria di territorio presentano invece uno stato di conservazione tra medio e alto, ad eccezione di alcune aree di alto versante nella zona occidentale che tuttavia non risultano interessate dalla falda e dal tipo di vegetazione in esame.

La criticità maggiore per la piana d'Aosta in relazione a questi ecosistemi sembrerebbe quindi essere collegata al consumo di suolo e alla destinazione delle aree ad uso agricolo, indipendentemente dalle interazioni con le acque sotterranee.

Ciò non esclude che possano essere necessari ulteriori approfondimenti, in quanto le informazioni a riguardo sono carenti. In particolare per quanto riguarda la zona centro-orientale della piana tra Brissogne e Pontey, come illustrato nel capitolo 5.3, le informazioni piezometriche necessarie ad una valutazione robusta ed approfondita per definire un'eventuale influenza della falda sullo sviluppo della vegetazione risultano frammentarie e di limitata copertura temporale.

8.3 Rete Natura2000

Rivolgendo particolare attenzione alle zone umide (*wetlands*), alle Zone di Protezione Speciale (ZPS) e ai Siti di Interesse Comunitario (SIC), sono stati ricercati i siti iscritti alla rete Natura2000 per verificarne lo stato di conservazione e quindi la necessità di valutare lo stato delle acque sotterranee da cui dipendono.

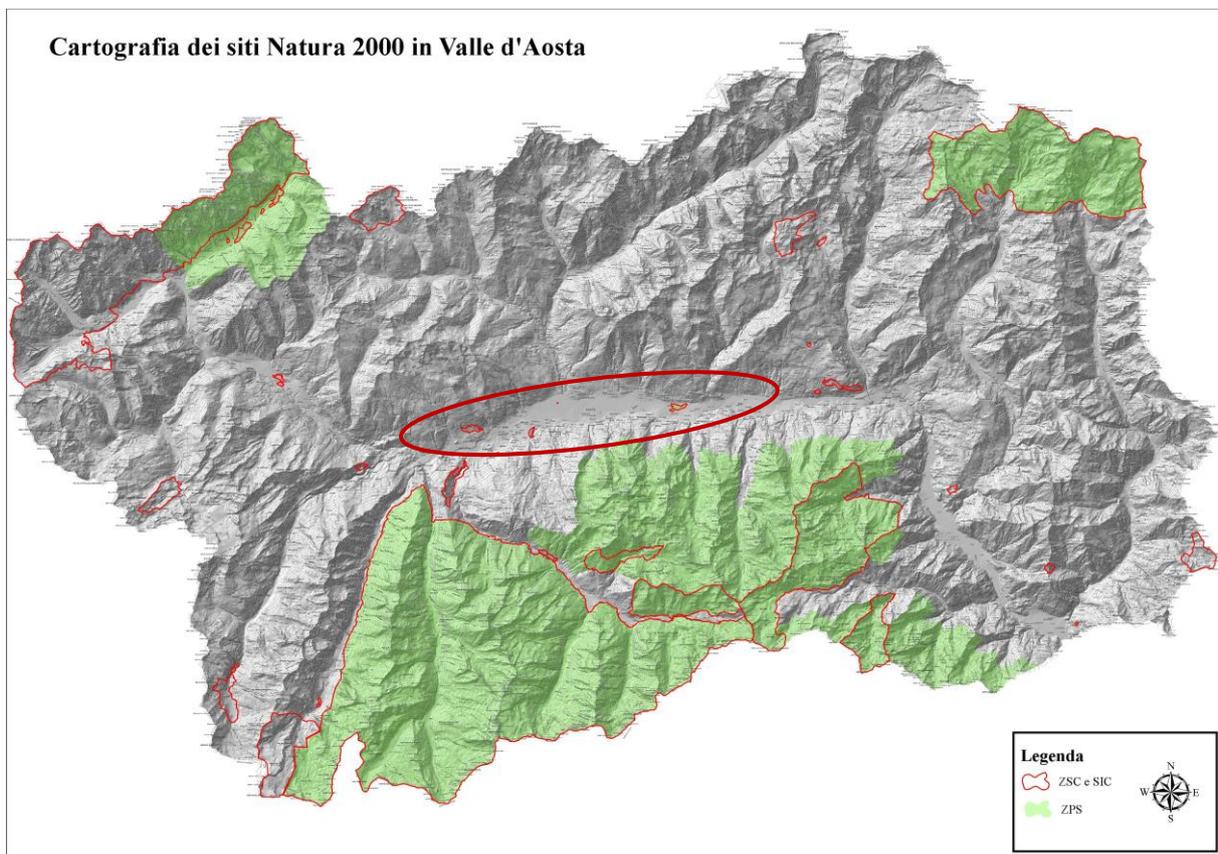


Figura 8.6: Inquadramento dei siti della rete Natura 2000 in Valle d'Aosta (ARPA VdA)

In Valle d'Aosta sono stati individuati 30 siti appartenenti alla rete ecologica europea Natura2000 (Figura 8.6):

- 25 Zone Speciali di Conservazione (ZSC);
- 2 Zone di Protezione Speciale (ZPS);
- 2 Zone Speciali di Conservazione e Zone di Protezione Speciale (ZSC/ZPS);
- 1 Sito di Importanza Comunitaria e Zona di Protezione Speciale (SIC/ZPS);

La rete interessa circa il 30% del territorio regionale, comprende la quasi totalità delle aree naturali protette e riguarda, in gran parte, aree situate a quote elevate, mediamente oltre i 1600 metri di altitudine.

Relativamente ai comuni che si affacciano sulla piana d’Aosta, le aree protette presenti sono:

- Pont d’Ael, nel comune di Aymavilles;
- Ambienti xerici di Mont Torretta-Bellon, nei comuni di Sarre e Saint-Pierre;
- Castello e miniere abbandonate di Aymavilles, nei comuni di Aymavilles e Aosta;
- Riserva Naturale zona umida di Les Iles di Saint-Marcel, nei comuni di Brissogne, Saint-Marcel, Quart e Nus;
- Riserva Naturale stagno di Loson, nel comune di Verrayes;
- Ambienti xerici di Grand Brison-Cly, nel comune di Saint-Denis;
- Mont Avic e Mont Emilius, nei comuni di Cogne, Charvensod e Pollein;

Tra questi, vi sono due wetlands, ma l’unica che risiede nella piana d’Aosta e che può quindi avere interazioni con la falda presente è la *Riserva Naturale zona umida di Les Iles di Saint-Marcel*.

8.3.1 Zona umida Les Iles di Saint-Marcel

La zona umida di Les Iles è stata proposta come SIC nel 1995 e classificata come tale nel 2003, con il codice IT1205070.

Collocata ad una quota media di 528 metri, copre un’area di 35.4 ha e rappresenta il più importante sito regionale di sosta e alimentazione per l’avifauna migratrice, accogliendo anche diverse specie nidificanti.

Lungo le sponde domina l’antico paesaggio ripario, ormai raro, con la *Phragmites australis*, la *Typha latifolia*, oltre a varie specie dei generi *Juncus spp.* e *Carex spp.*, mentre le acque ospitano Tinche, Lucci, Trote e Scardole.

In questo sito, gli uccelli trovano il più importante punto di sosta della regione; tra questi si possono annoverare l’Airone bianco, l’Airone rosso, la Garzetta e numerosi anatidi.

Il sito assume massima importanza in primavera, quando si raggiunge l'apice di segnalazioni e avvistamenti. È stata accertata la nidificazione di oltre 40 specie, e tra le stanziali si segnalano Germano reale, Folaga, Cannaiola e Gallinella d'acqua, tipica fauna della vegetazione palustre.

Le caratteristiche del sito riportate nella scheda tecnica lo descrivono come una zona a clima continentale che vanta il picco di siccità dell'intera regione. Il sito è caratterizzato dalla presenza di laghi di cava in gran parte naturalizzati, da alcuni stagni e da un piccolo bosco igrofilo a salici e ontano bianco. Il livello idrico dell'area è assicurato dalla falda di subalveo.

Viene sottolineata una pressione antropica elevata.

La scheda redatta per il sito (Figura 8.7) illustra una situazione relativa agli habitat generalmente buona, con alcune criticità riferibili alla copertura areale degli habitat stessi.

Dalla valutazione del sito riguardo le vulnerabilità presenti nell'area, si cita: “contrazione del biotipo per espansione di attività industriali e costruzione di infrastrutture viarie e turistiche”.

Dalla valutazione redatta dall'ente responsabile non emergono quindi evidenze di pressioni dovute a shock da carenza idrica, pertanto ai fini della valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee non appare necessario procedere all'applicazione del Test 3 – Ecosistemi Terrestri Dipendenti.

3.1. Tipi di HABITAT presenti nel sito e relativa valutazione del sito:

TIPICI DI HABITAT ALLEGATO I:

CODICE	% COPERTA	RAPPRESENTATIVITÀ	SUPERFICIE RELATIVA	GRADO DI CONSERVAZIONE	VALUTAZIONE GLOBALE
91E0	11	A	C	B	B
3150	11	B	C	C	C
6510	6	B	C	B	B
3230	5	A	C	B	B
3220	5	A	C	B	B
7230	2	C	C	C	C
6430	2	C	C	B	C
3130	2	B	C	C	C
6210	1	B	C	B	B

Figura 8.7: Valutazione del sito relativamente agli habitat presenti (ARPA VdA)

8.4 Risultati del Test 3 – Ecosistemi Terrestri Dipendenti

In relazione ai siti della rete Natura2000, l'unica area che intrattiene interazioni con le acque sotterranee è costituita dalla Riserva Naturale zona umida Les Iles di Saint-Marcel.

Lo stato di conservazione di questa area protetta è generalmente buono sebbene siano evidenziati problemi conservazionistici legati alla copertura areale degli ecosistemi presenti. Viene tuttavia sottolineato che tali problemi sono legati all'espansione delle attività industriali e all'edificazione, con conseguente contrazione dell'areale del biotipo. La disponibilità idrica superficiale per il mantenimento della funzionalità dell'ecosistema non presenta problemi, e viene anzi dichiarata garantita.

Pertanto non viene ritenuto necessario applicare le procedure relative al Test 3 per quest'area e, in accordo con quanto definito dalle linee guida, può essere attribuito uno *stato quantitativo buono* alle acque sotterranee.

Relativamente agli altri ecosistemi terrestri presenti nella piana di Aosta e non classificati come aree protette, le carte della distribuzione degli ecosistemi illustrano un'area a vegetazione potenziale igrofila e idrofitica concentrata nel fondovalle. Si evidenzia un diffuso stato di conservazione degradato, con consistente consumo di suolo e destinazione di aree ad uso edilizio e agricolo.

La valutazione degli ecosistemi attribuisce lo scarso stato di conservazione al basso rapporto vegetazione potenziale/reale in termini di copertura areale, dunque all'apparenza dovuto all'espansione urbanistica e all'agricoltura e indipendente dallo stato quantitativo delle acque sotterranee.

Tuttavia la carenza di dati di monitoraggio relativi alla falda, riscontrabili soprattutto nella zona centro-orientale della piana tra Brissogne e Pontey, non consentono di valutare se esistano anche problemi legati alle acque sotterranee.

Pertanto per una valutazione adeguata della zona e del relativo stato quantitativo sarebbe opportuno disporre di dati più robusti ottenuti da un monitoraggio diffuso e sufficientemente protratto nel tempo.

9. MONITORAGGIO

La valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee deve essere eseguita con regolarità ogni 6 anni, sia in forma *Analisi di rischio*, condotta all'inizio del ciclo di gestione del bacino per prevedere il raggiungimento degli obiettivi, sia in forma di *Analisi di stato*, per valutare l'efficacia delle misure messe in atto e determinare se sia stato raggiunto il *buono stato quantitativo*.

Questi due procedimenti sono in un rapporto di reciproco miglioramento, in quanto dall'analisi di stato si valuta l'efficacia della tutela progettata sull'analisi di rischio, e dall'analisi di rischio si punta ad ottenere un buono stato quantitativo definendo le misure da mettere in atto.

Alla base di tutto sta la *rete di monitoraggio*, dai cui risultati possono essere condotte le indagini e che viene organizzata e integrata sui risultati delle analisi stesse, formando quindi un circolo virtuoso di continua crescita delle conoscenze sulla base dei nuovi dati acquisiti.

Nel corso dell'applicazione dei test proposti dalle linee guida ed illustrati nei capitoli precedenti, sono state messe in luce criticità relative alla struttura della rete di monitoraggio presente nella piana d'Aosta e ai dati disponibili che hanno reso difficoltoso il raggiungimento di un giudizio sullo stato quantitativo delle acque sotterranee e hanno richiesto delle modifiche in corso d'opera dei protocolli adottati.

Con l'obiettivo di fornire indicazioni riguardo i futuri monitoraggi e rendere quindi più efficienti ed efficaci le valutazioni svolte nei prossimi cicli di gestione del bacino, sono state eseguite delle analisi per studiare il comportamento delle serie in funzione della loro lunghezza, numerosità e completezza. L'obiettivo è quello di determinare quanto debba essere frequente il monitoraggio e quanto debbano essere lunghe le serie storiche per restituire delle valutazioni attendibili e significative, così da censire le stazioni compatibili e permettere una selezione dei pozzi o piezometri con cui registrare i dati.

Infine, attraverso l'analisi delle fluttuazioni piezometriche stagionali, è stata studiata la piana d'Aosta per determinare i periodi di massimo e minimo livello della falda e come questi siano distribuiti lungo la piana. In questo modo è stato possibile ottenere una carta che illustra la stagionalità sotto l'aspetto spaziale per offrire un supporto alla definizione dei piani di monitoraggio che possano raccogliere informazioni più rappresentative e robuste attraverso campagne organizzate sul rapporto tra zona e periodo dell'anno.

9.1 Caratteristiche delle serie storiche

Per perseguire l'obiettivo di fornire indicazioni su come ottenere serie storiche rappresentative e statisticamente significative, è stato valutato come cambia la pendenza e come un dataset risponda al test di Mann-Kendall per la significatività del trend al variare delle caratteristiche della serie stessa.

In particolare, è stata utilizzata la serie del piezometro Ao32 come dataset originale, in quanto caratterizzata da lunghezza (durata 2000-2017), numerosità (228 misure distribuite nei 18 anni), omogeneità e consistenza dei dati (misure almeno mensili in quasi tutto il periodo).

Questa serie è stata utilizzata come base standard per ottenere altre serie modificate che rappresentassero caratteristiche differenti, ma prive della variabilità naturale dovuta ad una origine diversa dei dati.

Nel dettaglio, la serie è stata utilizzata tal quale e modificata in modo da ottenere:

- frequenze campionarie di 2, 4, 6 misure all'anno o misure mensili (quando disponibili);
- serie completa o serie prive di 1, 2 o 3 anni corrispondenti a periodo di minimo livello piezometrico pluriennale, massimo livello piezometrico pluriennale, anno di livello medio e combinazioni di questi;
- lunghezza della serie di 18 anni o serie di durata progressiva da 6 a 12 anni;
- serie sessennali collocate in periodi diversi (2000-2005, 2006-2011, 2012-2017);

Per costruire le serie rappresentative delle diverse frequenze di monitoraggio sono state utilizzate le medie mensili ricavate dal dataset completo. In particolare:

- per la serie da 2 misure/anno sono stati utilizzati aprile e luglio (sostituiti rispettivamente da quelli di marzo o maggio e da quelli di agosto in caso di dati mancanti);
- per la serie da 4 misure/anno sono stati utilizzati gennaio, aprile, luglio e ottobre, sostituiti dalla misura più vicina temporalmente in caso di dato mancante;
- per la serie da 6 misure/anno sono stati utilizzati gennaio, marzo, maggio, luglio, settembre e novembre, sostituiti dalla misura più vicina in caso di dato mancante;

Di seguito verranno illustrati i comportamenti delle varie serie, il relativo test di Mann-Kendall e le conclusioni che se ne possono trarre così da giungere ad una ipotesi di struttura del piano di monitoraggio che sia al contempo significativa ed efficiente per le finalità necessarie.

9.1.1 Frequenza di monitoraggio delle serie complete

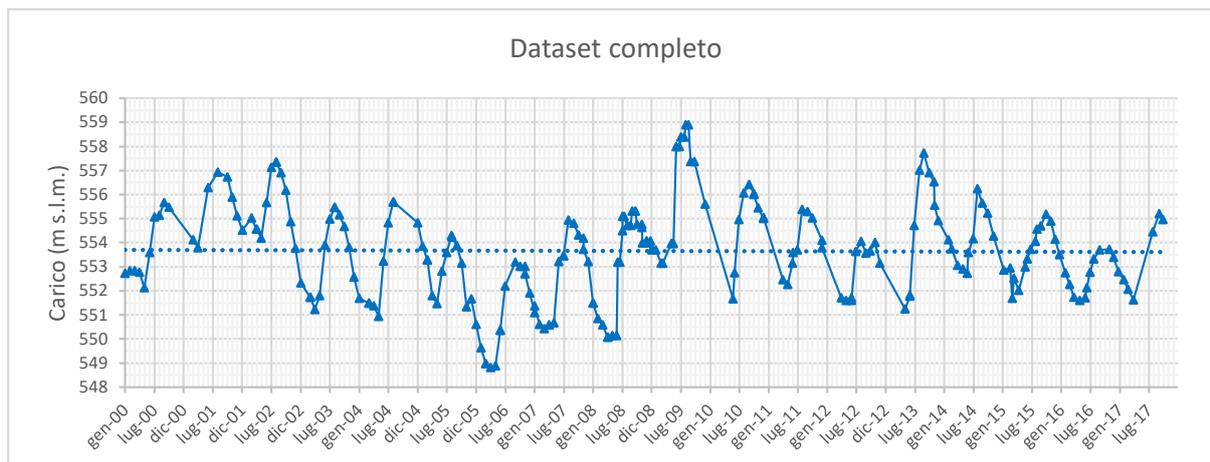


Figura 9.1: Piezometria 2000-2017 di Ao32 utilizzando l'intero dataset

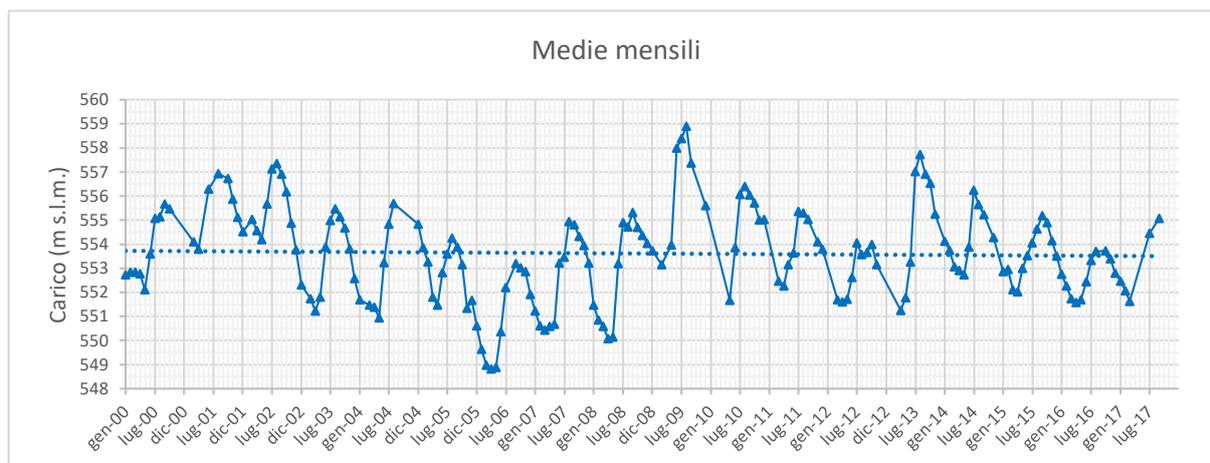


Figura 9.2: Piezometria 2000-2017 di Ao32 utilizzando medie mensili (non tutti i mesi possiedono misure)

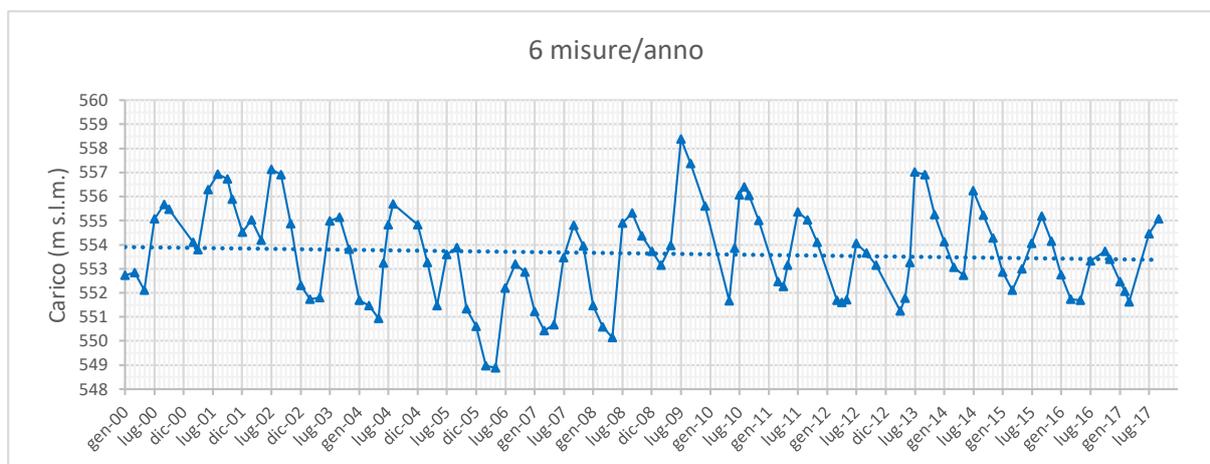


Figura 9.3: Piezometria 2000-2017 di Ao32 utilizzando 6 misure all'anno (i mesi mancanti sono stati sostituiti con misure vicine)

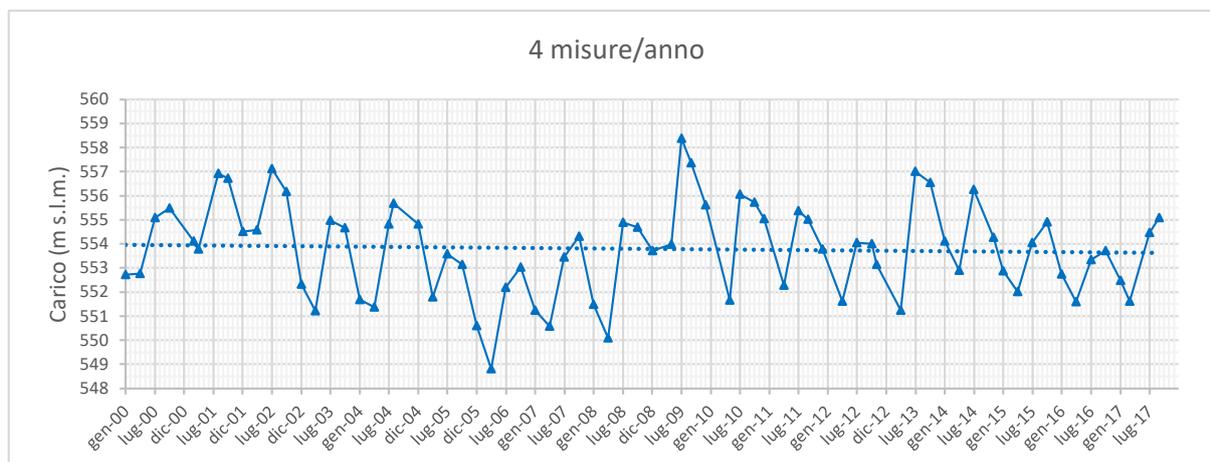


Figura 9.4: Piezometria 2000-2017 di Ao32 utilizzando 4 misure all'anno (frequenza stagionale, non sempre corrispondente agli stessi mesi)

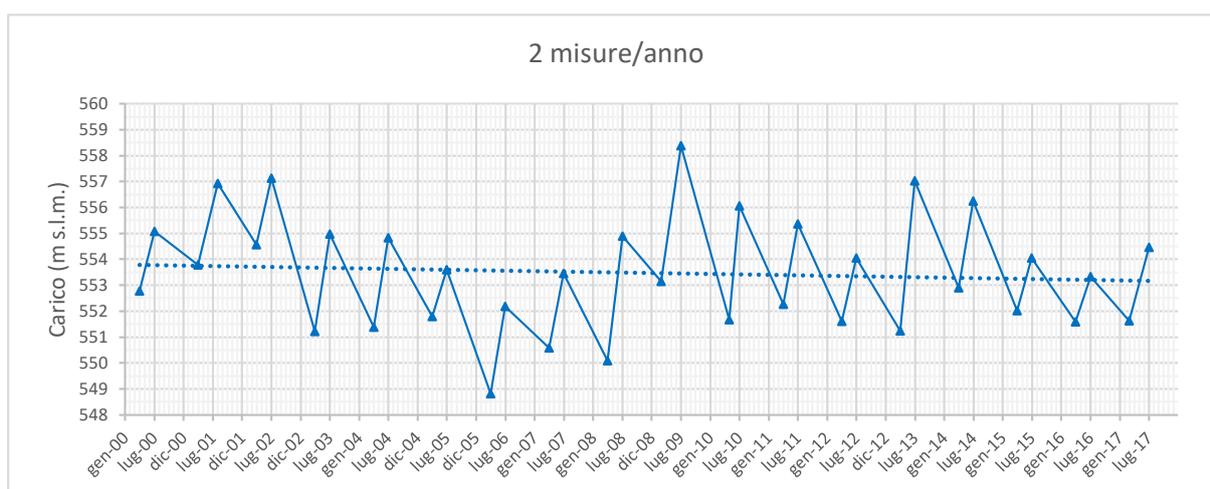


Figura 9.5: Piezometria 2000-2017 di Ao32 utilizzando 2 misure all'anno (in primavera e in estate secondo i cicli di massimo e minimo piezometrico, non sempre corrispondenti agli stessi mesi)

Serie	Dati	Pendenza	S	p-value	Trend
Dataset completo	220	-1.4323E-05	-384	0.3630	No
Medie mensili	173	-3.5763E-05	-721	0.1720	No
6 misure/anno	107	-8.1652E-05	-386	0.1500	No
4 misure/anno	72	-5.0934E-05	-117	0.2860	No
2 misure/anno	36	-1.0029E-04	-35	0.3220	No

Tabella 9.1: Statistiche delle serie 2000-2017 con differenti risoluzioni

Dai grafici non emergono particolari problematiche relativamente alla rappresentazione dell'andamento della falda quale che sia la frequenza campionaria. I dataset con una maggior risoluzione offrono chiaramente una descrizione più accurata e approfondita della dinamica piezometrica, tuttavia elementi essenziali quali minimo e massimo pluriennale e fluttuazione stagionale risultano debitamente rappresentati anche per mezzo di misure a cadenza trimestrale o, in maniera minore, semestrale.

Dai test condotti (*Tabella 9.1*) si può notare che la retta di regressione resta sostanzialmente invariata indipendentemente dal numero di dati utilizzati, tranne che per la serie composta da sole 2 misure all'anno, la quale mostra una pendenza negativa più accentuata, ma comunque confrontabile.

L'abbondanza di dati, direttamente proporzionale alla frequenza delle misure, influisce però sulla significatività del trend determinata dal test di Mann-Kendall diminuendone la precisione. Il p-value restituito dal test statistico infatti cresce al diminuire delle misure, anche a fronte di un aumento del coefficiente angolare.

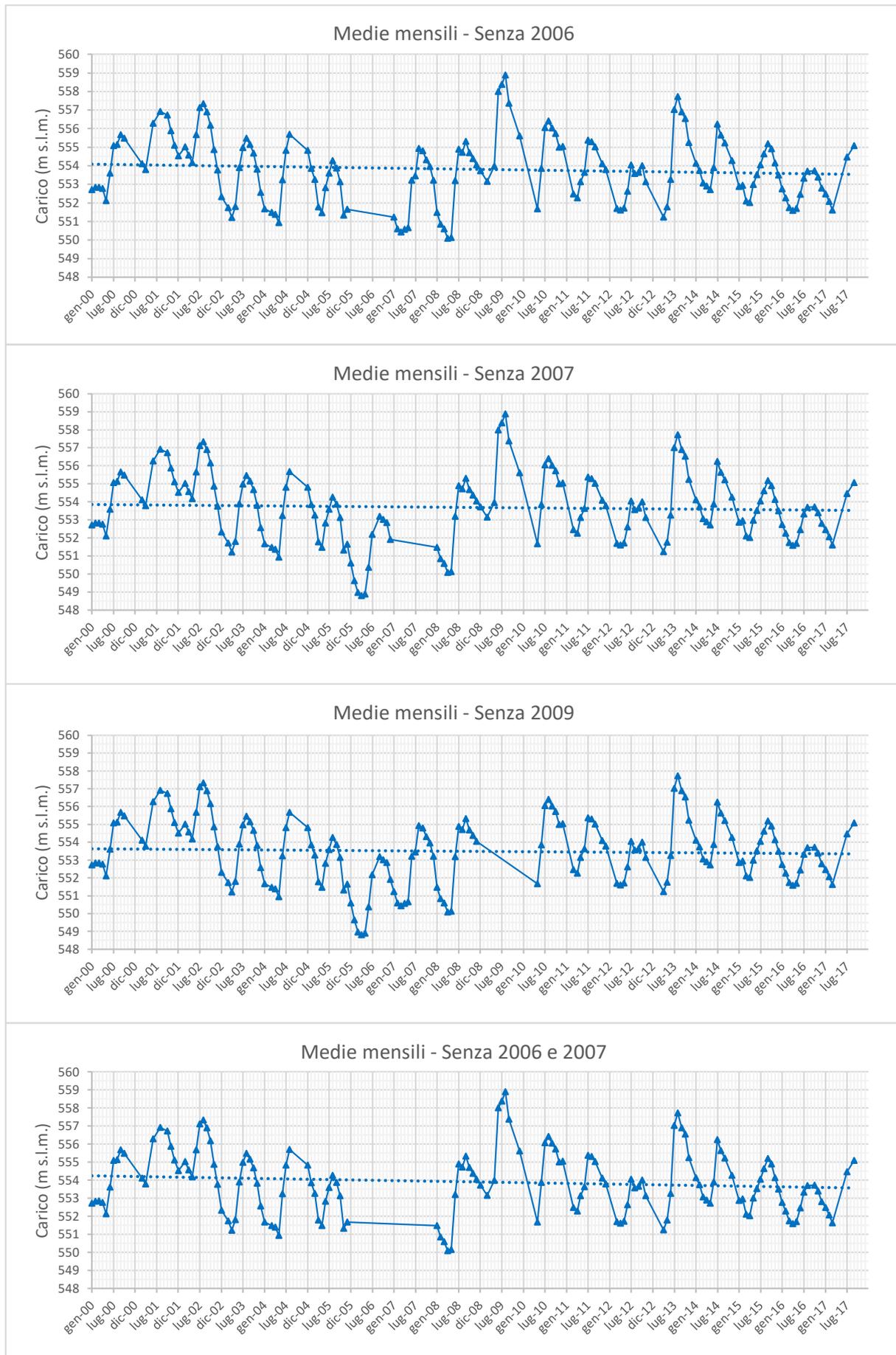
Questo può significare che eventuali tendenze, con pendenze anche accentuate, potrebbero non essere individuate dal test che, a favore della robustezza statistica, non permetterebbe di rifiutare l'ipotesi nulla portando a giudicare non significativo il trend.

Riguardo il confronto tra serie completa e serie composta dalle medie mensili si riconferma quanto suggerito in fase di analisi delle tendenze a scala puntuale, con una maggior significatività della serie mediata e quindi caratterizzata da una maggior omogeneità nella distribuzione dei dati (cfr. capitolo 6.2.3).

Tramite questo primo confronto si può ipotizzare che una serie di buona lunghezza non porti a sovrastimare la tendenza in funzione della frequenza di monitoraggio, in quanto al diminuire del numero di misure si riduce la significatività del test e quindi risulterà più difficile rifiutare l'ipotesi nulla. Pertanto, anche in caso di pendenza alterata dalla limitata composizione del dataset, il numero di misure su cui viene valutata la significatività porterà ad un giudizio di stabilità della tendenza su lungo periodo evitando una eventuale erronea attribuzione di stato quantitativo scarso.

La sottostima della significatività del trend non dovrebbe invece costituire un problema essenziale, in quanto le linee guida indicano che, in caso di trend stazionario o in crescita, la procedura prosegua con l'analisi di bilancio idrico attraverso la quale si approfondisce l'indagine permettendo di discriminare con più precisione lo stato quantitativo delle acque sotterranee.

9.1.2 Continuità delle serie storiche



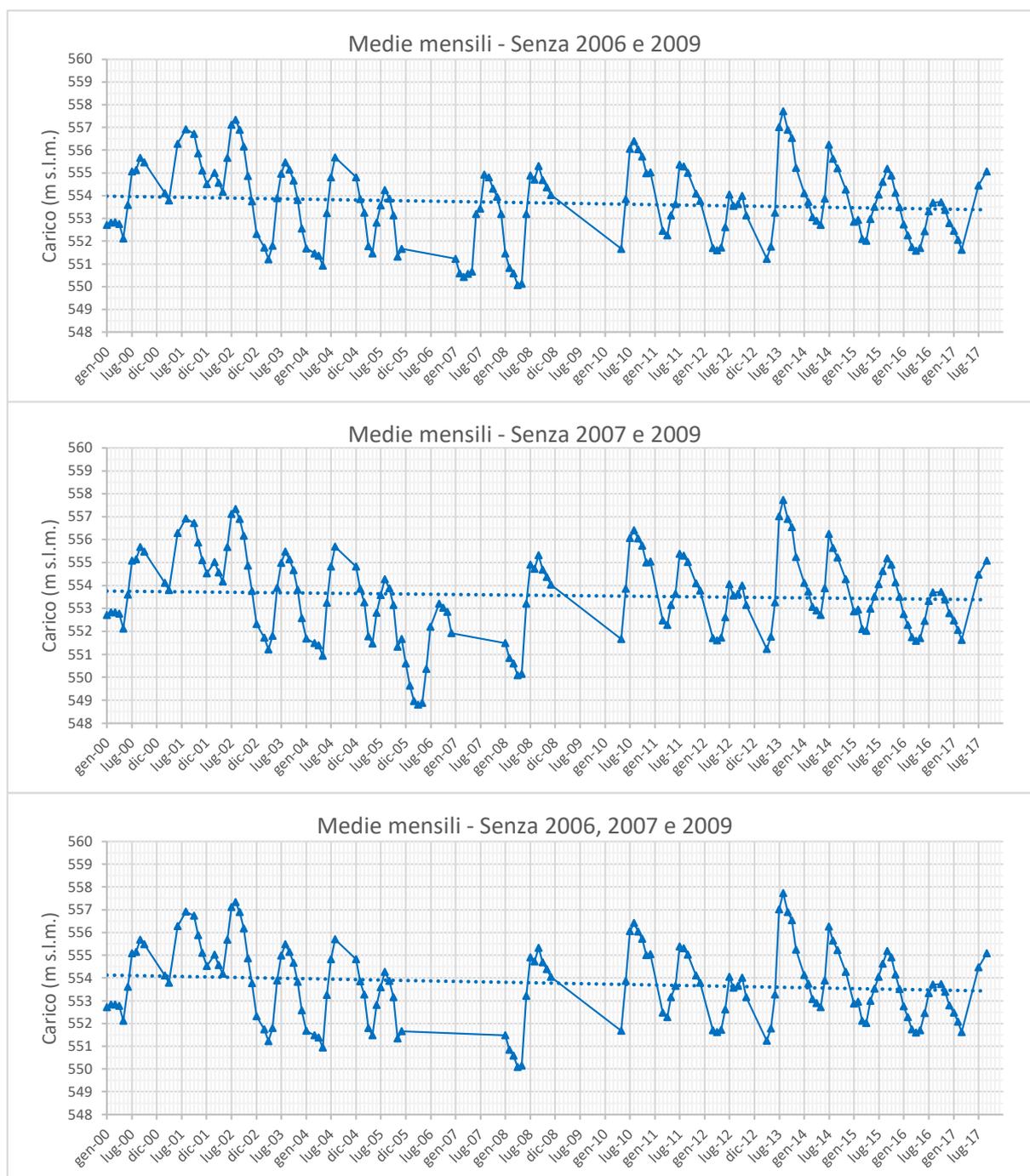


Figura 9.6: Piezometrie 2000-2017 di Ao32 con differenti combinazioni di dati mancanti dal dataset, corrispondenti alle misure del 2006 (minimo piezometrico pluriennale), 2007, 2009 (massimo piezometrico pluriennale) e loro combinazioni (medie mensili)

A titolo esemplificativo sono stati inseriti i soli grafici ottenuti dai dataset costituiti dalle medie mensili in quanto più rappresentativi graficamente.

I test sono stati eseguiti per ogni combinazione per ogni frequenza di monitoraggio e sono riportati in *Tabella 9.2*.

Dataset	Serie	Dati	Pendenza	S	p-value	Trend
Medie mensili	Totale	173	-3.5763E-05	-721	0.1720	No
	Senza 2006	162	-8.4768E-05	-1092	0.0570	No
	Senza 2007	161	-4.9498E-05	-904	0.0934	No
	Senza 2009	165	-4.6065E-05	-844	0.1170	No
	Senza 2006 e 2007	150	-1.0266E-04	-1198	0.0259	Negativo
	Senza 2006 e 2009	154	-9.2678E-05	-1129	0.0390	Negativo
	Senza 2007 e 2009	153	-5.8365E-05	-959	0.0653	No
	Senza 2006, 2007 e 2009	142	-1.0896E-04	-1167	0.0199	Negativo
6 misure/anno	Totale	107	-8.1652E-05	-386	0.1500	No
	Senza 2006	101	-1.2295E-04	-487	0.0769	No
	Senza 2007	101	-9.5075E-05	-438	0.0999	No
	Senza 2009	101	-9.0077E-05	-402	0.1200	No
	Senza 2006 e 2007	95	-1.3950E-04	-523	0.0466	Negativo
	Senza 2006 e 2009	95	-1.2954E-04	-469	0.0662	No
	Senza 2007 e 2009	95	-1.0242E-04	-430	0.0839	No
	Senza 2006, 2007 e 2009	89	-1.4496E-04	-481	0.0445	Negativo
4 misure/anno	Totale	72	-5.0934E-05	-117	0.2860	No
	Senza 2006	68	-9.3565E-05	-169	0.1870	No
	Senza 2007	68	-6.5948E-05	-148	0.2180	No
	Senza 2009	68	-5.9536E-05	-138	0.2340	No
	Senza 2006 e 2007	64	-1.1199E-04	-194	0.1320	No
	Senza 2006 e 2009	64	-1.0013E-04	-174	0.1580	No
	Senza 2007 e 2009	64	-7.3308E-05	-157	0.1830	No
	Senza 2006, 2007 e 2009	60	-1.1724E-04	-187	0.1180	No
2 misure/anno	Totale	36	-1.0029E-04	-35	0.3220	No
	Senza 2006	34	-1.4810E-04	-46	0.2520	No
	Senza 2007	34	-1.1501E-04	-38	0.2920	No
	Senza 2009	34	-1.0911E-04	-36	0.3020	No
	Senza 2006 e 2007	32	-1.6657E-04	-47	0.2280	No
	Senza 2006 e 2009	32	-1.5466E-04	-43	0.2480	No
	Senza 2007 e 2009	32	-1.2246E-04	-37	0.2800	No
	Senza 2006, 2007 e 2009	30	-1.7170E-04	-42	0.2320	No

Tabella 9.2: Statistiche delle serie 2000-2017 con elementi di discontinuità

La presenza di discontinuità all'interno delle serie mostra un'accentuata influenza nella determinazione della pendenza della retta di regressione. In particolare risulta evidente che la mancanza delle misure riferite al 2006 e/o al 2009, che costituiscono rispettivamente il periodo di massimo esaurimento della risorsa idrica e di massima ricarica su scala pluriennale, alterano in maniera molto marcata la regressione lineare.

Alterazione che però non pare subire influenza significativa da parte della frequenza di monitoraggio. Infatti, a prescindere dalla risoluzione della serie, in tutti i casi si riscontra lo stesso tipo di variazione della pendenza.

Riguardo la significatività del trend invece, emerge con maggiore evidenza l'importanza della numerosità campionaria nella risposta del test di Mann-Kendall e quindi della possibilità di giudicare significativo una tendenza.

Con misurazioni a cadenza trimestrali o inferiori infatti non viene giudicata significativa nessuna delle tendenze che con frequenze superiori invece vengono identificate come discendenti e porterebbero quindi ad un giudizio di stato quantitativo scarso.

Prendendo come esempio la serie costituita da misure mensili in mancanza di dati relativi al 2006 e al 2007 riscontriamo un coefficiente angolare della retta di regressione di circa 10^{-4} . Un valore quasi identico lo si ottiene, con una frequenza di 6 misure all'anno, nella serie privata del 2007 e del 2009. Tuttavia nel primo caso, con una popolazione di 150 misure, il test di Mann-Kendall conferma l'esistenza di un trend discendente, mentre nel secondo caso, con 95 misure, risulta non significativo.

Osservando la stessa serie priva del 2006 e del 2007 per entrambe le frequenze campionarie, il trend risulta rilevante anche per la serie costituita da misure semestrali, ma a fronte di un leggero aumento della pendenza che tuttavia resta confrontabile e accomunabile a quello ottenuto con le misure mensili.

Con frequenze inferiori invece, in nessuno dei casi valutati viene giudicata rigettabile l'ipotesi di stazionarietà, anche a fronte di pendenze più elevate. Per esempio, nella stessa serie privata del 2006 e del 2007 ma ottenuta con frequenza trimestrale e che conta 64 misure, il coefficiente angolare è pressoché uguale, circa 10^{-4} , ma il trend non viene identificato.

Anche per pendenze maggiori, con bassa popolazione campionaria, la significatività della tendenza viene rifiutata. La serie priva del 2006, 2007 e 2009 ottenuta con frequenza di 2 misure all'anno per esempio presenta la pendenza maggiore nel gruppo considerato, ma nonostante ciò non è sufficiente a confermare la tendenza discendente.

Da questa analisi emerge dunque in primo luogo l'importanza della completezza della serie storica nella valutazione dei livelli di falda su lungo periodo. Da un lato, il mancato monitoraggio di alcuni periodi potrebbe nascondere periodi di minimo o massimo livello piezometrico e quindi l'abbassamento e la risalita della tavola d'acqua, con conseguente erronea interpretazione dell'evoluzione della falda nel tempo, dall'altro modifica in modo significativo la retta di regressione interpretando erroneamente l'evoluzione reale che ha subito la falda.

In secondo luogo, si sottolinea nuovamente la necessità di mantenere una frequenza di campionamento elevata per migliorare la significatività del test di Mann-Kendall oltre che per ottenere rappresentazioni grafiche più fedeli e una maggior risoluzione temporale della piezometria.

9.1.3 Lunghezza delle serie storiche

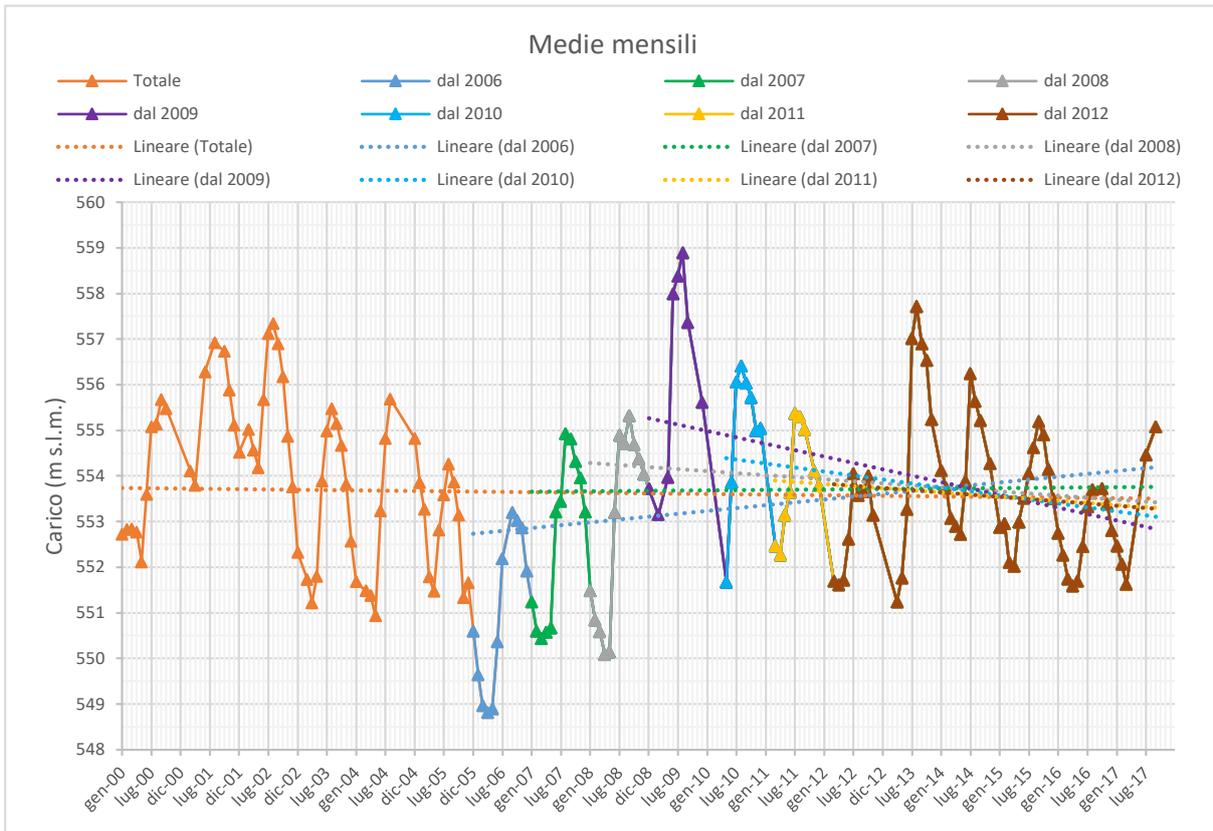


Figura 9.7: Confronto tra serie di Ao32 di lunghezza diversa con dataset costituito da misure mensili

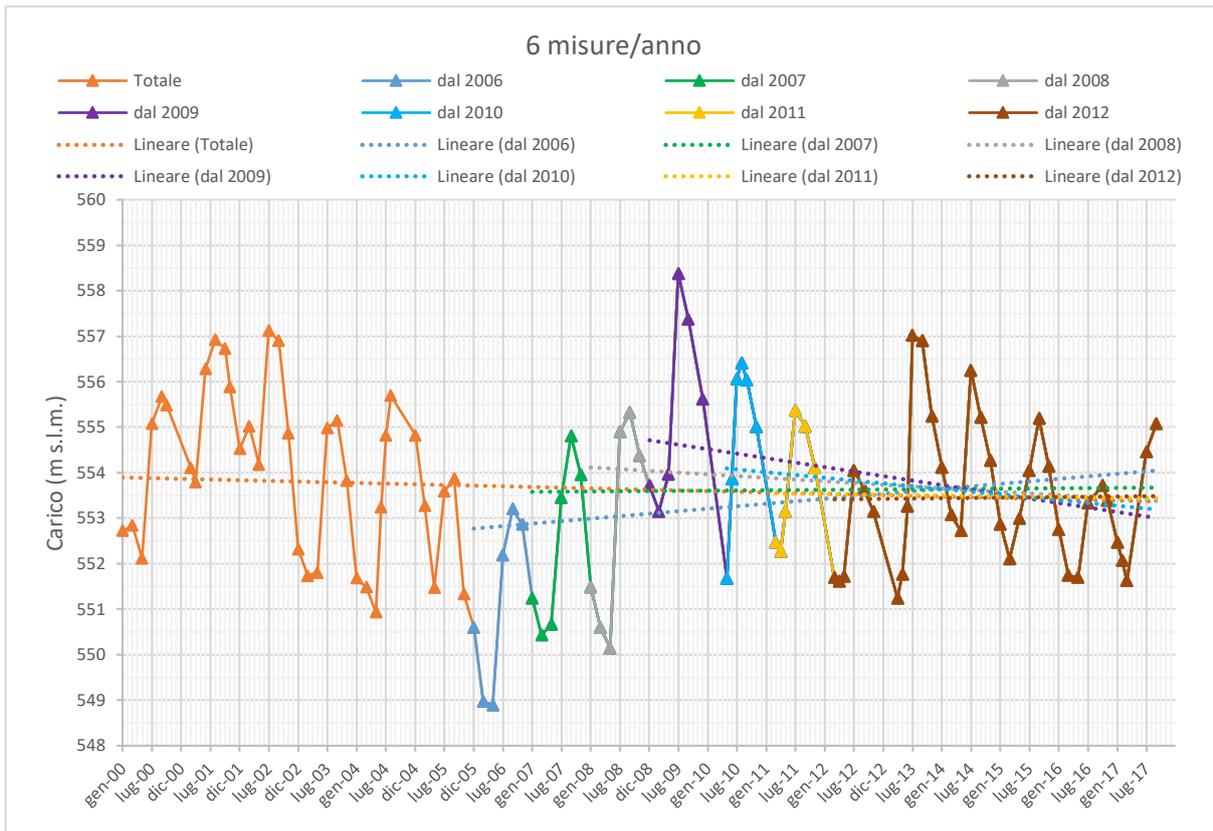


Figura 9.8: Confronto tra serie di Ao32 di lunghezza diversa con dataset costituito da 6 misure/anno

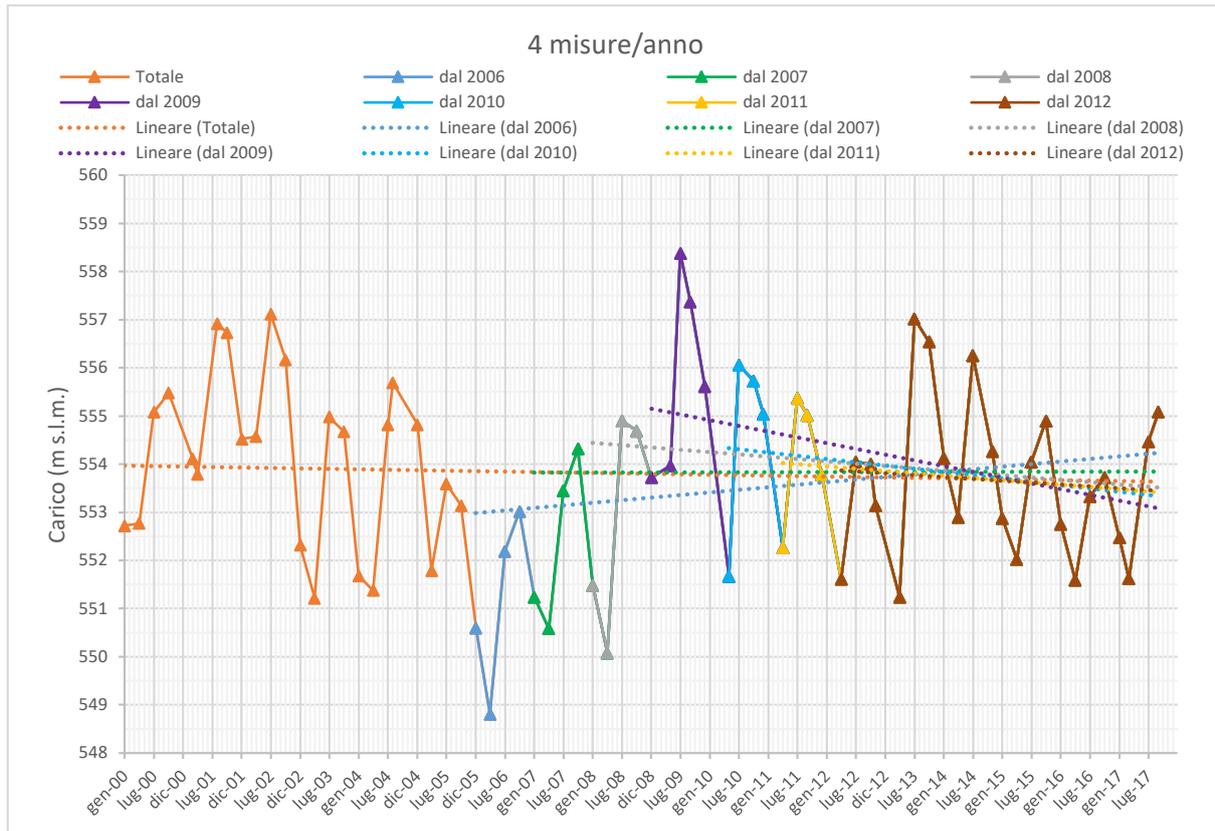


Figura 9.9: Confronto tra serie di Ao32 di lunghezza diversa con dataset costituito da 4 misure/anno

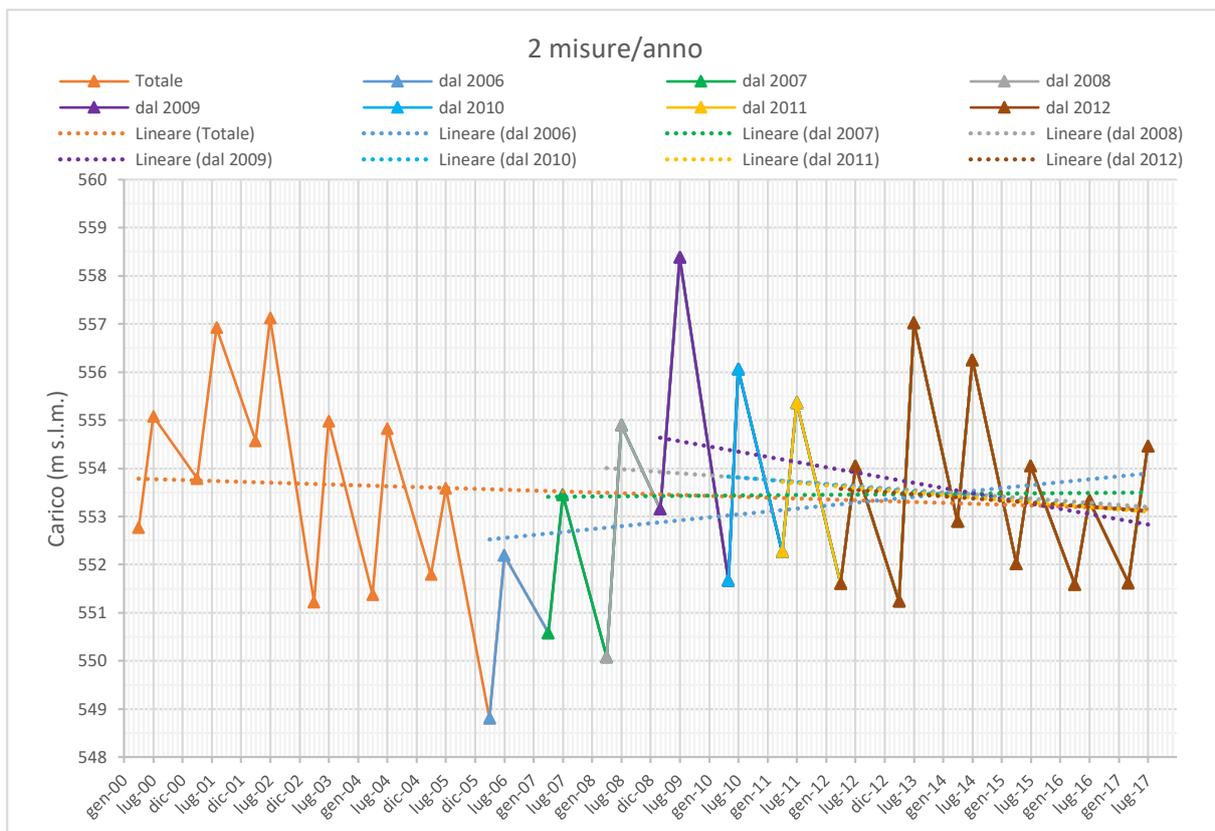


Figura 9.10: Confronto tra serie di Ao32 di lunghezza diversa con dataset costituito da 2 misure/anno

Dataset	Serie	Dati	Pendenza	S	p-value	Trend
Medie mensili	Totale	173	-3.5763E-05	-721	0.1720	No
	2006-2017	115	3.4191E-04	720	0.0411	Positivo
	2007-2017	104	2.5197E-05	-127	0.3620	No
	2008-2017	92	-2.4435E-04	-525	0.0386	Negativo
	2009-2017	80	-7.6612E-04	-786	0.0006	Negativo
	2010-2017	72	-4.7898E-04	-455	0.0137	Negativo
	2011-2017	64	-2.5474E-04	-201	0.1230	No
2012-2017	55	-2.6695E-04	-111	0.2120	No	
6 misure/anno	Totale	107	-8.1652E-05	-386	0.1500	No
	2006-2017	71	2.9943E-04	255	0.1040	No
	2007-2017	65	2.6493E-05	-2	0.4980	No
	2008-2017	59	-2.0803E-04	-152	0.1620	No
	2009-2017	53	-5.4212E-04	-241	0.0328	Negativo
	2010-2017	47	-3.3771E-04	-113	0.1520	No
	2011-2017	41	-4.4754E-05	-14	0.4420	No
2012-2017	35	3.2827E-05	11	0.4440	No	
4 misure/anno	Totale	72	-5.0934E-05	-117	0.2860	No
	2006-2017	48	3.2781E-04	124	0.1370	No
	2007-2017	44	4.7955E-05	-2	0.4960	No
	2008-2017	40	-2.1916E-04	-83	0.1700	No
	2009-2017	36	-6.1760E-04	-134	0.0350	Negativo
	2010-2017	32	-3.7866E-04	-81	0.0972	No
	2011-2017	28	-2.9560E-04	-41	0.2150	No
2012-2017	24	-3.0980E-04	-23	0.2930	No	
2 misure/anno	Totale	36	-1.0029E-04	-35	0.3220	No
	2006-2017	24	3.3416E-04	37	0.1860	No
	2007-2017	22	2.4220E-05	8	0.4220	No
	2008-2017	20	-2.3700E-04	-9	0.3980	No
	2009-2017	18	-5.9342E-04	-20	0.2360	No
	2010-2017	16	-2.7382E-04	-5	0.4280	No
	2011-2017	14	-2.7261E-04	-2	0.4780	No
2012-2017	12	-2.4333E-04	3	0.4450	No	

Tabella 9.3: Statistiche delle serie con differenti lunghezze e risoluzioni

La durata delle serie storiche condiziona i risultati della valutazione dei trend sotto diversi aspetti.

Il più evidente ed influente è sicuramente quello relativo alla retta di regressione, il cui andamento può cambiare molto in funzione del periodo in cui si fa iniziare la serie storica, arrivando anche a variare tra positivo e negativo. Si tratta di una conseguenza intuitiva, in quanto a seconda della lunghezza della serie la valutazione può essere fatta su periodi di sola crescita così come di sola diminuzione.

Maggiore è la lunghezza della serie storica, minore è l'influenza della crescita o del calo della falda in quanto le variazioni si mediano. Questo è un aspetto importante, sottolineato anche nelle linee guida, che evidenzia la necessità di utilizzare serie lunghe per ridurre l'influenza dei naturali periodi umidi o siccitosi.

Come risulta particolarmente evidente dalle serie relative al dataset composto da misure mensili (Figura 9.7 e Tabella 9.3), valutando solamente il periodo successivo al 2009, dal momento che la serie parte da un massimo piezometrico, il trend risulta negativo. Valutando invece

il periodo dal 2006, che presenta una crescita repentina nel primo periodo, il trend risulta positivo. L'effetto viene comunque mediato allungando la serie oltre questi anni, restituendo un trend non significativo.

Il secondo aspetto che influenza l'esito dei test è, anche in questo caso, la frequenza campionaria e, di conseguenza, la numerosità del campione utilizzato. Esaminando i coefficienti angolari delle rette di regressione infatti si può notare che per durate analoghe le pendenze sono confrontabili. Questo significa che l'andamento della serie è stimato adeguatamente con tutte le frequenze utilizzate. Tuttavia, come evidenziato anche nel paragrafo precedente, il numero di misure che permette di ottenere la pendenza è il discriminante per la significatività del test.

Utilizzando misure a cadenza mensile, il test risponde bene individuando il trend ascendente per il periodo 2006-2017 e i trend discendenti per i periodi 2008-2017, 2009-2017 e 2010-2017.

Riducendo la frequenza campionaria a 6 o 4 misure all'anno (*Figura 9.8 e Figura 9.9*) tuttavia i trend non risultano più significativi, ad eccezione di quello identificato nella serie 2009-2017 la cui pendenza è fortemente accentuata. Il p-value della statistica di Mann-Kendall è quasi identica in questi due casi (0.328 per la frequenza semestrale, 0.350 per la frequenza trimestrale), ma risulta notevolmente superiore rispetto a quello ottenuto con misure mensili (0.0006) che presenta quindi una robustezza statistica decisamente maggiore.

Utilizzando solo 2 misure all'anno (*Figura 9.10*) non viene invece identificata alcuna tendenza, sottolineando che una frequenza di monitoraggio tanto ridotta è inadeguata a descrivere efficacemente la tendenza della falda tanto su lungo periodo quanto su breve termine.

Infine, nell'ottica di un'analisi su più pozzi, risulta evidente la necessità di utilizzare serie di lunghezza analoga per tutte le stazioni al fine di ottenere risultati confrontabili. Calcolando i trend riferiti a lunghezze diverse del periodo infatti, questi sarebbero connotati da un'estrema variabilità dovuta semplicemente al periodo di riferimento e non rappresentativa della situazione reale con conseguente mancanza di significatività di un'analisi estesa a livello areale.

9.1.4 Distanza delle serie storiche

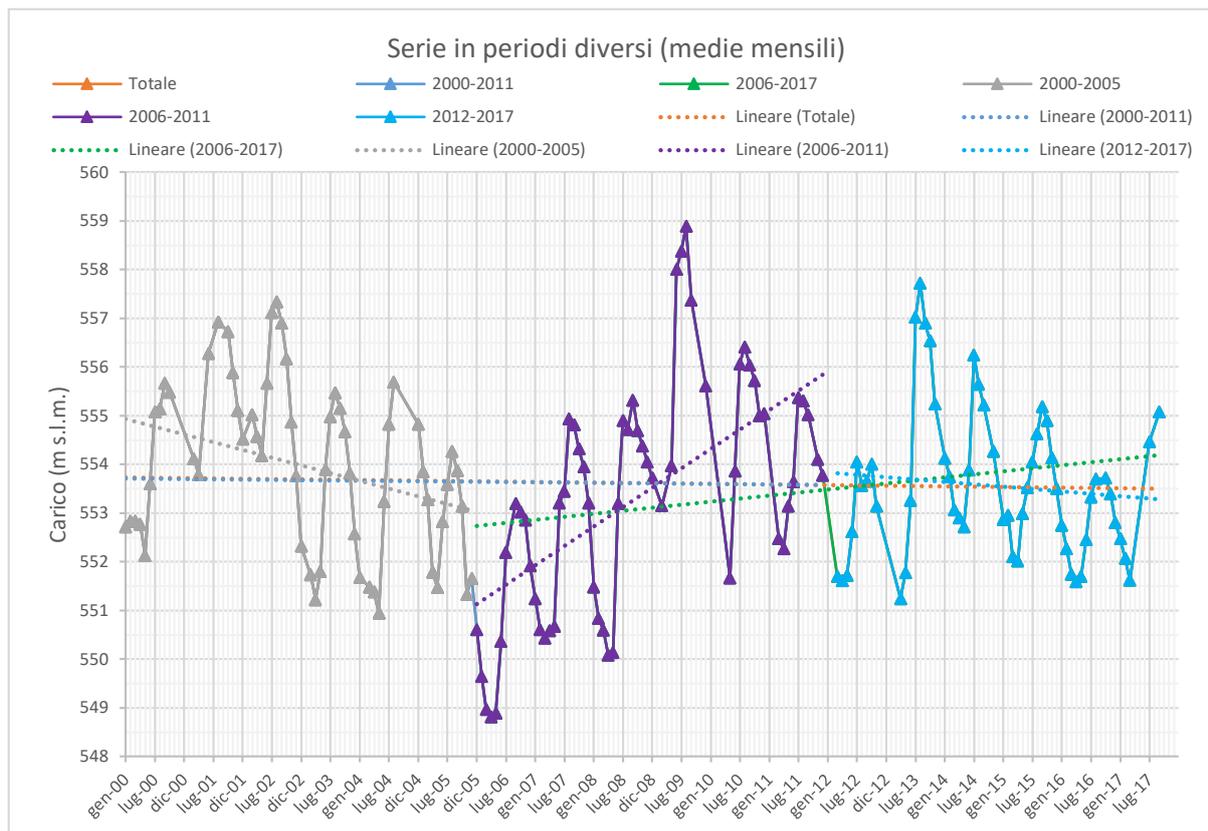


Figura 9.11: Confronto tra serie di Ao32 riferite a periodi diversi con dataset costituito da misure mensili

Serie	Dati	Pendenza	S	p-value	Trend
Totale	173	-3.5763E-05	-721	0.1720	No
2000-2011	118	-3.1499E-05	-201	0.3210	No
2006-2017	115	3.4191E-04	720	0.0411	Positivo
2000-2005	58	-8.6926E-04	-387	0.0048	Negativo
2006-2011	60	2.1796E-03	755	0.0000	Positivo
2012-2017	55	-2.6695E-04	-111	0.2120	No

Tabella 9.4: Statistiche delle serie riferite a periodi diversi

Questa analisi, strettamente legata alla precedente, punta ad evidenziare l'errore associato a serie storiche riferite a periodi diversi e distanti temporalmente dal periodo recente.

Sono state utilizzate le sole serie costituite da misure mensili in quanto caratterizzate da una risoluzione maggiore e adatta ad identificare con maggior precisione le variazioni che accompagnano periodi di riferimento differenti. Come illustrato precedentemente, la densità delle misure non influisce marcatamente sulla pendenza delle rette di regressione ma è di fondamentale importanza per definirne la significatività statistica, pertanto è stato scelto il dataset più rilevante.

Il fattore principale che determina la scelta del periodo di riferimento è la rappresentatività dell'analisi rispetto alla situazione reale e, soprattutto, attuale.

Un'analisi rivolta ad un periodo remoto è rappresentativa del solo intervallo di riferimento, dunque non può fornire informazioni affidabili sull'evoluzione della falda precedente o successiva. Questo aspetto viene messo particolarmente in luce dalle rette di regressione dei 3 periodi di 6 anni utilizzati: 2000-2005, 2006-2011 e 2012-2017.

Nel primo sessennio si ha un forte pendenza negativa, che ha infatti portato al minimo piezometrico pluriennale del 2006. Di contro, successivamente si è avuta una repentina risalita con massimo nel 2009, a sua volta seguito da un calo dei livelli graduale che si è poi fermato su livelli medi negli anni successivi.

Questo viene evidenziato dai test statistici (*Tabella 9.4*) che infatti attribuiscono tendenza negativa al periodo 2000-2005, tendenza positiva al 2006-2011 e stabilità al 2012-2017.

Confrontando questi risultati con il trend sull'intero periodo 2000-2018 è evidente come siano inadatti a fornire informazioni riguardanti la tendenza su lungo periodo e comprensiva degli anni più recenti.

Se infatti, per esempio, potessimo solo riferirci al periodo 2000-2006 attribuiremmo erroneamente una valutazione di stato quantitativo scarso alla risorsa idrica senza tener conto della risalita successiva e della generale situazione di stabilità che emerge invece dalla visione complessiva dei 18 anni.

Analogamente, se ci limitassimo a considerare il periodo 2006-2011, vedremmo una situazione di forte ricarica della falda, con attribuzione di tendenza positiva che tuttavia non illusterebbe la successiva e graduale diminuzione.

Utilizzando serie da 12 anni, rispettivamente tra il 2000 e il 2011 e tra il 2006 e il 2017, si può notare che anch'esse non sono confrontabili. La serie remota infatti fornisce un quadro di stabilità della falda, ma gli ultimi 12 anni nel complesso hanno invece visto una risalita dei livelli piezometrici, confermata dalla significatività del trend restituita dalla statistica di Mann-Kendall.

Questo conferma quindi la necessità di riferirsi al periodo recente per avere una valutazione significativa ed attuale, rendendo di fatto inutile o perfino erronea un'analisi delle tendenze su periodi remoti.

9.2 Valutazione della stagionalità nella piana di Aosta

L'analisi delle serie storiche effettuata nell'ambito della valutazione della tendenza dei livelli piezometrici su lungo periodo, attuata durante il Test 1, ha messo in evidenza una stagionalità della falda che identifica generalmente il periodo di carico minimo nei mesi primaverili e il periodo di carico massimo nei mesi estivi.

Tuttavia, ad un esame più approfondito, si possono individuare differenze tra le serie, ed in particolare uno sfasamento di questi periodi che tendono ad essere via via anticipati da ovest verso est.

Dal momento che per una rappresentazione fedele delle fluttuazioni di carico idraulico nel corso dell'anno e su più anni è necessario disporre dei valori estremi del livello piezometrico, come indicato dalle linee guida sia nell'ambito della valutazione delle tendenze che nell'ambito del monitoraggio successivo, è stata studiata la stagionalità della falda per individuare i periodi corrispondenti e dividere la piana in aree coerenti.

Per raggiungere questo risultato i dati di alcuni piezometri selezionati sono stati organizzati in funzione del mese e riportati in grafici box-plot in modo da ottenere un anno medio rappresentativo delle fluttuazioni della falda a scala locale. Le informazioni sono quindi state cartografate e spazializzate.

Il fine è stato quello di creare delle carte che identificassero delle zone in funzione dei mesi in cui si registrano la massima ricarica ed il minimo esaurimento, così da essere di supporto nella definizione dei piani di monitoraggio e nella calendarizzazione delle campagne di rilevamento.

9.2.1 Selezione dei dataset

Per questa analisi è necessario che le serie di dati permettano di ricostruire dei livelli medi della falda per ogni mese, così da valutare le oscillazioni che essa subisce in un anno medio di riferimento.

La selezione delle serie storiche significative per questa analisi è stata quindi effettuata riorganizzando i dataset in funzione del mese in modo tale da identificare le stazioni di monitoraggio che presentassero almeno 2 misure in ognuno dei 12 mesi dell'anno.

La selezione ha permesso di escludere tutte le serie che non fossero in grado di descrivere l'anno nella sua interezza, ottenendo un set di 32 punti di monitoraggio per la descrizione della piana.

La distribuzione dei questi punti, come accaduto per quelli selezionati precedentemente per la valutazione delle tendenze, è maggiormente concentrata nella zona di Aosta ma con alcuni piezometri rappresentativi anche per Pollein, Saint-Christophe, Quart, Brissogne e Pontey.

Mancano serie adeguate a descrivere le caratteristiche della piana occidentale, da Jovencan verso monte, e nella zona centro-orientale della piana tra Brissogne e Pontey, ma le condizioni all'intorno permettono comunque di identificare un ragionevole pattern nella distribuzione dei periodi, come verrà illustrato più avanti.

9.2.2 Identificazione degli outliers

Ogni dataset così organizzato è quindi suddiviso in 12 popolazioni campionarie corrispondenti ai mesi dell'anno.

Per ogni popolazione sono stati calcolati gli indici statistici di posizione per identificare eventuali outliers, con un procedimento analogo a quello applicato durante l'analisi delle tendenze:

- Primo quartile (Q_1), corrispondente al valore che delimita il 25% minore delle misure;
- Terzo quartile (Q_2), corrispondente al valore che delimita il 25% maggiore delle misure;
- Range interquartile (IQR), pari alla differenza tra primo e terzo quartile;
- Limite inferiore, corrispondente al primo quartile, meno una volta e mezzo l'IQR

$$\text{Limite inferiore} = Q_1 - 1.5 * IQR$$

- Limite superiore, corrispondente al terzo quartile, più una volta e mezzo l'IQR

$$\text{Limite superiore} = Q_3 + 1.5 * IQR$$

Attraverso il confronto di ogni misura con i limiti superiore e inferiore relativi alla propria popolazione campionaria sono stati identificati i valori distanti e le serie sono state ripulite dagli outliers.

9.2.3 Costruzione dell'anno medio di riferimento

I dataset ripuliti dagli outliers sono stati utilizzati per definire gli indici statistici per ogni mese, necessari alla definizione dell'anno medio di riferimento per ognuno dei punti considerati:

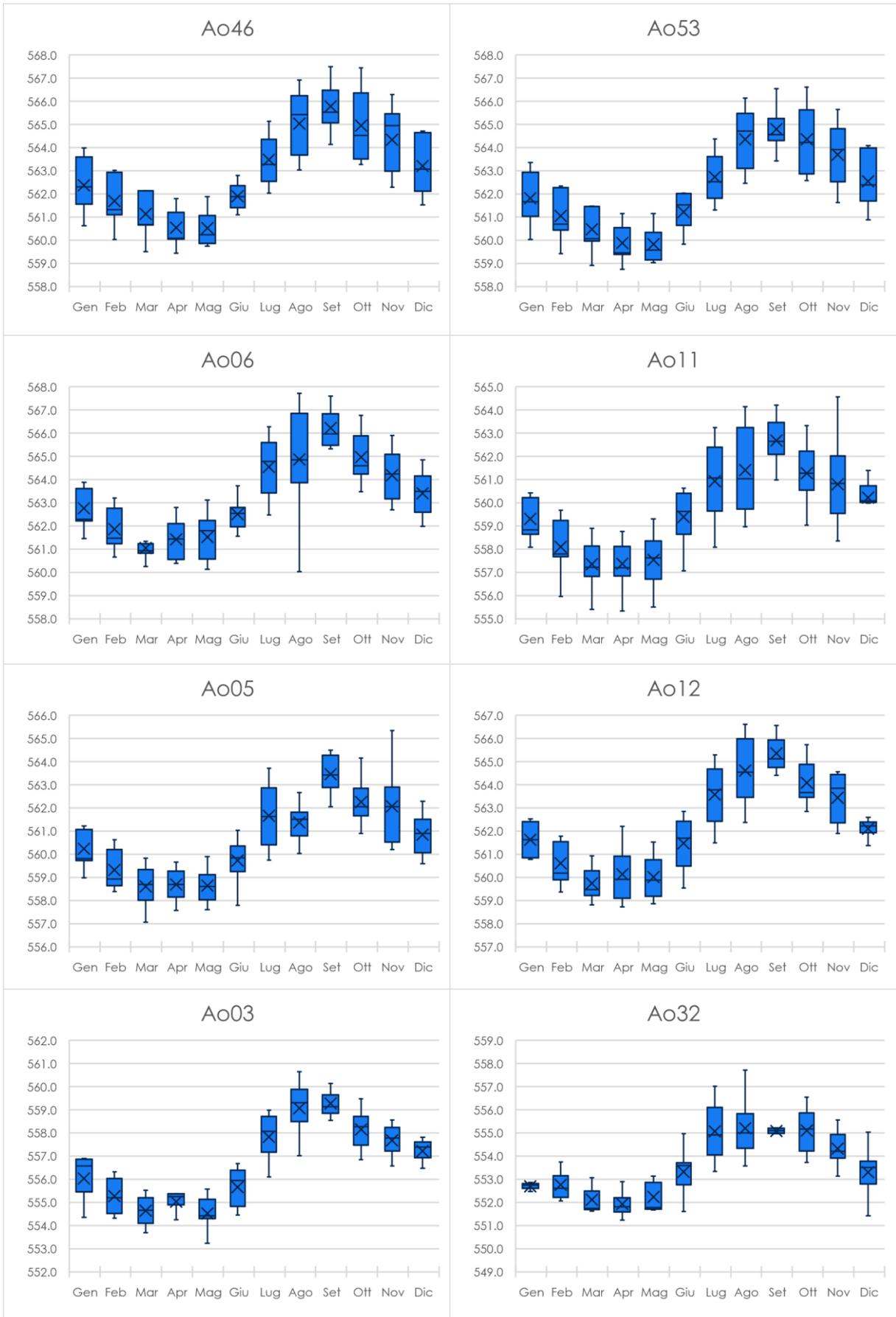
- Minimo;
- Massimo;
- Range;
- Media;
- Mediana;

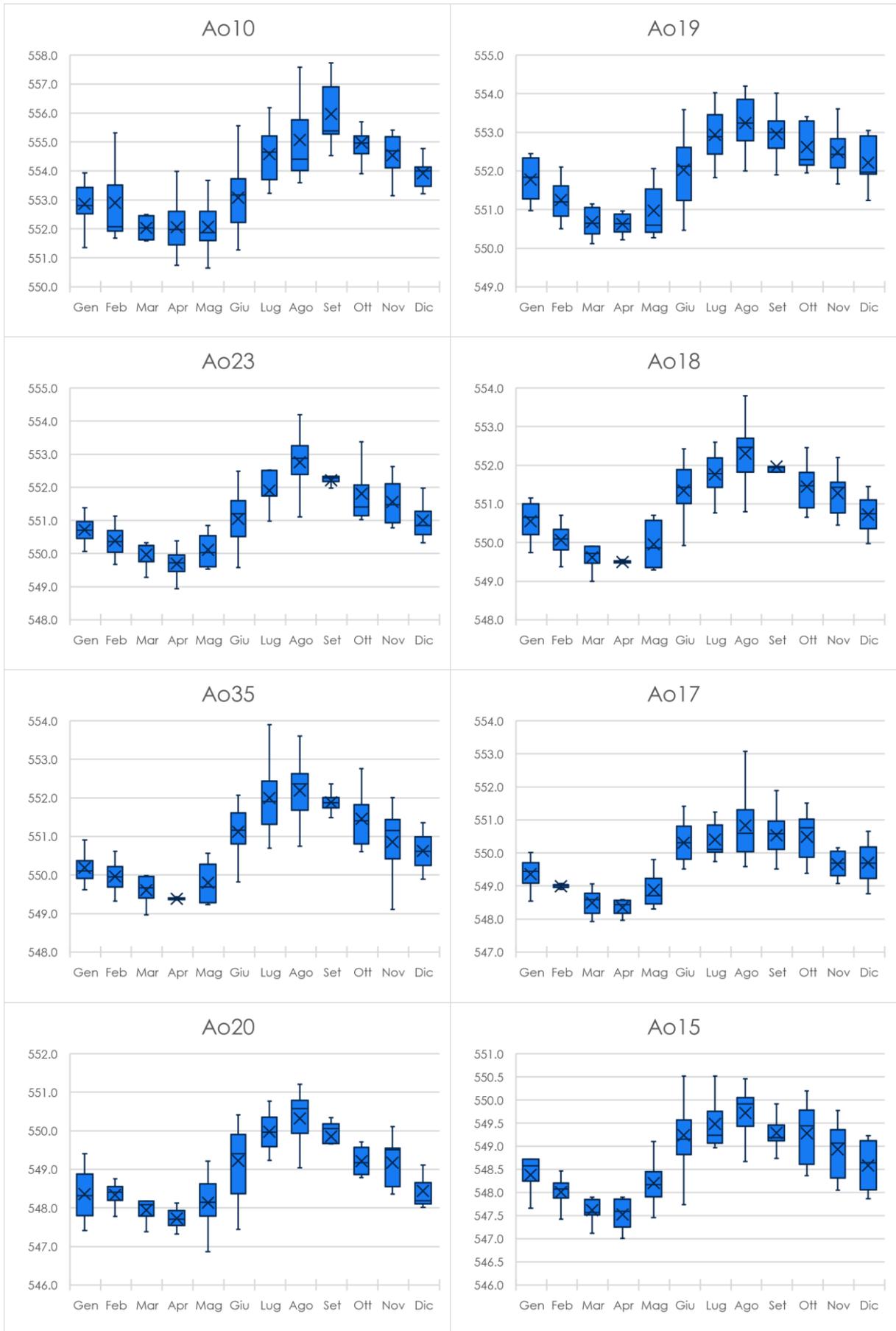
Attraverso la realizzazione di grafici box-plot per ogni stazione di monitoraggio è stata rappresentata la dinamica piezometrica annuale dell'anno medio di riferimento per permettere una valutazione visiva ed intuitiva delle fluttuazioni (*Figura 9.12, Figura 9.13, Figura 9.14, Figura 9.15, Figura 9.16 e Figura 9.17*).

L'asse delle ordinate non è stato plottato allo stesso range per tutti i punti, ma è definito in funzione di ogni dataset per rendere più agevole il confronto tra i livelli mensili all'interno della serie stessa.

Con il confronto tra i livelli medi di ogni mese per ogni dataset (*Tabella 9.5*) è stato possibile individuare e quantificare i periodi di minimo e di massimo livello piezometrico e valutare le differenze di livello tra i vari mesi.

AOSTA:





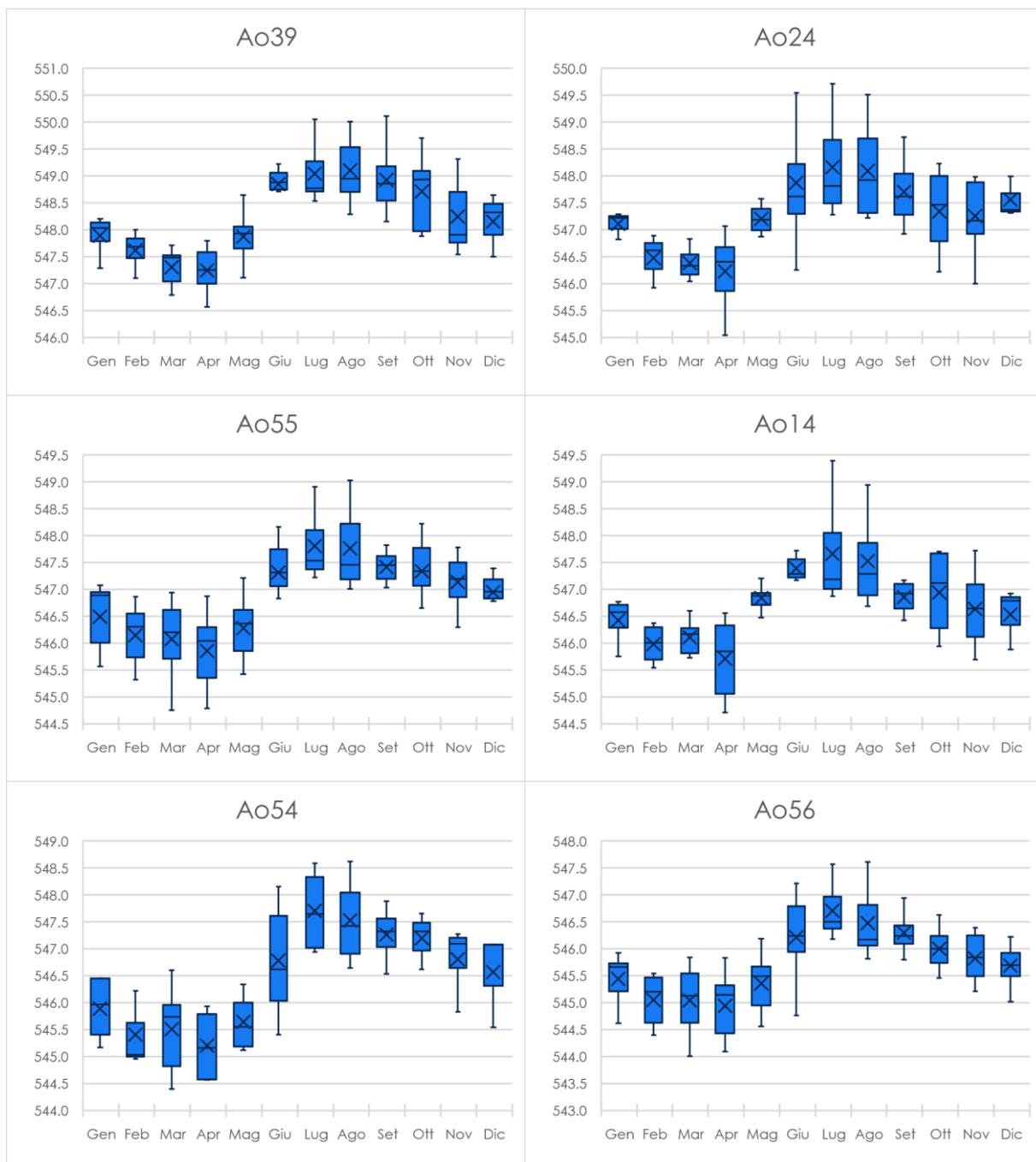


Figura 9.12: Box-plot delle misure mensili su più anni delle stazioni di monitoraggio selezionate ad Aosta

POLLEIN:

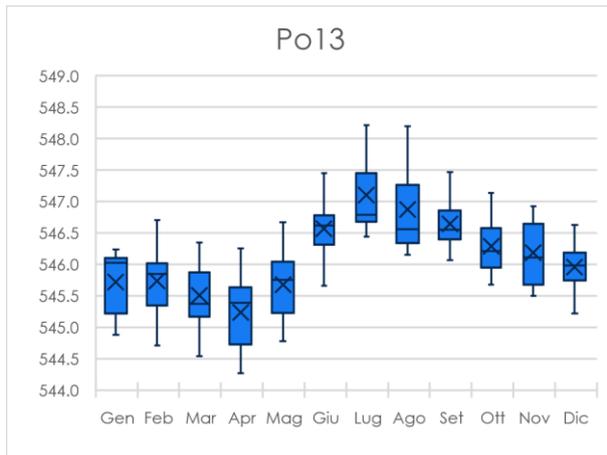


Figura 9.13: Box-plot delle misure mensili su più anni della stazione di monitoraggio selezionata a Pollein

SAINT-CHRISTOPHE:

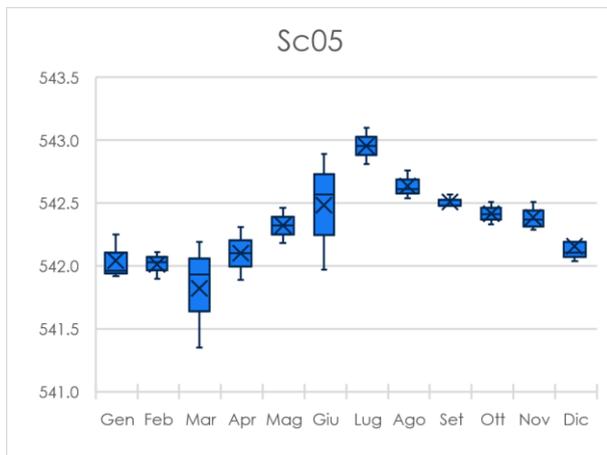


Figura 9.14: Box-plot delle misure mensili su più anni della stazione di monitoraggio selezionata a Saint-Christophe

QUART:

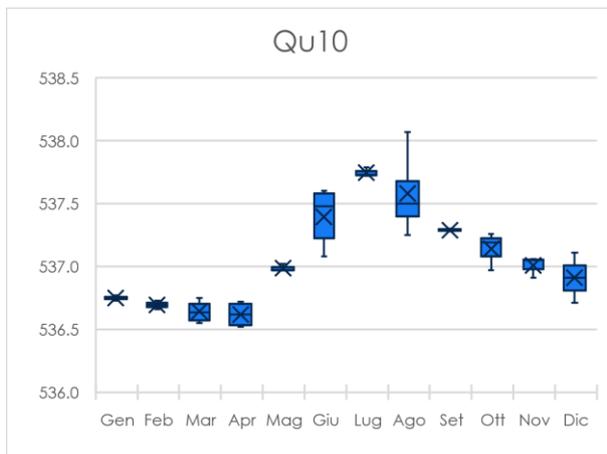


Figura 9.15: Box-plot delle misure mensili su più anni della stazione di monitoraggio selezionata a Quart

BRISOGNE:

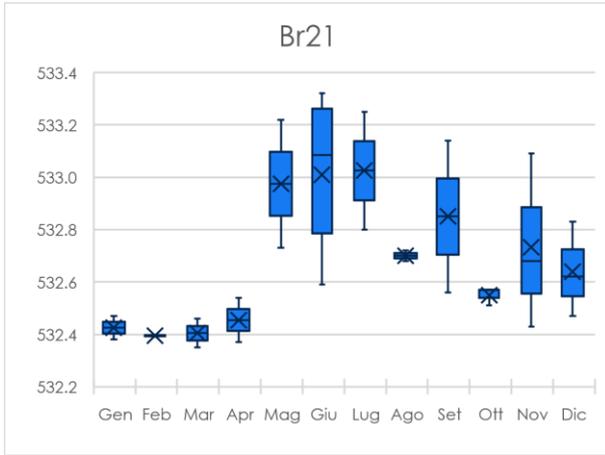
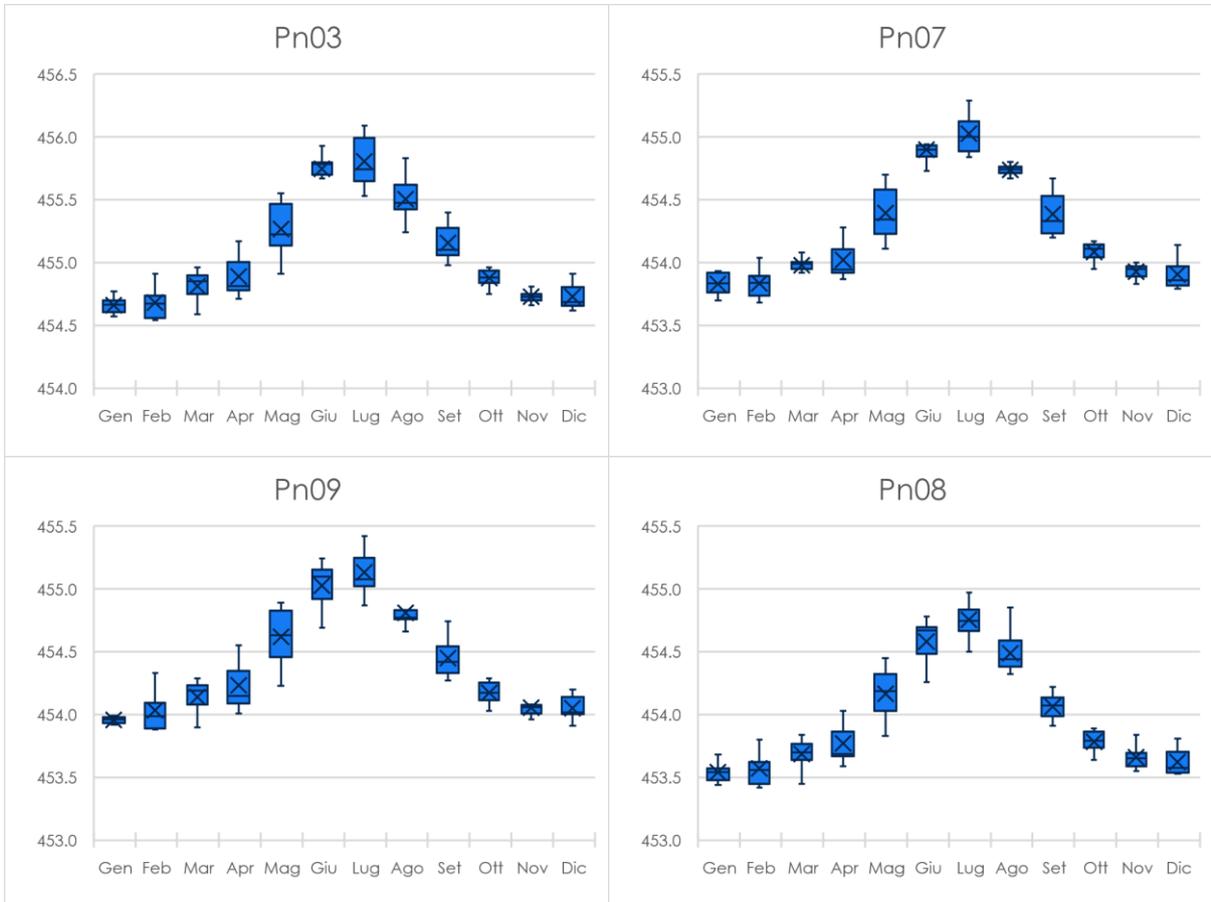


Figura 9.16: Box-plot delle misure mensili su più anni della stazione di monitoraggio selezionata a Brissogne

PONTEY:



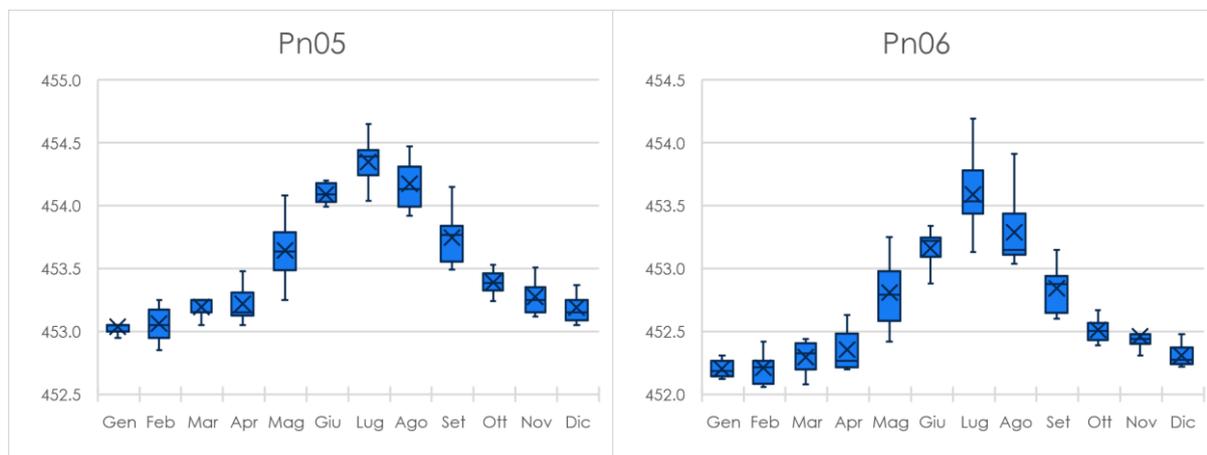


Figura 9.17: Box-plot delle misure mensili su più anni delle stazioni di monitoraggio selezionate a Pontey

Codice ente	Estremi		Valori medi mensili											
	Minimo	Massimo	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Ao46	Maggio	Settembre	562.37	561.69	561.13	560.55	560.53	561.90	563.47	565.03	565.78	564.96	564.34	563.20
Ao53	Maggio	Settembre	561.81	561.04	560.47	559.89	559.82	561.21	562.73	564.35	564.80	564.35	563.70	562.55
Ao06	Marzo	Settembre	562.76	561.86	561.05	561.42	561.52	562.51	564.55	564.86	566.22	564.98	564.19	563.40
Ao11	Marzo	Settembre	559.30	558.09	557.35	557.37	557.54	559.39	560.94	561.42	562.68	561.28	560.79	560.22
Ao05	Marzo	Settembre	560.23	559.33	558.60	558.70	558.63	559.73	561.66	561.37	563.47	562.26	562.07	560.85
Ao12	Marzo	Settembre	561.63	560.61	559.75	560.13	560.02	561.47	563.58	564.61	565.35	564.08	563.44	562.10
Ao03	Maggio	Settembre	556.03	555.28	554.64	555.03	554.53	555.67	557.84	559.07	559.28	558.16	557.68	557.23
Ao32	Aprile	Agosto	552.70	552.76	552.12	551.94	552.24	553.32	555.07	555.20	555.09	555.10	554.32	553.31
Ao10	Marzo	Settembre	552.85	552.90	552.04	552.06	552.07	553.08	554.58	555.07	555.97	554.98	554.55	553.92
Ao19	Aprile	Agosto	551.78	551.25	550.68	550.63	550.98	552.03	552.93	553.25	552.95	552.62	552.49	552.22
Ao23	Aprile	Agosto	550.71	550.38	549.97	549.69	550.11	551.05	551.90	552.76	552.22	551.81	551.56	551.00
Ao18	Aprile	Agosto	550.55	550.06	549.61	549.50	549.95	551.35	551.76	552.30	551.97	551.45	551.28	550.72
Ao35	Aprile	Agosto	550.18	549.96	549.61	549.39	549.80	551.12	552.00	552.19	551.89	551.46	550.85	550.62
Ao17	Aprile	Agosto	549.36	548.99	548.50	548.35	548.88	550.31	550.40	550.83	550.54	550.49	549.66	549.71
Ao20	Aprile	Agosto	548.36	548.34	547.94	547.72	548.14	549.22	549.98	550.33	549.86	549.22	549.17	548.44
Ao15	Aprile	Agosto	548.39	548.01	547.62	547.53	548.20	549.24	549.48	549.72	549.29	549.28	548.94	548.58
Ao39	Aprile	Agosto	547.89	547.62	547.30	547.25	547.87	548.85	549.05	549.10	548.93	548.71	548.24	548.15
Ao24	Aprile	Luglio	547.11	546.48	546.38	546.23	547.20	547.87	548.16	548.09	547.70	547.34	547.25	547.56
Ao55	Aprile	Luglio	546.49	546.14	546.07	545.86	546.28	547.31	547.80	547.76	547.42	547.34	547.13	546.95
Ao14	Aprile	Luglio	546.42	545.98	546.11	545.71	546.84	547.39	547.66	547.52	546.86	546.94	546.64	546.53
Ao54	Aprile	Luglio	545.89	545.40	545.50	545.21	545.64	546.78	547.71	547.53	547.27	547.20	546.81	546.57
Po13	Aprile	Luglio	545.72	545.74	545.50	545.23	545.68	546.57	547.10	546.87	546.64	546.29	546.18	545.96
Ao56	Aprile	Luglio	545.44	545.05	545.04	544.94	545.35	546.21	546.70	546.48	546.29	546.00	545.82	545.68
Sc05	Marzo	Luglio	542.04	542.01	541.82	542.10	542.32	542.48	542.96	542.64	542.51	542.42	542.39	542.16
Qu10	Aprile	Luglio	536.75	536.70	536.64	536.62	536.99	537.40	537.75	537.58	537.29	537.14	537.01	536.91
Br21	Febbraio	Luglio	532.43	532.40	532.41	532.46	532.98	533.01	533.03	532.70	532.85	532.55	532.73	532.64
Pn03	Gennaio	Luglio	454.66	454.68	454.81	454.89	455.27	455.75	455.81	455.51	455.16	454.88	454.73	454.73
Pn07	Gennaio	Luglio	453.83	453.83	453.98	454.02	454.39	454.90	455.03	454.74	454.38	454.09	453.93	453.91
Pn09	Gennaio	Luglio	453.96	454.03	454.14	454.23	454.62	455.03	455.13	454.81	454.45	454.17	454.05	454.05
Pn08	Gennaio	Luglio	453.54	453.57	453.69	453.77	454.17	454.58	454.75	454.49	454.06	453.78	453.66	453.62
Pn05	Gennaio	Luglio	453.04	453.06	453.19	453.22	453.64	454.09	454.35	454.18	453.75	453.39	453.28	453.19
Pn06	Gennaio	Luglio	452.20	452.21	452.30	452.36	452.81	453.16	453.59	453.29	452.84	452.51	452.46	452.31

Tabella 9.5: Livelli medi mensili e periodi di massimo e minimo piezometrico annuali per le stazioni di monitoraggio selezionate

9.2.4 Definizione della stagionalità lungo la piana

I risultati delle analisi sulla stagionalità e della definizione dell'anno medio di riferimento per ogni punto di monitoraggio sono stati importati in GIS e cartografati, associando ad ogni stazione il periodo di massimo ed il periodo di minimo piezometrico. I parametri sono stati spazializzati per mezzo dei poligoni di Voronoi così da ottenere due carte che rappresentassero rispettivamente la distribuzione dei periodi di massimo esaurimento della falda (*Figura 9.18*) e di massima ricarica (*Figura 9.19*). La scelta di utilizzare una variabile discreta e non una continua è dovuta alla variabilità dei dataset da cui sono stati ricavati gli anni medi di riferimento e alla distribuzione discontinua dei punti di monitoraggio.

Osservando i box-plot e i valori piezometrici medi mensili delle varie stazioni di monitoraggio e studiandone la disposizione con le carte, è possibile individuare uno schema nella loro distribuzione.

In particolare, procedendo da ovest verso est, risulta evidente un progressivo anticipo sia per il mese di minimo livello piezometrico medio sia per il mese di massimo livello piezometrico medio.

Nella zona occidentale della piana infatti ritroviamo un minimo prettamente primaverile, con valori minimi di carico idraulico che si collocano tra marzo e maggio. Aprile risulta il mese in cui nella maggior parte delle stazioni di monitoraggio viene registrato il valore minore, con alcuni scostamenti verso marzo (Ao06, Ao11, Ao05, Ao12, Ao10 e Sc05) e verso maggio (Ao46, Ao53 e Ao03).

Tuttavia osservando sia i grafici che i valori medi, si può notare che essi differiscono solamente di pochi millimetri, al massimo di qualche centimetro, a fronte di fluttuazioni stagionali nell'ordine dei metri. Pertanto queste differenze risultano poco significative e i valori medi confrontabili tra loro, per cui il mese di minimo livello piezometrico può essere indifferentemente assunto in marzo, aprile o maggio. Considerando che aprile è il mese centrale tra i tre, può essere considerato un buon rappresentante del minimo primaverile medio.

Nella zona centrale della piana, a livello di Brissogne, il minimo si anticipa a febbraio, ma con un valore quasi identico a quello di marzo. Anche in questo caso le differenze appaiono molto esigue, ma con una minor fluttuazione stagionale della tavola d'acqua, inferiore a 1 metro, che potrebbe renderle più significative. In questa zona, da letteratura, è noto un differente

rapporto falda-fiume che può influire sui livelli della falda e quindi, oltre che ridurre le fluttuazioni, anche determinare una diversa evoluzione annuale della piezometria.

Nell'estremità orientale della piana, a Pontey, la situazione invece appare decisamente diversa. Le fluttuazioni stagionali, molto contenute, toccano il minimo in periodo invernale e non più primaverile, con valori confrontabili in gennaio e febbraio.

Anche analizzando i periodi di massimo piezometrico lungo la piana è possibile individuare una variazione del picco, che si sposta da settembre, nella zona occidentale, a luglio, nell'estremità orientale.

A differenza di quanto evidenziato per i minimi piezometrici, il mese di massimo livello mostra differenze più marcate con i periodi vicini, permettendo di definire con una maggior precisione un intervallo circoscritto.

In particolare nella zona occidentale di Aosta è riscontrabile un massimo ben definito in settembre, con valori maggiori nell'ordine dei centimetri o decimetri rispetto alle medie di ottobre e differenze leggermente inferiori rispetto alle medie di agosto.

Procedendo verso sud-est, nella zona meridionale della conoide del torrente Buthier e a livello della confluenza di questo con la Dora Baltea, si rileva un massimo accentuato in agosto, anche in questo caso con differenze minori dal mese precedente rispetto che dal successivo.

Immediatamente a ovest del Buthier, dove la Dora Baltea piega a nord, il massimo viene registrato in luglio e tale rimane fino all'estremità orientale della piana, a Pontey. Confrontando le differenze tra i mesi precedenti e successivi, si può notare che a livello di Aosta i livelli medi di luglio sono piuttosto simili a quelli di agosto, ma procedendo verso est, pur mantenendosi massimi in luglio, mostrano maggior affinità con i livelli di giugno. Questo evidenzia che si conserva una tendenza all'anticipo del picco massimo, seppur in maniera meno incisiva.

Questa analisi può fungere da supporto nella definizione delle campagne di monitoraggio per permettere di organizzarle in funzione della zona da monitorare e renderle maggiormente sitespecifiche e rappresentative delle reali caratteristiche dei livelli di falda.

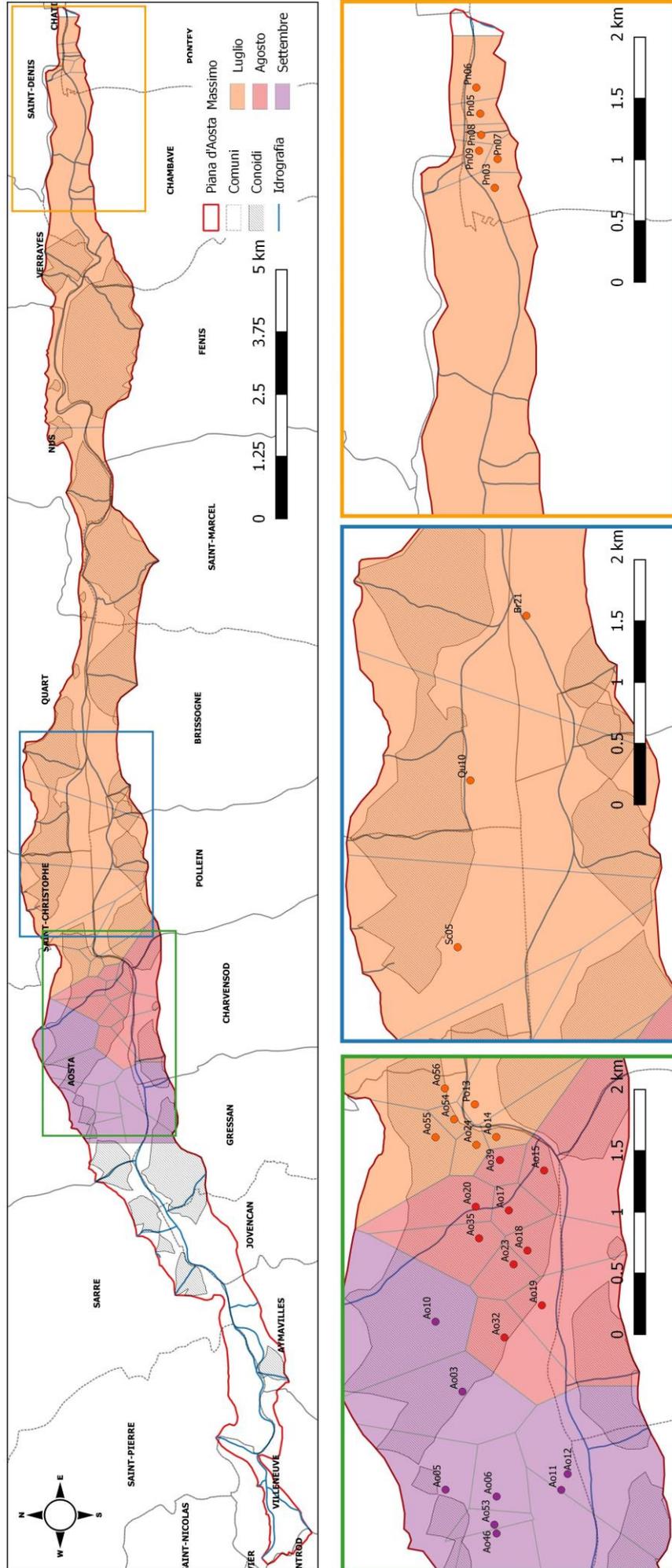


Figura 9.19: Distribuzione dei livelli massimi annuali della falda lungo la piana d'Aosta

9.3 Indicazioni per la definizione di piani di monitoraggio

Secondo quanto emerso da queste analisi è possibile ipotizzare una struttura del piano di monitoraggio per cercare di ottenere serie storiche significative che rappresentino con sufficiente precisione l'andamento della falda su lungo periodo, che permettano di ottenere valutazioni statistiche robuste e veritiere e che siano tra esse confrontabili.

Un aspetto che risulta sicuramente imprescindibile è la descrizione degli anni recenti, senza i quali la valutazione di una tendenza non avrebbe significato per descrivere la situazione attuale della falda e quindi l'elaborazione di un giudizio di stato.

Le serie utilizzate dovrebbero quindi arrivare possibilmente al 2017 o, in caso estremo, non interrompersi prima del 2015. Questa finestra di variabilità potrebbe essere accettabile in quanto tra il 2015 e il 2017 i livelli di falda sembrerebbero essere rimasti pressoché invariati, dunque non costituirebbero una alterazione significativa delle tendenze come potrebbe essere quella determinata dalla mancanza di anni di massimo o minimo piezometrico. Ciononostante questo ha senso solo in caso il monitoraggio dovesse proseguire negli anni successivi al 2017, perché permetterebbe di dare una direzione a queste misure mancanti.

La scelta delle stazioni di monitoraggio da utilizzare dovrebbe essere indirizzata su quelle che presentano le serie più lunghe. Soprattutto si dovrebbe evitare che il loro inizio coincida con il 2006 o il 2009, in quanto si tratta di anni estremi. Come evidenziato dai test riportati nel capitolo 9.1.3 infatti, i dataset che iniziano in uno di questi due periodi sono caratterizzati da una pendenza consistente ma non effettivamente rappresentativa della condizione reale della falda e potrebbe determinare un giudizio positivo o negativo in funzione solamente del fatto che ci si trovasse in un periodo arido o umido a inizio serie.

Un approccio che permetta una valutazione equilibrata dei livelli su lungo periodo dovrebbe essere quello di utilizzare serie il cui inizio si collochi in periodi di media ricarica della falda, come mostrati dai dataset più consistenti. In questo modo si eviterebbero distorsioni dovute a livelli anomali della falda nel caso in cui fossero collocati a inizio serie.

Per ottenere una valutazione rappresentativa e confrontabile, le serie dovrebbero essere tutte della medesima durata. In questo modo la tendenza sarebbe riferibile allo stesso periodo per tutti i punti di monitoraggio utilizzati, permettendo un confronto tra i risultati. Come evidenziato durante i test precedenti infatti, la durata influenza direttamente la pendenza delle rette di

regressione che sono funzione non solo delle misure piezometriche ma anche della variabile temporale a cui queste sono plottate.

Questi due aspetti tuttavia entrano in contrasto con la reale disponibilità di serie storiche lungo la piana. Infatti le sole stazioni di monitoraggio che sono dotate di serie robuste, popolate e lunghe si trovano nel comune di Aosta, mentre il resto del territorio è caratterizzato da una generale penuria di dati, con dataset frammentari, brevi o distanti dal periodo recente che costituirebbero il fattore limitante nella selezione dei punti da utilizzare per la valutazione.

Il caso più emblematico è rappresentato dalla zona centro-orientale della piana, da Brissogne in poi, dove i monitoraggi descrivono solamente il periodo 2006-2009 e sono quindi inutilizzabili ai fini di una valutazione di stato.

Un possibile modo per arginare parzialmente il problema potrebbe essere quello di suddividere temporaneamente la piana d'Aosta in zone omogenee dal punto di vista sia dei parametri idrogeologici sia della qualità delle serie disponibili. In questo modo sarebbe possibile elaborare giudizi sullo stato quantitativo robusti per le zone che lo permettono, mentre nelle rimanenti aree della piana, attuando un piano di monitoraggio costante, si possono iniziare a costruire dataset rigorosi che permetteranno la valutazione nei prossimi cicli sessennali di gestione. Sul lungo periodo, questo permetterà di disporre di serie confrontabili tra loro in tutto il territorio, permettendo anche di uniformare il giudizio estendendolo a scala areale su tutta la piana.

L'integrazione del monitoraggio nell'area centro-orientale inoltre è anche di fondamentale importanza per l'esecuzione del test 2 delle linee guida, in quanto in quest'area la falda presenta un rapporto diretto con il fiume.

Per quanto riguarda la frequenza di monitoraggio, non dovrebbe limitarsi a permettere di individuare eventuali innalzamenti o abbassamenti della tavola d'acqua, ma anche offrire una visione dell'evoluzione stagionale della falda. Inoltre la significatività statistica della tendenza è direttamente proporzionale alle misure disponibili, pertanto una cadenza elevata delle registrazioni consente di discriminare con maggior sicurezza un trend.

Una risoluzione mensile della piezometria è sicuramente quella che permetterebbe di ottenere una rappresentazione dell'evoluzione della falda più precisa e significativa, soffrendo anche meno di eventuali dati mancanti. Ciononostante le fluttuazioni della falda descrivono un regime caratterizzato da un solo minimo ed un solo massimo, che possono essere debitamente descritti per mezzo di misure stagionali.

Sarebbe invece da evitare un monitoraggio semestrale in quanto, nonostante possa essere centrato sui minimi e sui massimi, non permette di raggiungere una significatività statistica sufficiente nei test e di conseguenza un giudizio robusto delle tendenze pluriennali.

Parallelamente dovrebbe essere mantenuta quanto più possibile la costanza nelle campagne di monitoraggio, dal momento che quanto minore è il numero di misure annue che si decide di adottare tanto maggiore è il peso di eventuali dati mancanti.

In considerazione di questi aspetti, un piano di monitoraggio adeguato alle caratteristiche della piana d'Aosta potrebbe essere costituito da campagne stagionali. In questo modo si può contenere lo sforzo di monitoraggio agevolando le operazioni da un punto di vista sia economico sia logistico, mantenendo al contempo una rappresentazione sufficientemente fedele e precisa dell'evoluzione annuale della falda.

Inoltre, le campagne di monitoraggio dovrebbero essere condotte in periodi scelti in funzione della zona della piana che si vuole descrivere. Infatti, come illustrato precedentemente, è possibile individuare una progressiva anticipazione dei periodi di massimo e minimo piezometrico osservando la piana da ovest ad est. Considerando la necessità di registrare i valori estremi del livello della falda per definirne sia la fluttuazione annuale che l'anno medio di riferimento, la piana può essere suddivisa in zone da monitorare separatamente secondo le carte riportate in *Figura 9.18* e in *Figura 9.19*.

In particolare, per quanto riguarda i livelli minimi, si dovrebbe monitorare la zona orientale a gennaio-febbraio, la zona centro-orientale (tra Quart e Brissogne) in febbraio-marzo e la zona occidentale nell'intorno di aprile.

Per quanto riguarda i livelli massimi invece, tutta la zona orientale fino al torrente Buthier può essere monitorata in luglio, mentre ad ovest del fiume in agosto sulla conoide e in settembre più a monte.

Come ultimo accorgimento, per accompagnare la valutazione dello stato quantitativo relativamente agli ecosistemi terrestri dipendenti, dovrebbe essere valutato un monitoraggio più approfondito in prossimità della riserva naturale Les Iles di Saint-Marcel. Dal momento che rappresenta un'area protetta iscritta alla rete Natura2000, la sua tutela è di primaria importanza e trattandosi di una wet-land è necessaria una conoscenza approfondita della falda che la alimenta per consentire una gestione quanto più cautelativa possibile.

10. CONCLUSIONI

Questo lavoro si pone come una sperimentazione delle linee guida per la valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee, elaborate da ISPRA e dalle ARPA regionali in risposta alle direttive europee circa la tutela dei corpi idrici a livello comunitario.

Uno dei target perseguiti dai redattori del documento tecnico è quello di fornire criteri standardizzati e comuni estendibili a tutte le realtà territoriali italiane, così da ottenere risultati confrontabili su scala nazionale ma che al contempo siano rappresentativi e adatti alle singole regioni.

Attraverso l'applicazione al caso di studio reale della Valle d'Aosta, e più in particolare della piana d'Aosta, l'obiettivo è stato quello di verificare se le procedure proposte in tale documento siano applicabili a questo ambito e se forniscano risultati apprezzabili. Parallelamente, il lavoro ha permesso di esplorare le caratteristiche della rete di monitoraggio della Regione, per determinarne la qualità, la rappresentatività e le criticità, così da fornire uno strumento di supporto al lavoro programmatico e gestionale per il suo mantenimento e per l'iterazione delle procedure.

Il lavoro si è distinto in quattro fasi principali, che hanno consentito di mettere in luce diversi aspetti dei protocolli e delle procedure:

- Analisi di bilancio idrico;
- Valutazione dello stato quantitativo in funzione delle acque superficiali connesse;
- Valutazione dello stato quantitativo in funzione degli ecosistemi terrestri dipendenti;
- Elaborazione di criteri per la realizzazione di piani di monitoraggio;

La prima fase di questo lavoro, che a sua volta si divide in valutazione delle tendenze dei livelli di falda su lungo periodo e analisi di bilancio idrico propriamente detto, ha previsto la raccolta di tutti i dati di piezometria disponibili per il periodo compreso tra il 2000 e il 2017 ricavati dagli archivi di ARPA Valle d'Aosta e organizzati all'interno del database idrogeologico TANGRAM.

Organizzando le serie storiche disponibili in funzione dei periodi descritti e delle coordinate geografiche delle stazioni di monitoraggio disponendole in ordine ovest-est, si sono valutate la copertura e la rappresentatività territoriale delle misure piezometriche, al fine di selezionare i

dataset adatti all'applicazione dei test proposti nel documento tecnico. Dalla preliminare analisi delle serie sono state fin da subito messe in evidenza problematiche legate alla struttura stessa della rete di monitoraggio, che si è rivelata inadatta a descrivere adeguatamente la piana d'Aosta.

In particolare, le serie storiche disponibili soffrono di una generale scarsa numerosità di misure, di campionamenti effettuati in modo discontinuo, frammentario e non omogeneo e di lunghezze temporali ridotte. La composizione delle serie storiche varia tra una stazione e l'altra, generando difficoltà nella definizione di un criterio univoco di selezione dei punti.

Per la maggior parte della piana, le misure disponibili fanno riferimento ad anni remoti, non adatti ad una valutazione dello stato quantitativo che, per definizione, deve essere rappresentativa dello stato attuale. Ad eccezione dei pozzi e dei piezometri collocati nel comune di Aosta, che godono di serie lunghe e approfondite, il rimanente territorio risulta eterogeneo e una disponibilità diffusa è reperibile solamente per il triennio 2006-2009. Dei 213 punti di monitoraggio presenti nella piana, solamente 44 sono risultati compatibili in modo rigoroso con i requisiti, quasi tutti situati in Aosta.

Per poter comunque procedere ad una valutazione dello stato quantitativo, si sono dovuti adottare degli accorgimenti che permettessero di estendere il numero di dataset su cui eseguire le analisi. Questo obiettivo è stato raggiunto riducendo i requisiti circa la lunghezza delle serie storiche a 4 anni, invece dei 6 prescritti, e l'età delle serie stesse. In questo modo si è potuto disporre di 64 stazioni di monitoraggio su cui condurre le analisi, nonostante il territorio compreso tra Brissogne e Pontey sia risultato comunque non rappresentato.

Dall'analisi dell'evoluzione piezometrica puntuale è stata studiata la dinamica della falda che ha mostrato un regime caratterizzato da un minimo primaverile e un massimo estivo, tipici tratti che contraddistinguono un'alimentazione nivo-glaciale, compatibile con i naturali cicli di gelo e disgelo. Le fluttuazioni stagionali appaiono massime nell'area di Aosta, con differenze tra massimo e minimo di alcuni metri, e si riducono progressivamente verso est. Da Quart le oscillazioni registrate sono inferiori ai 2 metri e il modello concettuale descrive l'instaurazione di una relazione diretta falda-fiume che esercita un effetto di mediazione sui livelli stagionali.

È stato inoltre identificato, a livello pluriennale, un periodo di diminuzione della falda, con carico minimo nel 2006, seguito da una ricarica che nell'arco di tre anni ha visto risalire la tavola d'acqua di circa 3 metri, con picco nel 2009. Questa fluttuazione è risultata essere comune a tutta l'area occidentale della piana, con entità decrescente da monte a valle, fino a Quart

e Brissogne. Dal centro della piana non c'è più evidenza di questa alterazione, probabilmente per effetto dei rapporti di drenaggio e alimentazione che la falda intrattiene con la Dora Baltea.

Le serie storiche sono state sottoposte ad analisi statistica per l'individuazione degli outliers, sia per mezzo di indici statistici di posizione che per mezzo di esplorazione grafica. Le serie ripulite sono state quindi utilizzate per ottenere dataset composti da medie mensili, che hanno dimostrato di rispondere meglio ai test successivi in virtù di una maggiore omogeneità delle popolazioni campionarie.

Attraverso il calcolo della pendenza, corrispondente al coefficiente angolare della retta di regressione, si è potuta quantificare la variazione annua nel livello di falda per ogni stazione di monitoraggio. La significatività della tendenza è stata poi valutata per mezzo del test non-parametrico di Mann-Kendall che ha permesso di determinare se l'incremento o il decremento del livello di falda puntuali fossero interpretabili come un trend o da considerarsi stabili.

Gli esiti dei test sono stati cartografati ottenendo una carta che rappresenta le tendenze dei livelli di falda pluriennali a scala di singolo pozzo, suddivise in trend crescente, decrescente o stabile. Dei 64 punti analizzati, 49 sono risultati stabili, 7 in aumento e 8 in diminuzione, di cui 7 ad Aosta e 1 a Saint-Christophe.

Data la differente composizione dei dataset utilizzati per queste analisi, i risultati non sono direttamente comparabili tra di essi ed un'interpolazione dei valori delle variazioni di falda per ottenere una proiezione areale delle tendenze non sarebbe significativa e rappresentativa. Per questo si evidenzia la necessità di operare monitoraggi costanti e continui, coerenti in termini di durata, frequenza ed età.

L'analisi di bilancio idrico non è stata effettuata in questa sede in quanto richiede un approfondito studio condotto per mezzo di dati idrologici e meteo-climatici per la definizione dei valori volumetrici di ricarica da confrontare con il censimento delle captazioni, così da determinare un bilancio tra ricarica e prelievi per verificare che la risorsa non sia depauperata.

Il Test 2 per la valutazione delle acque sotterranee in funzione delle acque superficiali connesse ha avuto inizio con la raccolta dei giudizi di qualità espressi dalle autorità competenti circa lo stato qualitativo ed ecologico dei corpi idrici superficiali. La procedura prevede infatti che lo stato quantitativo delle acque sotterranee sia da valutare qualora i suddetti corpi idrici superficiali siano in cattivo stato di conservazione, per verificare che tale fallimento sia da imputare allo stato della falda. Di conseguenza, la necessità di effettuare la valutazione dipende anche dal fatto che il reticolo idrico superficiale intrattenga relazioni dirette con la falda.

Lo stato qualitativo delle acque superficiali ha evidenziato un generale buono stato chimico in tutte le aste fluviali presenti nella piana di Aosta. Lo stato ecologico, di contro, è risultato generalmente buono ma con alcuni tratti contraddistinti da un giudizio scarso. Tali corsi d'acqua tuttavia risultano essere altamente modificati ed impattati da opere antropiche e modificazioni morfologiche, quali regimentazioni e alterazioni in alveo, che determinano un pregiudizio della qualità ecologica. Inoltre solo il torrente de Comboué mostra una relazione con la falda.

Per questi motivi si è ritenuto di poter escludere questa valutazione in accordo a quanto definito dalle linee guida, attribuendo per definizione un buono stato quantitativo alle acque sotterranee, secondo questo test.

Procedendo con il Test 3, esso prevede la valutazione degli ecosistemi terrestri dipendenti dalle acque sotterranee, quali possono essere le zone umide o le reti ecologiche dipendenti dalla presenza di risalite di acqua dal sottosuolo. Analogamente a quanto definito per il Test 2 quindi, la necessità di effettuare questa valutazione dipende dall'effettiva esistenza di tali ecosistemi e dall'effettivo pregiudizio del loro stato di conservazione.

Confrontando le carte relative agli ecosistemi ed al loro stato di conservazione, nonché alla vegetazione potenziale, sono stati evidenziate criticità diffuse in tutto il territorio di fondovalle. Tali cattivi stati di conservazione tuttavia appaiono ascrivibili all'utilizzo del suolo e alla destinazione delle aree a scopo agricolo ed urbano, che provocano una contrazione della copertura vegetata e una drastica riduzione del rapporto tra vegetazione reale e potenziale.

Lo studio è stato esteso indagando anche la presenza di aree naturali protette nella zona. Nella piana d'Aosta si trova una wet land classificata come Zona di Protezione Speciale e iscritta alla rete Natura2000. Il rapporto redatto dall'autorità competente tuttavia disegna un quadro di generale buon stato di conservazione, ad eccezione di una contrazione dell'areale disponibile a causa dell'espansione industriale e viaria, che però risulta ininfluenza ai fini di una valutazione delle acque sotterranee. A conferma di ciò, è espressamente riportato che la disponibilità d'acqua è garantita dalla falda subsuperficiale.

Anche in questo caso si è quindi ritenuto non necessario procedere ad un approfondimento delle valutazioni, assegnando uno stato quantitativo buono alle acque sotterranee secondo quanto previsto dalle linee guida. Sarebbe però consigliabile un potenziamento della rete di monitoraggio, soprattutto nella zona della ZPS, perché nelle condizioni attuali è inadatta a mantenere sotto controllo i livelli della falda e a fornire una pronta risposta in caso dovessero verificarsi problematiche.

Per offrire degli strumenti di supporto nella definizione di piani di monitoraggio, con particolare attenzione alle caratteristiche da ricercarsi nelle serie storiche da continuare e nella frequenza di misurazione da adottare, sono state sperimentate le risposte di un dataset in funzione di diverse condizioni. Gli aspetti studiati sono stati la lunghezza e la completezza della serie, la frequenza campionaria e il periodo rappresentato. Da queste valutazioni sono stati evidenziati i parametri che governano il comportamento delle serie nella definizione della tendenza e della sua significatività.

Si è potuto appurare che il comportamento delle serie è influenzato primariamente dalla lunghezza del monitoraggio che, in relazione ai livelli della falda da cui la serie comincia, determinano la pendenza della retta di regressione e quindi l'individuazione di un aumento o di un calo. La scelta dell'anno di partenza risulta particolarmente importante in quanto, se si discosta dai livelli medi, può dar luogo ad un'errata interpretazione dell'evoluzione pluriennale.

La tendenza risulta però significativa in funzione della numerosità campionaria su cui viene definita, sottolineando l'importanza di un monitoraggio quanto più frequente possibile. A parità di pendenza della retta di regressione infatti, la risposta del test di Mann-Kendall risulta tanto più significativa quante più sono le misure su cui si basa.

Considerando il regime nivo-glaciale della falda, caratterizzato da un solo minimo ed un solo massimo annuali, per descrivere adeguatamente l'evoluzione piezometrica stagionale non è necessario effettuare misure mensili, anche se da un punto di vista statistico sarebbe consigliabile. Un compromesso che permetta di ridurre lo sforzo di monitoraggio per favorire gli aspetti logistici ed economici pur mantenendo responsività statistica potrebbe essere quello di effettuare monitoraggi trimestrali, così da ottenere una descrizione stagionale della falda.

Attraverso lo studio delle medie mensili su più anni, sono infine stati calcolati gli anni medi di riferimento per alcune stazioni di monitoraggio presenti nella piana di Aosta per identificare i periodi di massimo e minimo piezometrico in funzione dell'area indagata.

Questo ha permesso la realizzazione di due carte rappresentative dei periodi in cui monitorare ogni zona della piana. È stato evidenziato che il minimo annuale è prettamente primaverile, tra marzo e maggio, nella zona occidentale della piana e, procedendo verso est, esso si anticipa progressivamente fino ad essere registrato in gennaio-febbraio nell'estremità orientale. Il massimo annuale invece cade in settembre nella zona a monte, si anticipa ad agosto nell'area meridionale di Aosta e si presenta in luglio nel resto della piana fino a Pontey.

In conclusione, alla luce di quanto evidenziato nell'applicazione dei test previsti e negli approfondimenti effettuati sul comportamento delle serie e la loro risposta alla valutazione delle tendenze, risulta evidente la necessità di migliorare la rete di monitoraggio nella piana di Aosta attraverso l'implementazione o la continuazione di campagne di rilevamento su alcuni piezometri selezionati nella zona centro-orientale dell'area di studio, in particolare tra Brissogne e Pontey, dove la mancanza di serie storiche durature ed attuali non permette una valutazione dell'evoluzione della falda. Attraverso una pianificazione regolare ed accurata, si può giungere, nel lungo periodo, alla realizzazione di dataset di lunghezza e risoluzione confrontabili a quelle già presenti nel territorio di Aosta, così da consentire un'analisi estendibile a tutta la piana nei prossimi cicli di gestione del bacino idrogeologico attenendosi alle indicazioni offerte dalle linee guida.

BIBLIOGRAFIA

- AdbPo - Autorità di bacino del fiume Po. (2016). *Piano di Gestione del distretto idrografico del fiume Po*. Riesame e aggiornamento al 2015, versione marzo 2016.
- Armando, E. (1971). *Sondaggi elettrici nella piana d'Aosta*. *Geofisica e meteorologia* n. 20, 155-157.
- Armando, E., & Dal Piaz, G. V. (1970). *Studio geologico e geofisico della coltre quaternaria nei dintorni di Aosta (osservazioni preliminari)*. Quaderno dell'Istituto di Ricerca sulle Acque.
- ARPA Valle d'Aosta. (2012). *Rapporto sullo stato qualitativo e quantitativo della falda*.
- ARPA Valle d'Aosta. (2013). *Rapporto sullo stato qualitativo e quantitativo della falda*.
- ARPA Valle d'Aosta. (2016). *XI Relazione sullo stato dell'ambiente in Valle d'Aosta*.
- ARPA Valle d'Aosta. (2017). *Classificazione dei corpi idrici superficiali al termine del I PdGPo (2010-2015)*. Tratto da <http://www.arpa.vda.it/it/acqua/acque-superficiali/acque-correnti/2771-classificazione-dei-corpi-idrici-superficiali-al-termini-del-i-pdgp-2010-2015>
- Berto, D. (2013). *Caratterizzazione idrochimica delle acque sotterranee della piana di Aosta mediante analisi dei dati della rete di monitoraggio ARPA Valle d'Aosta dal 2000 al 2012*. Università degli Studi di Milano Bicocca. Tesi di laurea inedita.
- Bianquin, N. (2010). *Monitoraggio idrologico nella Regione Valle d'Aosta*. Dipartimento di Geologia Applicata e Ambientale, Università degli Studi di Torino. Tesi di laurea inedita.
- Bonetto, F., & Gianotti, F. (1998). *Giardino delle rocce*. Pieghevole Comune di Pollein.
- Boni, C. F., Mastrorillo, L., & Petitta, M. (1993). *Scomposizione della portata dei corsi d'acqua dell'Appennino Marchigiano con il metodo delle portate mensili caratteristiche*. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 28, Bari, 121-129.
- Boni, C., Petitta, M., Preziosi, E., & Sereni, M. (1993). *Genesi e regime di portata delle acque continentali del Lazio*. Roma: CNR - Italian National Research Council.
- Bonomi, T., Cavallin, A., & De Amicis, M. (1995). *Un database per pozzi: TANGRAM*. *Quaderni geologia Applicata*, supp. n. 31/95, pp. 3461-3465.
- Bonomi, T., Fumagalli, M. L., Benastini, V., & Canepa, P. (2012). *Implementazione di un modello numerico di flusso preliminare della falda per la zona della piana di Aosta compresa tra Aymavilles e Pollein*. Progetto di collaborazione scientifica, relazione finale.
- Bordi, I., Fraedrich, K., Jiang, J. M., & Sutera, A. (2004). *Spatio-temporal variability of dry and wet periods in eastern China*. *Theor. Appl. Climatol.* - Springer-Verlag. doi:10.1007/s00704-004-0053-8

- Braca, G., Bussettini, M., Lastoria, B., & Mariani, S. (2013). *Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrogeologici*. ISPRA, Manuali e Linee Guida 84/13; ISBN 978-88-448-0584-5.
- Brunke, M., & Gonser, T. (1997). *The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater*. *Freshwater Biology*, 37: 1-33.
- Castany, G. (1982). *Principles et methods de l'hydrogeologie*. Dunod Université, Bordas, Paris.
- Comunità Europea. (2000). *Directive 2000/60/EC of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. Water Framework Directive - WFD. European Parliament and Council.
- Comunità Europea. (2006). *Directive 2006/118/EC of 12 December 2006 on the protection of the groundwater against pollution and deterioration*. Groundwater Directive - GWD. European Parliament and Council.
- Dal Piaz, G. V., Baggio, P., Bertolo, D., Bistacchi, A., Carraio, F., Fontan, D., . . . Venturini, G. (2010). *Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 91, Châtillon. Geological Survey of Italy at a scale of 1:50.000, Sheet 91, Châtillon*. ISPRA, Servizio Geologico d'Italia.
- De Luca, D. A., Masciocco, L., Motta, E. V., & Tonussi, M. (2004). *Studio idrogeologico finalizzato alla definizione delle aree di salvaguardia dei pozzi di acquedotto del Comune di Aosta*. Convenzione tra Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Torino e Comune di Aosta.
- De Maio, M. (2010). *Indagine idrogeologica sul bacino della Dora Baltea da Villeneuve a Nus: studio sui potenziali rischi di inquinamento delle acque sotterranee nonché identificazione dei siti potenzialmente pericolosi e valutazione della vulnerabilità degli acquiferi*. Report finale di relazione - DITAG - Politecnico di Torino.
- European Commission. (2003). CIS Guidance Document No.07. *Monitoring under the Water Framework Directive*. Technical Report No.07-2003.
- European Commission. (2007). CIS Guidance Document No.15. *Guidance on Groundwater Monitoring*. Technical Report No.002-2007.
- European Commission. (2009). CIS Guidance Document No.18. *Guidance on Groundwater Status and Trend Assessment*. Technical Report No.026-2009.
- European Commission. (2010). CIS Guidance Document No.26. *Guidance of Risk Assessment and the Use of Conceptual Models for Groundwater*. Technical Report No.026-2010.
- European Commission. (2011). CIS Guidance Document No.06. *Technical Report on Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems*. Technical Report No.06-2011.
- Guerra, M., Preziosi, E., Ghergo, S., Calace, N., Guyennon, N., Marcaccio, M., . . . Romano, E. (2017). *Linee guida per la valutazione delle tendenze ascendenti e d'inversione degli inquinanti nelle acque sotterranee*. ISPRA, Manuali e Linee guida 161/2017; ISBN 978-88-448-0844-0.

- Hatton, T. J., & Evans, R. (1998). *Dependence of ecosystems on groundwater and its significance to Australia*. Land and Water Resources Research and Development Corporation. Occasional Paper No. 12/98: 77 pp.
- Hipel, K. W., & McLeod, A. I. (2005). *Time series modeling of water resources and environmental systems*.
- Huh, S., Dickey, D. A., Meador, M. R., & Ruh, K. E. (2005). *Temporal analysis of the frequency and duration of low and high streamflow: years of record needed to characterize streamflow variability*. Journal of Hydrogeology 310, 78-94.
- Irpi-CNR. (2013). *Piano e Sistemi di Monitoraggio per la Prevenzione del Rischio Idrogeologico: Alluvioni e Siccità*. Siccità e Cambiamenti climatici, Rapporto di Attività. 2011.
- ISPRA. (2011). *Implementazione della Direttiva 2000/60/CE. Analisi e valutazione degli aspetti idromorfologici. Versione 1.1*.
- ISPRA. (2011). *Strategia Nazionale per la Biodiversità. Contributi per la tutela della biodiversità delle zone umide*. ISPRA, Rapporti 153/2011.
- ISPRA. (2012). *Strategia Nazionale per la Biodiversità. 1° Rapporto (2011-2012)*. Tratto da <http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/biodiversita/documenti/strategia-nazionale-per-la-biodiversita>
- ISPRA. (2013). *Strategia Nazionale per la Biodiversità. Italy's fifth national report to the convention on biological diversity (2009-2013)*. Tratto da <http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/biodiversita/documenti/strategia-nazionale-per-la-biodiversita>
- ISPRA. (2014). *Progettazione di reti e programmi di monitoraggio delle acque ai sensi del D. Lgs. 152/2006 e relativi decreti attuativi*. Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente. Delibera del Consiglio federale delle Agenzie Ambientali. Seduta del 30 Giugno 2014, Doc. no. 42/14-CF.
- ISPRA. (2016). *Annuario dei dati ambientali 2016*. ISPRA, Stato dell'Ambiente 69/2016. ISBN 978-88-448-0796-2. Tratto da <http://annuario.isprambiente.it/>
- ISPRA. (2016). *Strategia Nazionale per la Biodiversità. Mappatura degli ecosistemi e valutazione del loro stato di conservazione*. Tratto da ftp://ftp.minambiente.it/pnm/Strategia_Nazionale_Biodiversita/Capitale_Naturale/Mappatura%20Ecosistemi_MAES/VALLE%20D_AOSTA/
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. 4th ed. Charles Griffin, London.
- Mann, H. B. (1945). *Nonparametric tests against trend*. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 245-259.
- Martin, G., Kirk, S., Fletcher, S., Clews, J., Roberts, M., Daly, D., & McConvey, P. (2005). *Criteria for WFD Groundwater Good 'Quantitative Status' and a Framework for the Assessment of Groundwater*

- Abstractions*. SNIFFER (Scotland & Northern Ireland Forum For Environmental Research) Project WFD53.
- MATTM. (2016). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. *Programma LIFE+ (2007-2013)*. Tratto da <http://www.minambiente.it/pagina/programma-life-2007-2013>
- MATTM. (s.d.). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. *Rete Natura 2000*. Tratto da <http://www.minambiente.it/pagina/rete-natura-2000>
- Mercalli, L., Berro, D. C., & Montuschi, S. (2003). *Atlante climatico della Valle d'Aosta*. Collana "Memorie dell'atmosfera"; SMS Editore.
- Money, E. B. (1997). *Idrogeochimica ed idrologia isotopica della piana di Aosta*. Dipartimento di Scienze Geologiche, Università degli Studi di Torino. Tesi di laurea inedita.
- Novel, J. P. (1995). *Contribution de la géochimie à l'étude d'in aquifères alluvial de montagne. Cas de la Vallée d'Aoste, Italie*. These de doctorat de l'Université de Paris 6.
- P.I.A.H.V.A. (1992). Programme International d'Action Hydrogéologique en Val d'Aoste. *La nappe alluviale de la Doire-Vallée d'Aoste*. Rapport finale première phase. Universités d'Avignon, Chambéry, Turin, Centre de Recherches Géodynamiques de Tholon - Univ. Paris 6 - Ecole Polytechnique de Lausanne (GEOLEP).
- P.I.A.H.V.A. (1994). Programme International d'Action Hydrogéologique en Val d'Aoste. *Etude Hydrogéologique de la nappe alluviale de la vallée d'Aoste*. Rapport finale première phase. Universités d'Avignon, Chambéry, Turin, Centre de Recherches Géodynamiques de Tholon - Univ. Paris 6 - Ecole Polytechnique de Lausanne (GEOLEP).
- P.I.A.H.V.A. (1996). Programme International d'Action Hydrogéologique en Val d'Aoste. *Modélisation de l'écoulement souterrain de l'aquifère alluvial de la Doire Baltée-Val d'Aoste, Italie*. Rapport finale première phase. Universités d'Avignon, Chambéry, Turin, Centre de Recherches Géodynamiques de Tholon - Univ. Paris 6 - Ecole Polytechnique de Lausanne (GEOLEP).
- Pellicoli, F. (2013). *Caratterizzazione spazio-temporale delle contaminazioni di origine antropica nella piana d'Aosta*. Università degli Studi di Milano Bicocca. Tesi di laurea inedita.
- Percopo, C., Brandolin, D., Canepa, M., Capodaglio, P., Cipriano, G., Gafà, R. M., . . . Testa, M. (2016). *Criteri tecnici per l'analisi dello stato quantitativo e il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei; SNPA "Criteri per l'analisi quantitativa di corpi idrici sotterranei ai fini della loro classificazione"*. Roma, Aprile 2016: ISPRA - Manuali e Linee Guida XXX/2016.
- Pollicini, F. (1994). *Geologia ed idrogeologia della piana di Aosta*. Dipartimento di Scienze Geologiche, università degli Studi di Torino. Tesi di laurea inedita.
- Regione Autonoma Valle d'Aosta. (2006). *Piano di Tutela delle Acque*. Approvato con deliberazione del Consiglio regionale n. 1788/XII dell'8 febbraio 2006.
- Regione Autonoma Valle d'Aosta. (s.d.). Rete natura 2000. *IT1205070 - Zona umida di Les Iles di Saint-Marcel*. Formulario standard per Zone di Protezione Speciale (ZPS). Tratto da

http://www.regione.vda.it/risorsenaturali/conservazione/natura2000/siti/IT1205070/default_i.aspx

Repubblica Italiana. (2006). Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n. 152. *Norme in materia ambientale*. Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 Aprile 2006.

Repubblica Italiana. (2009). Decreto Legislativo 16 Marzo 2009, n. 30. *Attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento*. Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n.79 del 4 aprile 2009.

Repubblica Italiana. (2010). Decreto Ministeriale 8 Novembre 2010, n. 260. *Criteri tecnici per la classificazione dello stato dei corpi idrici*. Supplemento ordinario n. 31 pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 30 del 7 Febbraio 2011.

Stefania, G. A. (2014). *Modellazione idrogeochimica preliminare della contaminazione da cromo esavalente nelle acque sotterranee della piana di Aosta*. Università degli Studi di Milano Bicocca. Tesi di laurea inedita.

Stefania, G. A. (2018). *Hydrogeological modeling to support the management of groundwater resources in Alpine valleys*. Ph.D. Thesis, University of Milano Bicocca, 142 pp.

Triganon, A., Dzikowsky, M., Navel, J. P., Dray, M., Zuppi, G. M., & Parriaux, A. (2003). *Echanges nappes-rivière en vallée alpine: quantification et modélisation (Vallée d'Aoste, Italie)*. Canadian Journal of Earth Sciences n. 40, 775-786.

U.S. EPA. (2015). *ProUCL Version 5.1.002 Technical Guide. Statistical Software for Environmental Applications for Data Sets with and without Nondetect Observations*. United States Environmental Protection Agency. EPA/600/R-07/041 October 2015. Tratto da <https://www.epa.gov/land-research/proucl-software>

Winter, T. M., Harvey, J. W., Lehn Franke, O., & Alley, W. M. (1998). *Ground Water and Surface Water: a single resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139; Denver, Colorado.

Yue, S., & Pilon, P. (2004). *A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection*. Hydrological Science Journal 49(1), 21-37.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 3.1: Groundwater status assessment; test per la definizione dello stato chimico e quantitativo (European Commission, 2009)	12
Figura 3.2: Risorse e riserve idriche	12
Figura 3.3: Esempio di modello concettuale di un acquifero	13
Figura 3.4: Procedura per il Test 1 - Bilancio idrico (European Commission, 2009, modificato) .	14
Figura 3.5: Esempi di tendenza positiva (A) e negativa (B) a scala puntuale (da: ARPA Emilia-Romagna)	17
Figura 3.6: Procedura per il Test 2 - Acque superficiali connesse (European Commission, 2009)	19
Figura 3.7: Procedura per il Test 3 - Ecosistemi terrestri dipendenti (European Commission, 2009)	21
Figura 3.8: Procedura per il Test 4 - Intrusione salina o di altro tipo (European Commission, 2009)	23
Figura 3.9: Idrogramma mensile medio dei livelli piezometrici di riferimento raccolti nel periodo 2007-2015 (da ARPA Emilia-Romagna)	25
Figura 3.10: Idrogramma semestrale dei livelli piezometrici di riferimento raccolti nel periodo 2001-2015 (da ARPA Emilia-Romagna)	25
Figura 4.1: Inquadramento della Valle d'Aosta, divisa nei suoi comuni e nelle sue piane.....	27
Figura 4.2: Distribuzione quote altimetriche della Valle d'Aosta	27
Figura 4.3: La piana d'Aosta	28
Figura 4.4: Numero medio di giorni piovosi (Mercalli et al., 2003)	30
Figura 4.5: Carta delle isoiete, valori medi 1920-2000 (Mercalli et al., 2003)	30
Figura 4.6: Quantità media annua di neve, 1920-2000 (Mercalli et al., 2003)	30
Figura 4.7: Carta delle isoterme medie annue tra i 500 e i 3500 metri, 1950-2002 (Mercalli et al., 2003)	30
Figura 4.8: profilo longitudinale della piana d'Aosta (Bonetto & Gianotti, modificato 1998)	32
Figura 4.9: Idrografia della Valle d'Aosta (ARPA Valle d'Aosta)	34
Figura 4.10: Sezione longitudinale del corpo idrico della piana d'Aosta (Triganon, 2003)	36

Figura 4.11: Carta piezometrica riferita a gennaio 2009 (Bonomi, Fumagalli, Canepa & Benastini, 2012)	37
Figura 4.12: Carta piezometrica riferita a luglio 2009 (Bonomi, Fumagalli, Canepa & Benastini, 2012)	37
Figura 4.13: Carta della soggiacenza riferita a luglio 2009 (Bonomi, Fumagalli, Canepa & Benastini, 2012)	38
Figura 4.14: Carta della soggiacenza riferita a gennaio 2009 (Bonomi, Fumagalli, Canepa & Benastini, 2012)	38
Figura 4.15: Inquadramento dei pozzi e dei piezometri presenti nella piana d'Aosta	41
Figura 5.1: Homepage del database online TANGRAM.....	44
Figura 5.2: Istogramma con il numero di punti misurati in ogni anno divisi per classe di frequenza di monitoraggio	47
Figura 5.3: Distribuzione dell'abbondanza annuale delle misure per ogni punto di monitoraggio, in direzione O-E; l'asse orizzontale non rappresenta la distanza tra i punti di misura, ma solo l'ordine in cui sono collocati longitudinalmente, pertanto aree più dense di pozzi occupano una porzione maggiore dell'asse	53
Figura 5.4: Inquadramento dei punti di monitoraggio nella piana d'Aosta, distinti in pozzi e piezometri, in scala di colore in funzione del numero di dati disponibili	55
Figura 6.1: Inquadramento dei punti di monitoraggio dotati di almeno 6 anni consecutivi di monitoraggio con almeno 2 misure all'anno. In rosso i punti le cui serie non si spingono fino al 2017	64
Figura 6.2: Inquadramento dei punti di monitoraggio selezionati nella zona centro-occidentale della piana d'Aosta.....	67
Figura 6.3: Inquadramento dei punti di monitoraggio selezionati nella zona centrale della piana d'Aosta	67
Figura 6.4: Inquadramento dei punti di monitoraggio selezionati nella zona orientale della piana d'Aosta.....	67
Figura 6.5: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Jovencan	69
Figura 6.6: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Aosta	73
Figura 6.7: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Charvensod.....	75
Figura 6.8: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Pollein.....	76
Figura 6.9: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Saint-Christophe	78

Figura 6.10: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Quart	80
Figura 6.11: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Brissogne	81
Figura 6.12: Evoluzione puntuale della piezometria nella zona di Pontey.....	83
Figura 6.13: Esempio di outliers riconosciuti dal test statistico per la serie del piezometro Ao18, evidenziati in rosso	85
Figura 6.14: Esempio di valutazione grafica degli outliers. In rosso gli outliers riconosciuti in base agli indici di posizione, in giallo i falsi positivi riconosciuti erroneamente dal test statistico, in arancio i falsi negativi non riconosciuti dal test.....	85
Figura 6.15: Confronto tra retta di regressione ottenuta dall'intero dataset e retta di regressione ottenuta dalle medie mensili per il piezometro Ao51. La pendenza è sovrastimata	87
Figura 6.16: Confronto tra retta di regressione ottenuta dall'intero dataset e retta di regressione ottenuta dalle medie mensili per il piezometro Jo02. La pendenza è sottostimata	87
Figura 6.17: Schermata degli input del software ProUCL 5.1	92
Figura 6.18: Schermata degli output.....	92
Figura 6.19: Output grafico piezometria/tempo	93
Figura 6.20: Output grafico piezometria/indice costruito	93
Figura 6.21: Tendenze ricavate dalle medie mensili per Jo02	98
Figura 6.22: Tendenze dei livelli piezometrici a scala di singolo pozzo su lungo periodo	101
Figura 7.1: Schema procedurale per la valutazione dello stato complessivo dei corpi idrici superficiali (ARPA Valle d'Aosta)	104
Figura 7.2: Classificazione dello stato ecologico dei corsi d'acqua superficiali nel triennio 2014-2016 (ARPA Valle d'Aosta)	105
Figura 7.3: Distribuzione delle classi di qualità ecologica (ARPA Valle d'Aosta).....	105
Figura 7.4: Classificazione dello stato chimico dei corsi d'acqua superficiali nel triennio 2014-2016 (ARPA Valle d'Aosta)	106
Figura 7.5: Distribuzione delle classi di qualità chimica (ARPA Valle d'Aosta)	106
Figura 7.6: Classi di qualità per corpi a scorrimento superficiale (ARPA Valle d'Aosta)	107
Figura 7.7: Classi di qualità per corpi di origine glaciale (ARPA Valle d'Aosta)	107

Figura 7.8: Classificazione dei corpi idrici naturali della piana d'Aosta (ARPA VdA, modificato)	107
Figura 7.9: Classificazione dei corpi idrici altamente modificati della piana d'Aosta (ARPA VdA, modificato)	107
Figura 8.1: Tipi di ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee (Clifton & Evans, 1998)	110
Figura 8.2: Carta degli ecosistemi della Valle d'Aosta (ISPRA)	112
Figura 8.3: Carta dello stato di conservazione degli ecosistemi della Valle d'Aosta (ISPRA)	113
Figura 8.4: Carta della vegetazione naturale potenziale della Valle d'Aosta (ISPRA)	114
Figura 8.5: Stato di conservazione degli ecosistemi della Valle d'Aosta (ISPRA, modificato)	115
Figura 8.6: Inquadramento dei siti della rete Natura 2000 in Valle d'Aosta (ARPA VdA)	117
Figura 8.7: Valutazione del sito relativamente agli habitat presenti (ARPA VdA)	119
Figura 9.1: Piezometria 2000-2017 di Ao32 utilizzando l'intero dataset	123
Figura 9.2: Piezometria 2000-2017 di Ao32 utilizzando medie mensili (non tutti i mesi possiedono misure)	123
Figura 9.3: Piezometria 2000-2017 di Ao32 utilizzando 6 misure all'anno (i mesi mancanti sono stati sostituiti con misure vicine)	123
Figura 9.4: Piezometria 2000-2017 di Ao32 utilizzando 4 misure all'anno (frequenza stagionale, non sempre corrispondente agli stessi mesi)	124
Figura 9.5: Piezometria 2000-2017 di Ao32 utilizzando 2 misure all'anno (in primavera e in estate secondo i cicli di massimo e minimo piezometrico, non sempre corrispondenti agli stessi mesi)	124
Figura 9.6: Piezometrie 2000-2017 di Ao32 con differenti combinazioni di dati mancanti dal dataset, corrispondenti alle misure del 2006 (minimo piezometrico pluriennale), 2007, 2009 (massimo piezometrico pluriennale) e loro combinazioni (medie mensili)	127
Figura 9.7: Confronto tra serie di Ao32 di lunghezza diversa con dataset costituito da misure mensili	130
Figura 9.8: Confronto tra serie di Ao32 di lunghezza diversa con dataset costituito da 6 misure/anno	130
Figura 9.9: Confronto tra serie di Ao32 di lunghezza diversa con dataset costituito da 4 misure/anno	131
Figura 9.10: Confronto tra serie di Ao32 di lunghezza diversa con dataset costituito da 2 misure/anno	131

Figura 9.11: Confronto tra serie di Ao32 riferite a periodi diversi con dataset costituito da misure mensili.....	134
Figura 9.12: Box-plot delle misure mensili su più anni delle stazioni di monitoraggio selezionate ad Aosta.....	141
Figura 9.13: Box-plot delle misure mensili su più anni della stazione di monitoraggio selezionata a Pollein	142
Figura 9.14: Box-plot delle misure mensili su più anni della stazione di monitoraggio selezionata a Saint-Christophe.....	142
Figura 9.15: Box-plot delle misure mensili su più anni della stazione di monitoraggio selezionata a Quart	142
Figura 9.16: Box-plot delle misure mensili su più anni della stazione di monitoraggio selezionata a Brissogne	143
Figura 9.17: Box-plot delle misure mensili su più anni delle stazioni di monitoraggio selezionate a Pontey	144
Figura 9.18: Distribuzione dei livelli minimi annuali della falda lungo la piana d'Aosta	147
Figura 9.19: Distribuzione dei livelli massimi annuali della falda lungo la piana d'Aosta.....	149

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 4.1: Parametri idraulici della piana d'Aosta	36
Tabella 5.1: Abbondanza e collocazione dei pozzi e piezometri inseriti in TANGRAM	44
Tabella 5.2: Numero di punti per classe di frequenza di monitoraggio nei vari anni	46
Tabella 5.3: Numero di misure in ogni anno per ognuno dei punti di monitoraggio presenti nella piana d'Aosta	51
Tabella 6.1: Selezione delle serie costituite da almeno 6 anni di misure con una frequenza di almeno 2 misure/anno; In azzurro sono evidenziati i punti di monitoraggio le cui serie arrivano fino al 2017	63
Tabella 6.2: Punti di monitoraggio selezionati per la valutazione delle tendenze su scala pluriennale e consistenza delle relative serie storiche	66
Tabella 6.3: Confronto delle abbondanze di dati e delle pendenze delle rette di regressione tra i dataset comprensivi della totalità delle misure, i dataset ripuliti dagli outliers e i dataset costruiti utilizzando le medie mensili	88
Tabella 6.4: Risultati della valutazione delle tendenze a scala puntuale su lungo periodo	95
Tabella 9.1: Statistiche delle serie 2000-2017 con differenti risoluzioni	124
Tabella 9.2: Statistiche delle serie 2000-2017 con elementi di discontinuità	128
Tabella 9.3: Statistiche delle serie con differenti lunghezze e risoluzioni	132
Tabella 9.4: Statistiche delle serie riferite a periodi diversi	134
Tabella 9.5: Livelli medi mensili e periodi di massimo e minimo piezometrico annuali per le stazioni di monitoraggio selezionate	144

La realizzazione di questo lavoro nasce da una collaborazione tra ARPA Valle d'Aosta (ARPA VdA) e l'università degli Studi di Milano Bicocca.

Lo scopo di questa tesi è l'esplorazione delle metodologie proposte nelle linee guida per la valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee elaborate da ISPRA e dalle ARPA regionali in attuazione della Direttiva Comunitaria 2000/60/CE (Water Framework Directive – WFD). Tali linee guida sono state prodotte per fornire i criteri tecnici per la valutazione dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei e per la programmazione del monitoraggio, per poter rispondere all'obiettivo posto dalla WFD di raggiungere un buono stato qualitativo e quantitativo per tutte le acque in Europa. Come ulteriore obiettivo, queste linee guida puntano a favorire l'omogeneizzazione dei metodi di lavoro a scala nazionale.

In attesa della pubblicazione del documento, è stato necessario verificarne l'applicabilità su casi di studio reale.

Attraverso l'utilizzo di dati piezometrici provenienti dagli archivi di ARPA Valle d'Aosta, organizzati all'interno del database idrogeologico TANGRAM, e la loro elaborazione con strumenti informativi territoriali, sono stati applicati i test predisposti dalle linee guida.

L'applicazione dei criteri tecnici ha inoltre fornito la possibilità di evidenziare criticità riguardanti le serie storiche idrogeologiche disponibili e le caratteristiche della rete di monitoraggio di ARPA VdA.

Il Test 1, analisi di bilancio idrico, richiede la selezione di serie storiche di lunghezza ideale di almeno 10-15 anni, o comunque non inferiore ai 6 anni, con frequenza di monitoraggio mensile, o comunque non inferiore alle 2 misure/anno. Attraverso l'analisi delle serie e l'applicazione di test statistici, lo scopo è quello di giungere alla valutazione del trend pluriennale a scala puntuale per poi estendere la valutazione alla scala dell'intero corpo idrico.

Per i trend in discesa viene attribuito lo stato quantitativo scarso, mentre per i trend stabili o in aumento si deve procedere alla definizione del bilancio idrico attraverso l'elaborazione dei principali indicatori idrogeologici, idrologici e metereologici.

Per l'applicazione del primo test sono state analizzate le serie storiche tra il 2000 e il 2017 di tutti i 213 punti di monitoraggio presenti nella piana di Aosta per selezionare quelle più adatte a rispettare gli standard proposti dalle linee guida. Di fronte all'impossibilità di disporre di un adeguato numero di punti di monitoraggio e di una sufficiente copertura areale selezionando le

serie in modo rigoroso, i requisiti richiesti sono stati ridotti, ottenendo un set di 64 punti di monitoraggio distribuiti nella zona centrale e nell'estremità orientale della piana, per poter comunque giungere ad una valutazione della tendenza dei livelli di falda a scala puntuale. In particolare, le criticità relative alle serie riguardano la lunghezza, la completezza, la numerosità e l'omogeneità dei dati.

Sono stati realizzati dei grafici piezometria-tempo per visualizzare la dinamica della falda. Attraverso il calcolo dei principali indici statistici è stata rilevata la presenza di outliers ed è stata calcolata la pendenza della retta di regressione. Le serie sono state valutate con il test di Mann-Kendall per definire la significatività delle tendenze.

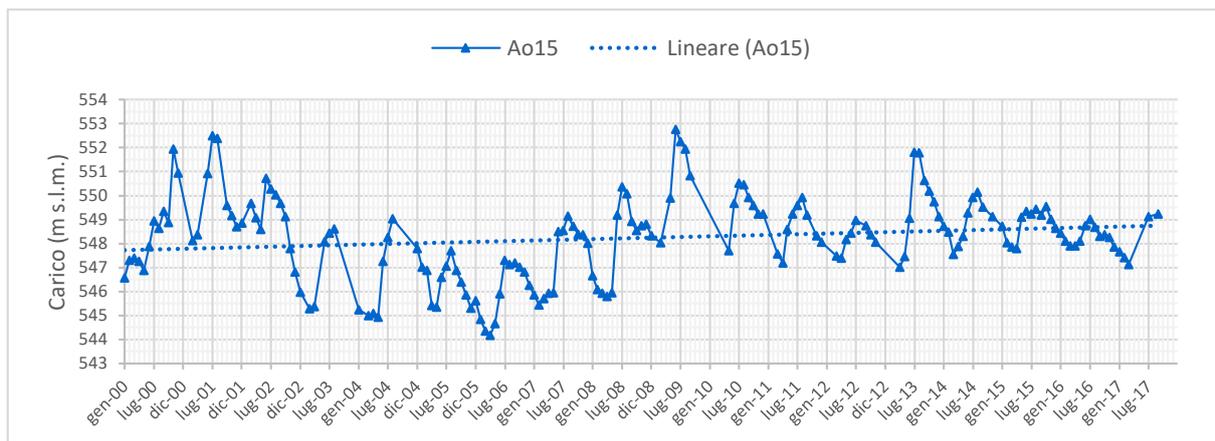


Figura: esempio di serie storica piezometrica con relativa retta di regressione

Codice ente	Tipologia	Inizio	Fine	S	p-value	Pendenza	Variazione (m/y)	Trend
Ao15	Piezometro	gen-00	set-17	1734	0.0109	1.59E-04	0.058	Positivo

Tabella: esempio di valutazione della significatività della tendenza pluriennale

I risultati dell'analisi sono stati riportati in carta utilizzando Quantum GIS e rappresentati in funzione del trend ottenuto. I risultati hanno mostrato una generale stabilità dei livelli piezometrici, con 49 punti stabili e 7 in aumento. Si registra la presenza di 7 punti con tendenza negativa ad Aosta, situati nella parte occidentale del comune e alla confluenza del torrente Buthier nella Dora Baltea, e di 1 punto a Saint-Christophe.

Il test 2 per le acque superficiali connesse ed il test 3 per gli ecosistemi terrestri dipendenti sono legati allo stato qualitativo definito nell'ambito della gestione delle acque superficiali e delle aree protette. La valutazione dello stato quantitativo è prevista qualora acque superficiali ed ecosistemi terrestri falliscano i propri obiettivi di qualità e prevede di determinare se tale fallimento sia da imputare alle acque sotterranee.

Dal momento che sia le acque superficiali sia gli ecosistemi terrestri sono in buono stato di conservazione, sulla base di valutazioni di ARPA VdA e dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, non è stato necessario procedere all'attuazione di tali test.

Come ultima parte del lavoro è stata valutata la rete di monitoraggio ed è stato ipotizzato un piano di monitoraggio per soddisfare contemporaneamente le necessità di rappresentatività delle serie storiche e i limiti di carattere operativo ed economico, per definire una frequenza che sia efficiente e mantenibile.

Per raggiungere questo risultato è stata utilizzata a titolo d'esempio una delle serie più consistenti disponibili. La serie è stata usata come base per ipotizzare un monitoraggio con frequenze, durate e continuità differenti. In particolare i dati sono stati utilizzati per ipotizzare un monitoraggio con frequenze di 1, 2, 4, 6 misure all'anno o con misure mensili. Per ognuna di queste frequenze, la serie è stata valutata nella sua interezza, rimuovendo l'anno di minimo piezometrico, l'anno di massimo piezometrico, un anno medio e le varie combinazioni di queste possibilità. Inoltre sono state valutate durate variabili del monitoraggio da 6 a 12 anni di misure.

Da questa analisi è emerso che la mancanza di anni di misure interne alla serie altera la pendenza della retta di regressione in maniera più marcata rispetto alla frequenza di monitoraggio. Questo sottolinea l'importanza di mantenere le serie continue, in quanto un mancato monitoraggio potrebbe nascondere la presenza di massimi o minimi.

Per quanto riguarda la frequenza di monitoraggio e la numerosità del campione, esse influenzano sul risultato del test di Mann-Kendall e quindi sulla significatività del trend ottenuto. Si sottolinea l'importanza di un monitoraggio frequente.

Sulle serie ridotte, si nota come l'influenza dei massimi e dei minimi sia tanto maggiore quanto minore è la lunghezza della serie stessa. Inoltre tale significatività dipende dalla frequenza e risulta rilevabile, sulla serie in esame, per monitoraggi almeno bimestrali o, in maniera minore, per monitoraggi stagionali, mentre per numerosità inferiori il trend risulta non significativo in ogni caso.

I risultati suggeriscono che un monitoraggio almeno stagionale possa essere sufficiente per le finalità della piana d'Aosta e che vada condotto sulle serie già dotate di una buona lunghezza per ottenere dataset robusti.

Per quanto riguarda i periodi in cui svolgere le campagne di monitoraggio, sono stati selezionati alcuni punti di monitoraggio organizzandone i dati a seconda del mese. Sui dataset sono

state condotte analisi statistiche di base per l'individuazione di eventuali outliers e sono stati riportati in grafici box-plot. Per ogni serie sono state calcolate le medie mensili su più anni da cui sono stati ricavati i mesi di minimo e di massimo piezometrico.

Utilizzando Quantum GIS, le informazioni sono state cartografate e spazializzate con i poligoni di Voronoi. Sono state ottenute una carta per il periodo di minimo e una carta per il periodo di massimo per permettere una pianificazione delle campagne.

Il periodo di minimo risulta essere generalmente primaverile, tra marzo e maggio, nella zona di Aosta, anticipandosi progressivamente verso est fino all'estremità orientale dove il minimo si registra in gennaio.

Il periodo di massimo estivo appare essere in settembre nella parte occidentale di Aosta, agosto nella parte meridionale della conoide del torrente Buthier e a luglio da Pollein fino all'estremità orientale della piana.

Alla luce di quanto emerso da questo lavoro, sono state rilevate difficoltà nell'applicazione delle linee guida dovute alle caratteristiche della rete di monitoraggio. I dati piezometrici registrati dalle stazioni di monitoraggio risultano lacunose e discontinue, ad eccezione dell'area di Aosta. Le zone occidentale e centro-orientale della piana sono sprovviste di serie sufficientemente lunghe da consentire una valutazione della tendenza dei livelli di falda su lungo periodo. Le serie storiche non sono sempre confrontabili per lunghezza e per risoluzione, rendendo poco significativa un'estensione areale dei risultati puntuali. Pertanto l'applicazione rigorosa delle procedure proposte dalle linee guida nell'ambito della valutazione dei trend non appare percorribile fintanto che permangono tali criticità sulla fonte dei dati.

Per consentire l'applicazione dei test nel futuro è consigliabile un monitoraggio costante e duraturo su alcuni piezometri selezionati lungo la piana, tali da essere rappresentativi dell'intero territorio. I monitoraggi andrebbero condotti con regolarità e cadenza almeno stagionale, registrando i periodi di minimo livello piezometrico primaverile e massimo livello piezometrico estivo con campagne organizzate tenendo conto della variabilità da ovest ad est riscontrata lungo la piana.