



REGIONE SICILIANA
PRESIDENZA



PRESIDENZA
DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI
DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE




Commissario Delegato per l'Emergenza Bonifiche
e la Tutela delle Acque in Sicilia

PIANO DI TUTELA DELLE ACQUE DELLA SICILIA

(di cui all'art. 121 del Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n° 152)



Considerazioni Isotopiche

COORDINAMENTO GENERALE A CURA DI	DOCUMENTO	REDATTO DA	DATA	APPROVATO
 SOGESID SOCIETÀ GESTIONE IMPIANTI IDRICI Unità Operativa di Palermo	D.03	I.N.G.V	DICEMBRE 2007	

CONSIDERAZIONI ISOTOPICHE

(Modellizzazione isotopica delle precipitazioni, Caratterizzazione isotopica dei corpi idrici e indicazioni per la redazione del Piano di Tutela rispetto alle aree di ricarica individuate)

Indice

Idrologia isotopica.....	2
Rete isotopica regionale	13
Composizione isotopica delle precipitazioni in Sicilia	16
Bacino idrogeologico “Monti Iblei”	19
Bacino idrogeologico “Madonie”	32
Bacino idrogeologico “Monti Trapanesi”	40
Bacino idrogeologico “Monte Etna”	47
Bacino idrogeologico “Nebrodi”	56
Bacino idrogeologico “Piana di Marsala – Mazara del Vallo”	61
Bacino idrogeologico “Piana di Castelvetro-Campobello di Mazara”	62
Bacino idrogeologico “Piazza Armerina”	64
Bacino idrogeologico “Peloritani”	66
Bacino idrogeologico “Piana di Catania”	76
Bacino idrogeologico “Monti di Trabia-Termini Imerese”	78
Bacino idrogeologico “Rocca Busambra”	82
Bacino idrogeologico “Sicani”	84
Bacino idrogeologico “Monti di Palermo”	89
Bibliografia	109

Idrologia isotopica

Negli ultimi 50 anni si è sempre più consolidato, nelle indagini di tipo idrologico ed idrogeologico, l'uso degli isotopi stabili dell'acqua (ossigeno ed idrogeno) come traccianti naturali per ottenere informazioni difficilmente conseguibili con altre metodologie di indagine. Il principio guida sta nel fatto che le acque sotterranee che ritroviamo nelle falde idriche derivano dall'accumulo in rocce serbatoio a permeabilità medio-alta, dell'aliquota di precipitazione che si infiltra nel sottosuolo.

Ciò implica l'esistenza di una correlazione diretta tra le precipitazioni e le acque delle sorgenti, dei pozzi e delle gallerie drenanti che vengono utilizzati per gli usi umani.

In particolare, i processi di evaporazione e condensazione che sono alla base del ciclo idrologico influenzano in maniera determinante la distribuzione delle specie isotopiche nelle molecole di acqua. Pertanto, lo studio comparato della composizione isotopica delle precipitazioni e delle acque naturali di un bacino è un valido strumento geochimico per la soluzione di problemi idrogeologici.

Tipiche applicazioni della idrologia isotopica nello studio dei bacini idrogeologici riguardano principalmente:

- La caratterizzazione isotopica delle precipitazioni liquide e solide anche a livello di individuazione di effetti locali prevalentemente dovuti all'orografia e a effetti climatici particolari;
- la definizione delle aree di ricarica dei corpi idrici in funzione delle quote medie di alimentazione;
- la dinamica isotopica dei corpi idrici per ottenere informazioni sulle modalità di circolazione ed alimentazione degli acquiferi.

Le acque meteoriche che si infiltrano nel sottosuolo a differente quota o distanza dal mare, che si originano in stagioni differenti e che hanno seguito diverse modalità di circolazione sotterranea hanno generalmente una differente composizione isotopica. A differenza di molti traccianti chimici, i traccianti isotopici possono essere considerati "conservativi". Infatti le interazioni a seguito di processi organici ed inorganici che l'acqua subisce durante l'infiltrazione e il movimento sotterraneo e/o superficiale hanno un effetto trascurabile sui rapporti isotopici delle acque.

Questo è vero soprattutto per gli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno dell'acqua.

Gli isotopi

Gli isotopi sono atomi di uno stesso elemento che hanno un differente numero di neutroni. Pertanto ciò che distingue due isotopi di uno stesso elemento è il numero di massa, dato dalla somma del numero di protoni (particelle a carica positiva) e del numero di neutroni (particelle elettricamente neutre) che costituiscono il nucleo dell'atomo. A causa delle differenze nel numero di massa due isotopi di uno stesso elemento avranno differenti proprietà fisiche.

Un isotopo si rappresenta con la lettera che costituisce l'elemento preceduto da un numero ad apice, detto appunto numero di massa, che è la somma dei neutroni e dei protoni. Ad esempio, nel caso dell'idrogeno che ha solo un protone, il deuterio è l'isotopo dell'idrogeno che ha un neutrone in più dell'idrogeno. Pertanto l'idrogeno sarà rappresentato con ^1H , mentre il deuterio con ^2H o con la sola lettera D.

Esistono due categorie di isotopi: stabili ed instabili. Si definiscono instabili, i nuclidi che sono soggetti al decadimento radioattivo, che si disintegrano spontaneamente nel tempo per formare ulteriori isotopi, che possono essere, a loro volta stabili o instabili.

Gli isotopi stabili sono invece nuclidi che non decadono, nemmeno in tempi a scala geologica, ma che invece possono essere prodotti dal decadimento di isotopi stabili, come termini intermedi o ultimi della serie di decadimento.

Ciò che determina la stabilità dell'isotopo di un determinato elemento è il rapporto tra il numero di neutroni (N) e quello dei protoni (Z). Per elementi a basso numero di massa, gli isotopi stabili sono caratterizzati da un rapporto N/Z prossimo a 1. quando il numero di massa aumenta, la stabilità isotopica si raggiunge con rapporti N/Z 1.5.

I valori di composizione isotopica degli elementi che vengono usati in idrologia isotopica (H e O) sono generalmente riportati in termini di delta per mille. In pratica questa unità di misura esprime di quante parti per mille il rapporto isotopico considerato si discosta dallo stesso rapporto in un materiale standard a composizione isotopica nota.

I valori in delta per mille vengono calcolati attraverso la seguente espressione:

$$\delta_{\text{‰}} = \frac{(R_{\text{campione}} - R_{\text{s tan dard}})}{R_{\text{s tan dard}}} * 1000$$

dove R denota il rapporto tra l'isotopo più pesante (generalmente il meno abbondante) e quello più leggero (più abbondante). Nel caso specifico delle molecole di acqua i

due rapporti isotopici considerati sono $^2\text{H}/^1\text{H}$ e $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ rispettivamente per l'idrogeno e per l'ossigeno.

Un valore di delta per mille positivo indica che il campione è arricchito negli isotopi più pesanti rispetto allo standard considerato. Esistono dei materiali che sono stati scelti come standards internazionali di riferimento, rispetto ai quali sono riportate le misura isotopiche effettuate in laboratorio. Lo standard è rappresentato, per le acque, dallo SMOW (Standard Mean Ocean Water), che rappresenta il valore medio della composizione isotopica delle acque oceaniche (le quali costituiscono il punto iniziale e finale del ciclo idrologico) e, per definizione è stato posto uguale a zero sia per l'ossigeno sia per l'idrogeno. L'International Atomic Energy Agency (IAEA) che ha sede a Vienna, è l'istituzione internazionale che si occupa della calibrazione degli standards internazionali di riferimento.

Frazionamenti isotopici

Come già anticipato precedentemente, poiché i vari isotopi di uno stesso elemento differiscono per il loro numero di massa, questi avranno anche moderate differenze anche nelle proprietà chimiche e fisiche.

Processi chimico-fisici come le reazioni chimiche o i cambiamenti di fase che dipendono dalla massa causeranno un “frazionamento isotopico”, nel senso che produrranno una variazione nelle relative proporzioni di differenti isotopi di uno stesso elemento nelle varie fasi o nei vari composti. Nel caso dei processi idrologici, il principale processo che causa frazionamento isotopico nelle molecole di acqua è la trasformazione di fase liquido-vapore e viceversa. In pratica, in conseguenza della differenza di massa, le molecole di acqua che contengono ^{16}O evaporeranno più facilmente di quelle con ^{18}O , poiché hanno differenti tensioni di vapore. Il frazionamento isotopico sarà tanto più marcato quanto maggiore sarà la differenza di massa relativa tra i due isotopi. Nel caso dell'acqua è evidente che i frazionamenti maggiori si avranno per l'idrogeno visto che i due isotopi hanno una differenza di massa relativa pari al 50%, mentre minore sarà per l'ossigeno.

Esistono due tipi principali frazionamenti isotopici: frazionamenti all'equilibrio e cinetici.

Frazionamenti all'equilibrio

Processi di scambio isotopico all'equilibrio implicano una ridistribuzione degli isotopi di un elemento tra le varie specie, composti o fasi. Alle condizioni di equilibrio, le velocità di reazione di un particolare isotopo sono uguali. Ciò non significa che la composizione isotopica nelle due fasi sia uguale, ma implica che i rapporti dei differenti isotopi in ciascuna fase si mantengono costanti ad una determinata temperatura.

Nei cambiamenti di fase, i rapporti tra isotopi pesanti e leggeri nelle molecole delle due fasi (ad es. liquido e vapore) cambia. Nei processi di condensazione, un processo che può essere considerato all'equilibrio, gli isotopi più pesanti si concentrano nella fase liquida residuale, mentre gli isotopi leggeri sono arricchiti nella fase vapore.

Il frazionamento all'equilibrio è fortemente dipendente dalla temperatura in maniera inversa: all'aumentare della temperatura le differenze isotopiche tra due fasi tendono a diminuire. Il frazionamento isotopico all'equilibrio tra due fasi, per esempio acqua liquida-vapore, può essere espresso attraverso l'uso del fattore di frazionamento alfa (α):

$$\alpha = \frac{R_{\text{liquido}}}{R_{\text{vapore}}}$$

dove R è il rapporto isotop tra l'isotopo più pesante e quello più leggero.

In termini di notazione-delta lo stesso alfa può essere espresso come:

$$\alpha = \frac{(1000 + \delta_{\text{liq}})}{(1000 + \delta_{\text{vap}})}$$

Frazionamenti cinetici

Si verificano frazionamenti isotopici di tipo cinetico in quei processi chimico-fisici irreversibili, che sono lontani dalle condizioni di equilibrio, o quando per esempio, i “prodotti” vengono isolati fisicamente dai reagenti. I frazionamenti cinetici, a parità di condizioni di temperatura, sono generalmente più marcati di quelli all'equilibrio. In genere, gli isotopi più leggeri hanno legami che sono più facili da rompere degli equivalenti legami degli isotopi pesanti. E' questo il caso del processo di evaporazione, nel quale il vapore che si produrrà sarà arricchito in isotopi leggeri rispetto al liquido da cui si origina.

I frazionamenti isotopici nel ciclo idrologico

Abbiamo già visto che le trasformazioni di fase liquido-vapore hanno una notevole influenza sulla composizione isotopica delle acque nel ciclo idrologico. Le variazioni di composizione isotopica delle acque rendono gli isotopi stabili delle acque utili traccianti naturali nello studio delle dinamiche in bacini idrogeologici.

Vediamo adesso di descrivere meglio dal punto di vista isotopico i processi di condensazione ed evaporazione.

Precipitazioni

Le precipitazioni meteoriche si verificano quando da una massa satura di vapore inizia il processo di condensazione. Dal punto di vista isotopico, le precipitazioni hanno una composizione isotopica più arricchita in isotopi pesanti rispetto al vapore dal quale si sono formate in conseguenza delle differenti tensioni di vapore tra molecole con isotopi pesanti (H_2^{18}O and HD^{16}O) e quelle con isotopi leggeri (H_2^{16}O).

Se riportiamo la composizione isotopica delle precipitazioni che si verificano in tutto il mondo in un diagramma $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$, queste si dispongono lungo un allineamento la cui retta di regressione ha la seguente equazione:

$$\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

Questa retta, chiamata MWL (Meteoric Water Line) mette in relazione la composizione isotopica dell'idrogeno e dell'ossigeno nelle acque di precipitazione a livello mondiale. Essa è caratterizzata da un valore di pendenza pari a 8 e da una intercetta di 10. La pendenza di 8 è data dal rapporto tra i fattori di frazionamento all'equilibrio per l'idrogeno e per l'ossigeno a 25-30°C nella trasformazione vapore-liquido. L'intercetta, chiamata invece "eccesso di deuterio", ha un significato fisico e rappresenta un termine legato al frazionamento cinetico durante l'evaporazione di un'acqua oceanica che evapora ad un'umidità media dell'85%.

La composizione isotopica delle precipitazioni è soggetta ad alcuni importanti effetti spaziali e temporali, che posso essere a scale globale o locale. I più comuni sono : l'effetto latitudine, l'effetto stagionalità, l'effetto continentalità, l'effetto quantità l'effetto "*rainout*" e l'effetto quota.

L'effetto "latitudine" si origina per la progressiva condensazione del vapore delle masse d'aria umide generate alle basse latitudini man mano che si spostano verso

latitudini maggiori. Ciò determina una negativizzazione dei rapporti isotopici dall'equatore verso i poli.

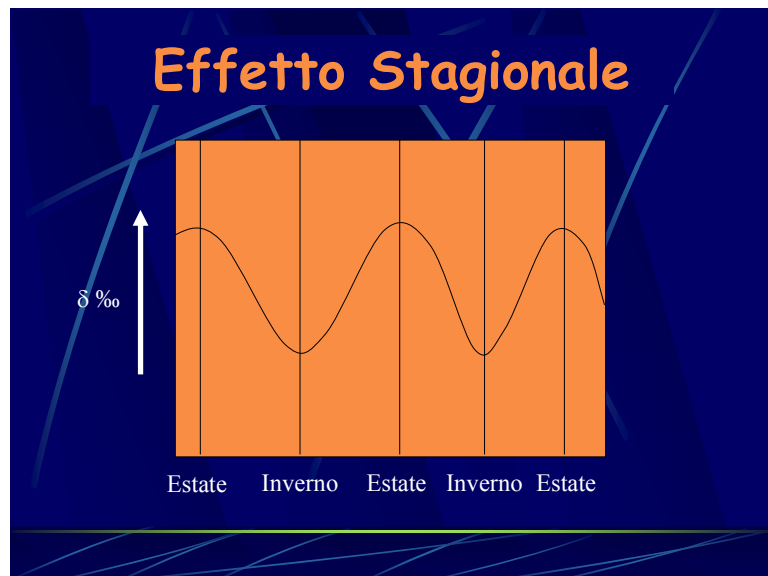


Fig. 1 - Variazione isotopica stagionale

L'effetto "stagionalità" (Fig 1) è legato alla differente temperatura di formazione delle precipitazioni. Come detto precedentemente, i fattori di frazionamento vapore-acqua liquida sono dipendenti dalla temperatura. Pertanto, in una stessa regione, le precipitazioni che avvengono nei mesi freddi sono caratterizzate da composizioni isotopiche negative, mentre le acque meteoriche durante i mesi caldi risultano arricchite in isotopi pesanti e quindi più positive.

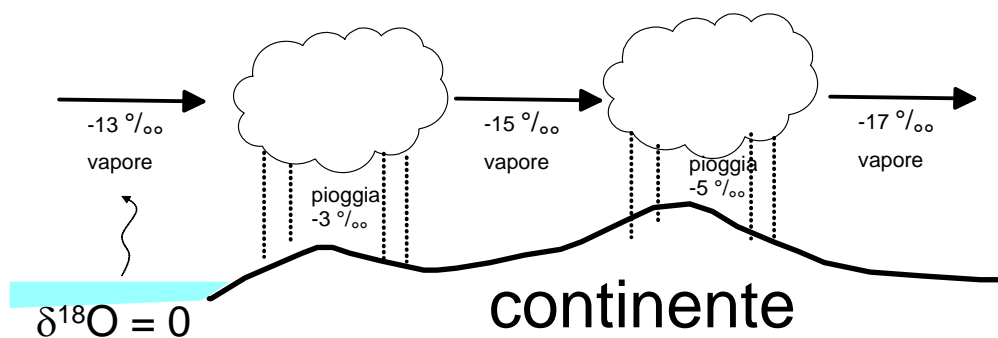


Fig. 2 - Effetto continentalità

L'effetto "continentalità" (Fig.2) produce precipitazioni con valori di composizione isotopica progressivamente più negativi man mano ci si allontana dalla linea di costa.

L'effetto "quantità": in occasioni di eventi meteorici di modesta entità, soprattutto in zone aride, le acque di precipitazione risultano spesso arricchite in isotopi pesanti. Infatti, durante la precipitazione attraversando una colonna d'aria secca le gocce d'acqua sono soggette a processi di rievaporazione.

L'effetto "rainout" si verifica quando una stessa massa d'aria di modeste dimensioni perdendo progressivamente consistenti quantità di vapore provoca una negativizzazione delle precipitazioni al progredire della condensazione.

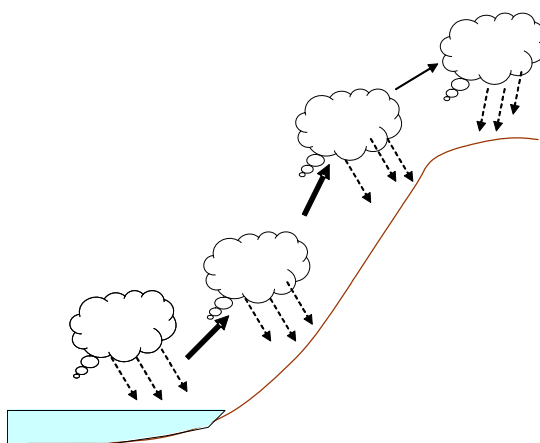


Fig 3 - Effetto quota

Infine, l'effetto "quota" (Fig 3) risulta dalla combinazione tra l'effetto temperatura e l'effetto continentalità. I valori di composizione isotopica delle precipitazioni diminuiscono con l'aumentare della quota. Mediamente si osserva una negativizzazione compresa tra 0.1 e 0.6 delta per mille ogni 100 metri di quota per l'ossigeno e tra 1 e 4 delta per mille ogni 100 m di quota per l'idrogeno.

Appare evidente che questi effetti geografici e climatici non agiscono separatamente ma concorrono contemporaneamente e con differente peso, nel determinare la composizione isotopica delle precipitazioni in un'area.

Peculiari condizioni geografiche e particolari parametri climatici possono dare origine a precipitazioni meteoriche con composizioni isotopiche che però deviano dall'andamento generale delle precipitazioni nel mondo. Un esempio è rappresentato dal bacino del Mar Mediterraneo, dove è stato osservato che il valore di eccesso di deuterio aumenta fino a + 22 in seguito a movimenti convettivi delle masse d'aria umide che generano rievaporazione durante la precipitazione.

Evaporazione

Le nubi che generano precipitazioni sono originate da imponenti masse d'acqua evaporanti come gli oceani, i mari ed, in secondo luogo, anche le acque continentali.

L'evaporazione fraziona gli isotopi dell'idrogeno e dell'ossigeno in funzione della temperatura, ma soprattutto dell'umidità dell'aria. Il processo di evaporazione è un processo all'equilibrio se avviene con umidità del 100%, mentre con valori di umidità minori, al frazionamento all'equilibrio si aggiunge un frazionamento cinetico che dipende dal grado di saturazione dell'aria. Ciò comporta una differenza nei rapporti isotopici delle acque.

Le acque prodotte da evaporazione con umidità minore del 100%, sono caratterizzate da rapporti isotopici con pendenza minore di quella delle acque di precipitazione. A 25°C, la pendenza delle linee delle acque evaporate varia tra 3.9 (umidità 0%) e 6.8 (umidità 85%) mentre quando l'evaporazione avviene a condizioni umidità prossime al 100%, il frazionamento cinetico diventa trascurabile e la pendenza della retta è prossima a 8 (evaporazione all'equilibrio).

Comparazione tra composizione isotopica delle acque meteoriche e delle acque di falda.

In un bacino idrologico, le precipitazioni meteoriche rappresentano la principale ricarica delle acque sotterranee. Di conseguenza le acque di falda hanno una connotazione isotopica che riflette quella delle precipitazioni. In generale, i valori di $\delta^{18}\text{O}$ e δD delle acque sotterranee ricadono in prossimità della retta delle locali precipitazioni e la composizione isotopica media delle acque sotterranee è assimilabile alla media annua della composizione isotopica delle precipitazioni che avvengono nel bacino, ponderata sulla base dell'ammontare mensile. La composizione isotopica media ponderata annua ($\delta^{18}\text{O}_{\text{mp}}$ e $\delta\text{D}_{\text{mp}}$) viene calcolata attraverso le seguenti formule:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{mp}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i * \delta^{18}\text{O}_i}{P_{\text{tot}}} \quad \text{e} \quad \delta\text{D}_{\text{mp}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i * \delta\text{D}_i}{P_{\text{tot}}}$$

dove i si riferisce al mese i -simo (1=gennaio...12=dicembre), P_i è la precipitazione mensile, P_{tot} è la precipitazione annua, e $\delta^{18}\text{O}$ e δD sono i valori isotopici mensili delle precipitazioni. Come già descritto in precedenza, le precipitazioni hanno una variabilità spaziale e temporale della composizione isotopica dovuta ai diversi

“effetti” in precedenza descritti. Sono proprio queste peculiarità che fanno degli isotopi stabili, utili traccianti naturali dei processi di ricarica e di circolazione delle acque sotterranee. Una semplice, e molto spesso utilizzata, applicazione della geochimica isotopica nello studio dei processi di ricarica delle acque sotterranee sfrutta le variazioni indotte dall’effetto dell’altitudine sulla composizione isotopica delle piogge. Il gradiente isotopico verticale delle precipitazioni in un bacino, che esprime numericamente questa negativizzazione isotopica, consente di ricavare, in funzione dei rapporti isotopici delle acque di falda le quote medie delle acque di infiltrazione all’interno del bacino considerato. Da valutazioni di questo genere derivano implicazioni che sono di rilevante importanza per la delimitazione delle aree di ricarica soprattutto nell’ottica di una protezione delle risorse idriche sotterranee da processi di inquinamento. Recentemente l’interpretazione dei dati isotopici si è affinata ulteriormente. E’ infatti grazie alla trattazione statistica dei dati analitici, attraverso con regressioni multiple lineari è possibile ricavare dei modelli di caratterizzazione isotopica delle precipitazioni che non solo tengono in considerazione del solo effetto “quota” ma anche dell’azione congiunta delle variazioni spaziotemporali.

Lo studio dei rapporti isotopici nelle acque di falda può essere utilizzato anche per la individuazione, se tali apporti siano opportunamente differenti, di due o più componenti che concorrono alla ricarica degli acquiferi. Il principio su cui si basa tiene conto delle differenze di composizione isotopica tra il flusso basale delle acque sotterranee e quella di un’altra componente che si infiltra. Questa componente può derivare da un particolare evento piovoso o può avere un’origine differente da quella meteorica (scioglimento di precipitazioni solide, acque di irrigazione provenienti da altri bacini, etc.). Attraverso un bilancio di massa è possibile inoltre stimare quantitativamente l’apporto delle singole componenti. Un tale approccio, consente anche di effettuare una preliminare valutazione dei tempi di residenza delle acque sotterranee.

In acquiferi con alimentazione attraverso condotti carsici, i traccianti isotopici, accoppiati con alcuni costituenti chimici, sono particolarmente utili per la ricostruzione dei circuiti idrogeologici nonché dei sistemi inghiottitoio-risorgenza.

Oltre al valore composizione isotopica media, è altrettanto importante l’escursione annua dei valori della composizione isotopica di una falda. Generalmente le acque sotterranee hanno una variabilità annua ridotta rispetto alle precipitazioni. L’ampiezza

del range dei valori e la correlazione temporale con i principali eventi piovosi consentono di trarre utili indicazioni sui volumi di acqua coinvolti nel processo di ricarica, sul volume dell'acquifero e sui tempi di residenza. Un range di valori ampio indica la presenza di corpi idrici sotterranei di modeste dimensioni e/o circuiti di ricarica abbastanza veloci tali da risentire delle variazioni stagionali della composizione isotopica delle precipitazioni, anche se smorzate. Al contrario, valori di composizione isotopica quasi costanti nel tempo suggeriscono invece l'esistenza di acquiferi di rilevante volume con tempi di corruzione elevati e permeabilità elevata tale da consentire una omogeneizzazione della composizione isotopica degli apporti in falda durante tutto l'anno.

Tuttavia, in molti bacini è stata osservata una differenza sostanziale nella composizione isotopica tra valori medi della falda e la media annua ponderata delle precipitazioni. Ciò è legato al fatto che il processo di ricarica meteorica in falda è complicato da numerosi processi dipendenti da fattori climatici, ambientali, geologici che oltre che ridurre la quantità delle acque che si infiltrano, ne possono modificare anche la composizione isotopica.

Le acque di precipitazione, infatti, si ripartiscono in tre aliquote:

- una parte viene re-immessa nel ciclo idrologico sottoforma di vapore sia quando evapora dai suoli durante l'infiltrazione, sia durante i processi di traspirazione della copertura vegetale. A differenza della traspirazione che non ha alcuna influenza sulla composizione isotopica, l'evaporazione dai suoli impartisce un arricchimento in isotopi pesanti.
- Una seconda parte è rappresentata dalle acque che rimanendo in superficie costituiscono le acque dei laghi, dei fiumi, degli stagni.
- Una terza parte, si infiltra attraverso i suoli fino a raggiungere la zona satura alimentando quindi le falde. La ripartizione delle tre aliquote dipende prevalentemente dalle condizioni climatiche e morfologiche del bacino, dai valori di permeabilità delle litologie presenti nel bacino, dalla distribuzione temporale delle precipitazioni.

Nelle regioni con clima di tipo mediterraneo, l'infiltrazione efficace avviene prevalentemente durante la stagione fredda (da ottobre a marzo), quando le temperature sono più basse e la vegetazione non è particolarmente attiva. In questo periodo, la composizione isotopica delle precipitazioni mostra i valori più negativi ed

allo stesso tempo una ridotta variabilità rispetto alla variabilità annuale delle precipitazioni. Per questo motivo gli acquiferi hanno una composizione isotopica più negativa rispetto alla media ponderata delle precipitazioni e con variazioni annue che sono smorzate rispetto a quelle delle piogge.

Nei climi aridi e semiaridi, dove i processi di evaporazione durante l'infiltrazione sono piuttosto spinti, le acque sotterranee deviano dalla retta locale delle precipitazioni. I corpi idrici in queste aree mostrano invece una composizione isotopica media arricchita in isotopi pesanti (^{18}O e ^2H) rispetto alla media ponderata delle precipitazioni. Inoltre, in conseguenza di un arricchimento isotopico differenziato tra ossigeno ed idrogeno, le acque con una connotazione isotopica tipica di acque evaporate si discostano dalla retta delle precipitazioni e disponendosi su una retta a pendenza inferiore a quella meteorica. Come abbiamo visto in precedenza, la pendenza delle rette che descrivono processi evaporatici variano in funzione della temperatura e del grado di saturazione di vapore in atmosfera, mostrando pendenze variabili tra 3.9 e circa 7.

Negli acquiferi costieri, invece, le differenze osservate tra la composizione isotopica media annua delle acque sotterranee e la media annua ponderata delle precipitazioni possono essere dovute a fenomeni di ingressione marina. In particolare, poiché l'acqua di mare è caratterizzata da valori di composizione isotopica piuttosto positivi ($\delta^{18}\text{O} = +1$ e $\delta\text{D} = +10$) il mixing con acqua di mare, comporta un arricchimento in isotopi pesanti nella composizione isotopica delle acque di falda, oltre che, naturalmente evidenti fenomeni di insalinazione dell'acquifero chimicamente rilevabili.

Un altro processo che può influenzare la composizione degli isotopi di un'acqua è lo scambio isotopico che quest'ultima può avere quando permane per lungo tempo a contatto con le rocce. Tale scambio interessa in pratica solamente l'ossigeno, in quanto la presenza di idrogeno nelle rocce è, in proporzione, molto bassa. In ogni caso, tale scambio è tipico di acque che interessano i sistemi geotermici poiché la sua efficacia è stata osservata con temperature superiori ai 200°C . In questo caso, la composizione isotopica delle acque geotermiche non rispecchia quella media delle precipitazioni avvenute nell'area di ricarica ma mostrerà valori di ^{18}O un po' più positivi di quelli della ricarica meteorica, il valore della variazione dipende dal tipo di roccia serbatoio.

Da queste considerazioni, si può osservare come sia possibile, sulla base della comparazione tra la composizione isotopica delle acque meteoriche e quella delle acque sotterranee, costruire un modello geochimico isotopico finalizzato alla risoluzione di alcuni problemi idrogeologici come la definizione delle quote medie delle zone alimentazione e la delimitazione delle aree di ricarica, la caratterizzazione isotopica dei circuiti, la valutazione dei tempi di circolazione delle acque sotterranee ma anche la stima della effettiva ricarica meteorica.

Rete isotopica regionale

La Sezione di Palermo dell'INGV per l'effettuazione di studi idrogeochimici ed isotopici in aree specifiche ha installato, di volta in volta, piccole reti pluviometriche che nel tempo hanno consentito di ricostruire i riferimenti isotopici di base per lo studio degli acquiferi da indagare.

Per la progettazione e messa in opera della rete isotopica regionale di 50 siti prevista nella convenzione, sono stati inclusi o riattivati vecchi siti che sono rimasti sotto controllo per diversi anni. Va sottolineato che, oltre all'esigenza della raccolta di campioni di precipitazioni adatti alla misura della composizione isotopica, la rete è stata progettata e messa in opera sul territorio anche per colmare una lacuna di informazioni che esiste in Sicilia per le precipitazioni che si verificano nelle aree a quote elevate.

La porzione di rete pluvio-nivometrica con siti per i quali eravamo in possesso di dati storici comprende circa 20 stazioni prevalentemente concentrate in quattro aree che costituiscono i principali acquiferi della Sicilia: l'Etna, i Monti Iblei, la provincia di Trapani e le Madonie.

A partire dal mese di Maggio 2004, sono state installate le 50 stazioni (Fig. 4) in maniera tale da coprire l'intero territorio siciliano con particolare riferimento a quelle aree dove insistono i corpi idrici più significativi. Attualmente sono presenti quindi 50 pluviometri ubicati a quote comprese tra i 5 m s.l.m. (Marina di Ragusa) e 2940 m s.l.m. (Torre del Filosofo) e che ricadono all'interno dei seguenti bacini idrogeologici così suddivisi: 8 sull'Etna, 7 sui M. Iblei, sui M. Peloritani ed in Sicilia Centro-meridionale, 4 sui M. Nebrodi, 3 sui M. Sicani, M. di Trapani, 2 sulle Madonie, sui M. di Palermo e nella Piana di Catania e 1 a Rocca Busambra, a Piazza Armerina, sui Monti di Termini e Trabia, nella piana di Marsala e nella piana di Castelvetro.

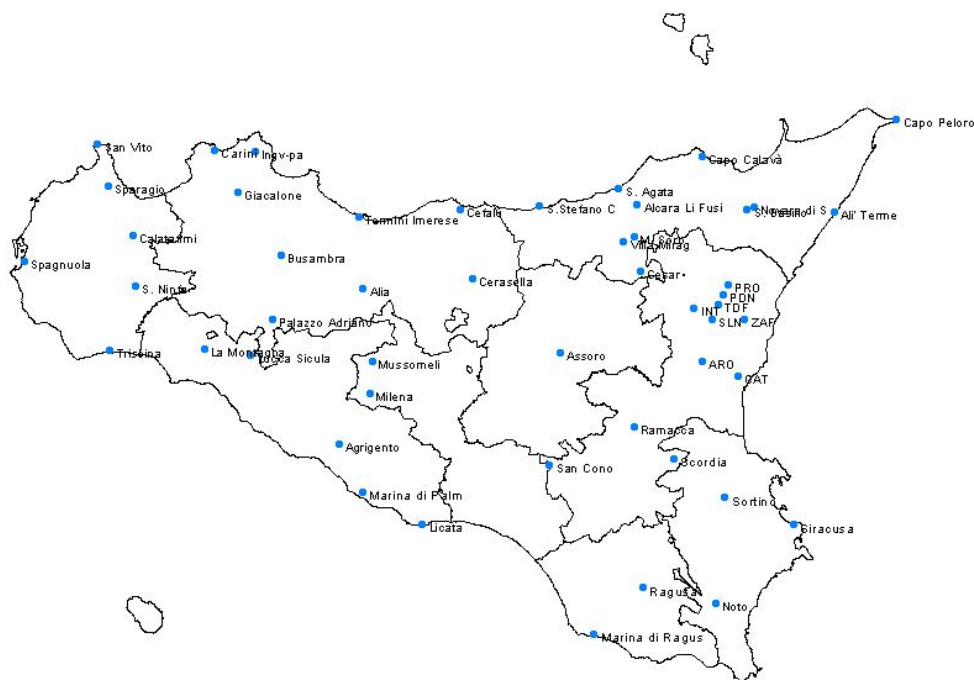


Fig. 4 – Distribuzione della rete nivo-pluviometrica nel territorio della Sicilia

Per mettere in atto strategie di indagine isotopica efficaci è strettamente necessario essere in possesso almeno un anno idrologico completo di dati. Nella presente relazione è stato elaborato un modello isotopica delle precipitazioni della Sicilia, sulla base dei dati isotopici raccolti nei 12 mesi che compongono un anno idrologico completo. In alcune aree dove esistevano dati di studi specifici si è tenuto conto anche di questi. Questo modello è servito come riferimento di base e di confronto con i valori isotopici dei vari corpi idrici per ricavarne indicazioni che ci hanno consentito di effettuare interessanti inferenze sull'individuazione delle aree di ricarica, le modalità di circolazione e quindi la caratterizzazione del corpo idrico.

La descrizione di questi risultati è appresso riportata con una trattazione che riguarda singolarmente prima i singoli bacini idrogeologici e poi i singoli corpi idrici.

La peculiarità delle singole stazioni pluviometriche o nivometriche consiste nella presenza di un liquido (olio di vasellina puro) che viene introdotto all'interno del recipiente che raccoglie le precipitazioni e che disponendosi sulla superficie dell'acqua ne previene l'evaporazione, mantenendo così inalterata la sua composizione isotopica.

Sui campioni di acqua, prelevati con cadenza mensile, sono state misurate la quantità ed è stata determinata anche la composizione isotopica dell'ossigeno e dell'idrogeno.

Le quantità raccolte, espresse in mm di pioggia mensile, e la composizione isotopica, in unità delta rispetto a SMOW, sono riportate nella tabella allegata.

Come si può osservare, i dati pluviometrici raccolti fino a questo momento si riferiscono soltanto ad otto dei dodici mesi dell'anno. Ciò, come precedentemente detto, consente soltanto una parziale analisi interpretativa perché i dati non sono esaustivi per una adeguata modellizzazione isotopica. Infatti, come già evidenziato, nello studio dei processi di ricarica meteorica a scala di bacino idrogeologico finalizzato alla delimitazione delle aree di alimentazione ed alla definizione delle caratteristiche dei circuiti idrogeologici è indispensabile avere dati che coprono un intervallo di tempo almeno pari all'intero anno idrologico.

Le interpretazioni e le modellizzazioni isotopiche di seguito riportate si basano pertanto sui dati isotopici-pluviometrici dei bacini idrogeologici in cui hanno operato precedentemente reti INGV e che ci hanno consentito di integrare, in quelle aree, i dati fino ad ora raccolti.

Composizione isotopica delle precipitazioni in Sicilia

Sulla base dei dati raccolti con la rete pluviometrica progettata e messa in opera dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, a partire dal mese di maggio 2004 viene qui presentato il modello delle distribuzione isotopica delle precipitazione sull'intero territorio dell'isola. Questi dati sono di importanza fondamentale in quanto come spiegato in precedenza costituiscono i dati di riferimento per acquisire informazioni su alcune caratterizzazioni dei corpi idrici.

La composizione isotopica delle precipitazioni è solitamente ben correlata alla quota. Utilizzando i valori medi ponderati in funzione della quantità di pioggia del periodo Maggio 2004 – Giugno 2005, per alcune aree è stato anche tenuto conto di osservazioni effettuate negli anni scorsi, è stato possibile stabilire quale sia il gradiente isotopico verticale di un'area (vedi parte introduttiva).

Considerando simultaneamente i dati relativi a tutta la rete pluviometrica installata sul territorio siciliano, si evince chiaramente la relazione esistente tra quota e composizione isotopica (fig.5).

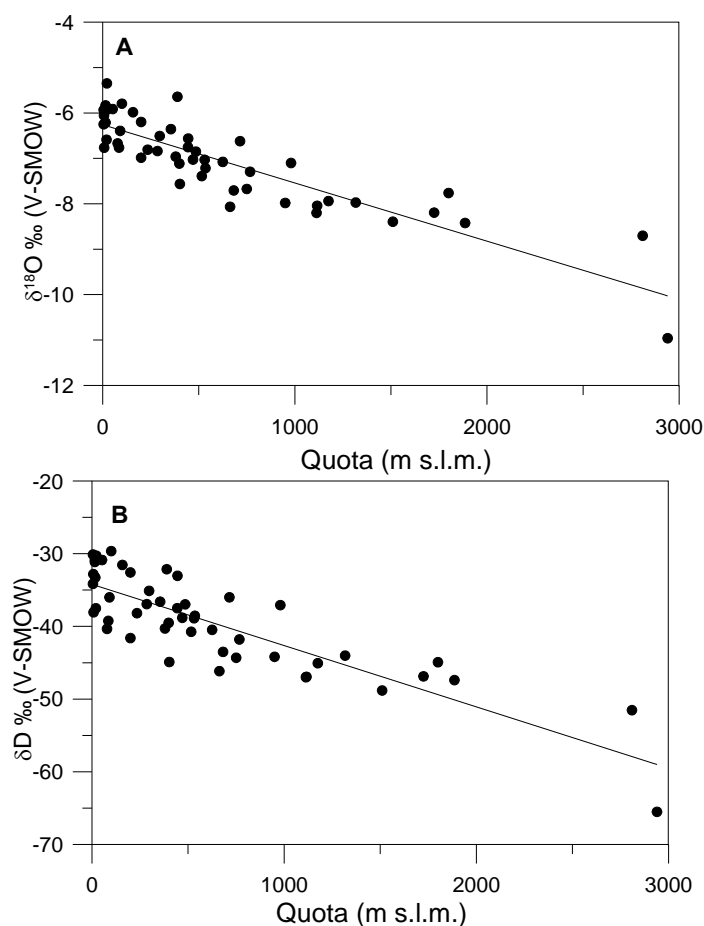


Fig. 5 - δD e $\delta^{18}O$ contro quota

È possibile inoltre stabilire che sul livello del mare, e quindi lungo la costa, la composizione isotopica abbia valori intorno a -6.38‰ e -35‰ rispettivamente per l'ossigeno e l'idrogeno (fig. 6 e 7).

Tuttavia, considerata l'eterogeneità morfologica della Sicilia, si è preferito indagare come varia la composizione isotopica con la quota, suddividendo il territorio nei cinque settori di seguito riportati:

- Sicilia Nord-Occidentale, che comprende Monti di Trapani, Monti di Palermo, Rocca Busambra, Madonie.
- Sicilia Nord-Orientale, che comprende Monti Nebrodi e Monti Peloritani.
- Etna, considerato singolarmente in quanto costituisce una anomalia morfologica.
- Monti Iblei, considerato singolarmente in quanto costituisce un altopiano molto esteso.
- Sicilia Sud-Occidentale, che comprende l'area tra i Monti Erei e Capo Lilibeo.

Il coefficiente angolare dell'equazione della regressione lineare dei punti nel piano quota-composizione isotopica indica il gradiente isotopico, mentre l'intercetta indica quale sia il valore della composizione isotopica a quota zero. Dalla combinazione di questi due parametri è possibile calcolare quale sia la composizione isotopica attesa per una data quota e, viceversa, data la composizione isotopica di un'acqua di falda è possibile stabilire quale sia la quota media del bacino di alimentazione.

Nell'area della Sicilia Nord-Occidentale è stato determinato un gradiente isotopico verticale pari a $-0,17\delta^{18}\text{O‰}/100\text{ m}$ ed un valore di intercetta pari $-6,6\delta^{18}\text{O‰}$. In questa area si riscontrano i valori più negativi lungo la costa.

Nell'area della Sicilia Nord-Orientale è stato determinato un gradiente isotopico verticale pari a $-0,13\delta^{18}\text{O‰}/100\text{ m}$ ed un valore di intercetta pari $-6,2\delta^{18}\text{O‰}$.

Nell'area dell'Etna è stato determinato un gradiente isotopico verticale pari a $-0,16\delta^{18}\text{O‰}/100\text{ m}$ ed un valore di intercetta pari $-5,6\delta^{18}\text{O‰}$. In questa area si riscontrano i valori più positivi lungo la costa.

Nell'area dei Monti Iblei è stato determinato un gradiente isotopico verticale pari a $-0,15\delta^{18}\text{O‰}/100\text{ m}$ ed un valore di intercetta pari $-6,0\delta^{18}\text{O‰}$.

Nell'area della Sicilia Sud-Occidentale è stato determinato un gradiente isotopico verticale pari a $-0,21\delta^{18}\text{O‰}/100\text{ m}$ ed un valore di intercetta pari $-6,0\delta^{18}\text{O‰}$. In questa area si riscontra il gradiente isotopico più elevato.

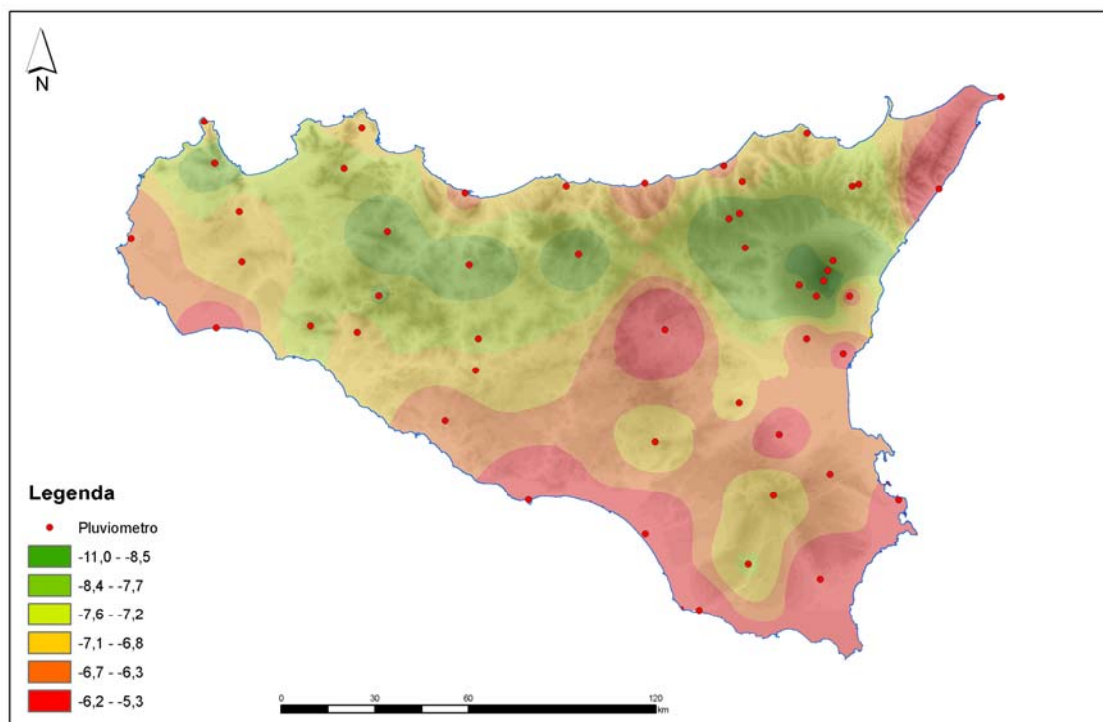


Fig.6 - Carta della composizione isotopica dell'Ossigeno della ricarica meteorica

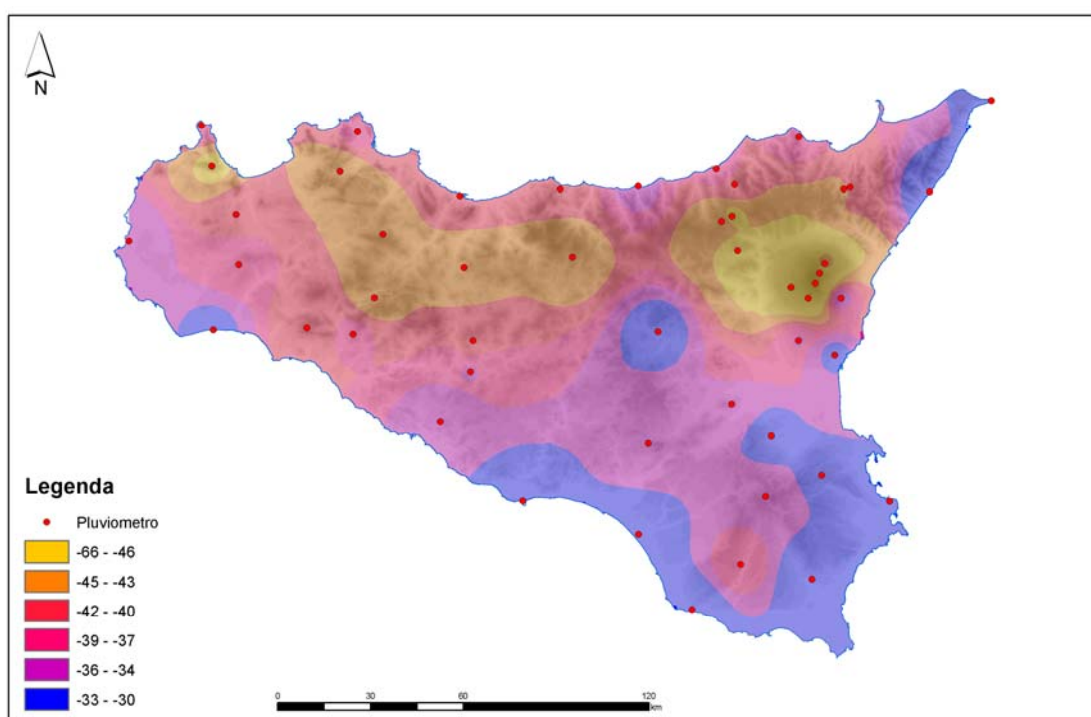


Fig. 7 - Carta della composizione isotopica dell'Ossigeno della ricarica meteorica

Bacino idrogeologico “Monti Iblei”

La rete pluviometrica dei Monti Iblei consta di 6 stazioni, ubicate lungo due direzioni preferenziali (NNE-SSW e E-W) ed a quote comprese tra 5 m. s.l.m. di Marina di Ragusa 986 m s.l.m. di Monte Lauro. Dal punto di vista topografico, i Monti Iblei sono caratterizzati dalla presenza di un esteso altopiano carbonatico che raggiunge la sua quota più elevata nel rilievo di Monte Lauro (986 m s.l.m.). A margine dell’altipiano si trovano aree a quote inferiori che sul versante occidentale, meridionale ed orientale rappresentano le zone costali. Il clima risulta essere differenziato tra le aree sommitali e quelle distali. Le prime sono caratterizzate da temperature medie annue di 13-15°C in cui le precipitazioni, che avvengono prevalentemente in forma liquida, con occasionali nevicate, risultano essere piuttosto cospicue (700-900 mm/annui). Nelle area distali, si registrano sia temperature medie più elevate (17-19°C) sia precipitazioni meno abbondanti (350-450 mm/annui). Un confronto con le località della Sicilia settentrionale poste ad uguale quota evidenzia che a fronte di temperature medie dell’aria comparabili, i valori di precipitazione sugli Iblei sono drasticamente inferiori ed in taluni casi ridotti anche del 50%. Un tale aspetto, che ha ricadute importanti sui processi di alimentazione delle acque sotterranee, ha incoraggiato un dettagliato studio sulle dinamiche delle perturbazioni con particolare riferimento alla loro origine.

I dati pluviometrici riportati si riferiscono alle osservazioni mensili delle 6 stazioni nel periodo compreso tra il febbraio 1999 ed il giugno 2005. I valori di composizione isotopica mostrano un ampio intervallo, sia temporale che spaziale. Come era prevedibile, i valori più negativi sono stati registrati nei mesi invernali con un valore minimo di -11.8 e -72, rispettivamente per il $\delta^{18}\text{O}$ and δD nel mese di gennaio 2000 alla stazione di Monte Lauro, mentre i valori più positivi (-0.6 per $\delta^{18}\text{O}$ alla stazione di Scordia e +1 per il δD al pluviometro di Siracusa entrambi nel mese di Maggio 2000) sono stati osservati all’inizio della stagione estiva. Questa variabilità temporale riflette la variazione stagionale della temperatura dell’aria, essendo quest’ultima uno dei fattori più importanti che influenza la composizione isotopica delle precipitazioni.

Se rappresentiamo tutte le precipitazioni mensili che sono avvenute nel periodo considerato in un diagramma $\delta\text{D}/\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 8) ci accorgiamo che queste si dispongono all’interno delle due rette meteoriche di riferimento: quella a livello mondiale (MWL) e quella relativa al Bacino del Mare Mediterraneo (MMWL).

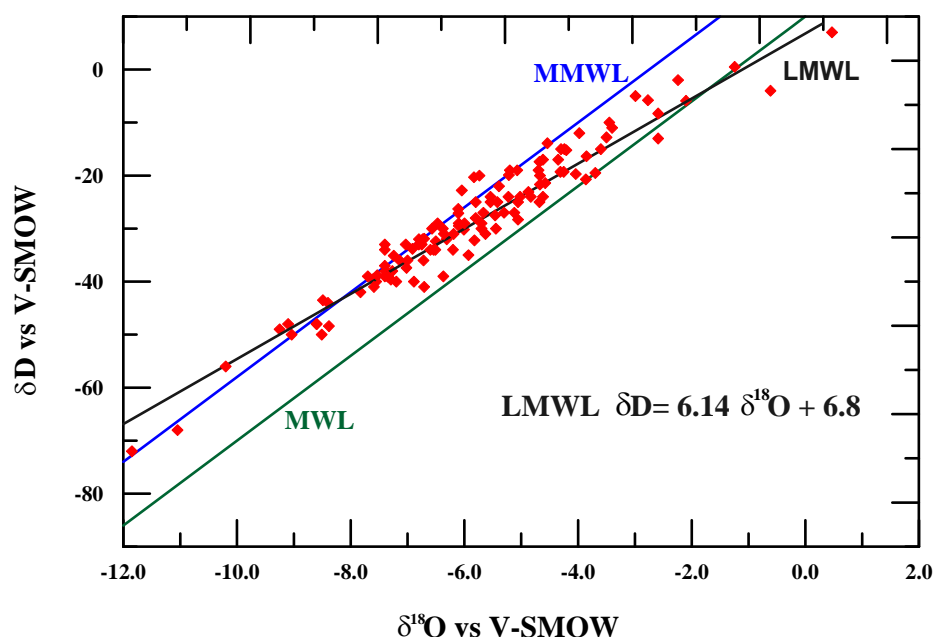


Fig.8 - Precipitazioni mensili

Attraverso una regressione lineare è stata ottenuta una retta la cui equazione rappresenta l'andamento della composizione isotopica delle piogge sull'altopiano ibleo e che prende il nome di retta locale delle acque meteoriche. Per i Monti Iblei la retta è la seguente:

$$\delta D = 6.14 \delta^{18}O + 6.8$$

Come già descritto precedentemente, il valore della pendenza della retta meteorica può essere usato come indicatore dei processi che caratterizzano gli eventi piovosi. In particolare, si nota che il valore di pendenza (6.1) è inferiore a quello (8) delle due rette di riferimento (MWL e MMWL). Ciò indica che dal punto di vista isotopico, le precipitazioni che hanno luogo sui Monti Iblei riflettono un carattere di tipo locale e non possono essere ricondotte a principi generali di idrologia isotopica.

In particolare, le pendenze che si discostano da 8 verso valori inferiori, indicano il verificarsi di frazionamenti isotopici non soltanto all'equilibrio, ma con una componente di tipo cinetico. In questo caso, l'assetto climatico dell'area suggerisce la presenza di processi di rievaporazione delle gocce di pioggia dopo la loro formazione, quando condizioni di temperatura ed umidità dell'aria sono favorevoli. Tale processo risulta essere quindi molto più spinto nelle aree distali piuttosto che in quelle sommatiali. Infatti, nelle zone a bassa quota dove le temperature sono molto più

elevate il tempo che intercorre tra la formazione delle piogge e la raccolta nei pluviometri è maggiore.

Lo studio della composizione isotopica delle piogge sull'altopiano ibleo è stato anche finalizzato all'individuazione della provenienza delle masse d'aria umide responsabili delle precipitazioni che poi alimentano le acque sotterranee. Per tale scopo è stato calcolato "l'eccesso in deuterio" (d) calcolato come $d = \delta D - 8 \cdot \delta^{18}O$ che è indicativo dell'origine delle perturbazioni e che, caratterizzando le precipitazioni, è tra i marker isotopici di riferimento, utilizzabili per risalire al rapporto precipitazioni/acquiferi che sta alla base di questi tipo di indagini. Infatti, le piogge originate dall'evaporazione di acque oceaniche (atlantiche) hanno un eccesso deuterio prossimo a 10, mentre le perturbazioni che hanno origine del bacino chiuso del Mare Mediterraneo sono caratterizzate da un eccesso in deuterio che può raggiungere il valore di 22. Nel periodo considerato, le piogge sui Monti Iblei hanno valore di eccesso in deuterio medio annuo ponderato sulle quantità mensili di precipitazione pari a + 21.2. A differenza di quanto accade nel versante settentrionale dell'isola, le perturbazioni più significative che costituiscono la ricarica delle acque sotterranee hanno invece una provenienza prevalente dai settori meridionali piuttosto che da quelli settentrionali. Le perturbazioni mediterranee sono caratterizzate da dimensioni piuttosto limitate rispetto a quelle atlantiche e questo spiega la cospicua differenza nella quantità annua di precipitazioni che c'è tra stazioni dell'altopiano ibleo e quelle della Sicilia Nord-Orientale poste a pari quota.

Allo scopo di determinare i principali fattori che caratterizzano dal punto di vista isotopico le piogge in quest'area, i dati pluviometrici ed isotopici sono stati trattati con metodi statistici. In particolare, attraverso correlazioni multiple e regressioni lineari la composizione isotopica dell'ossigeno delle piogge è stata messa in relazione con i parametri climatici (ammontare delle precipitazioni e temperatura media dell'aria) ed ambientali (quota) dell'area di studio. È stata quindi costruito un modello isotopico che attraverso la seguente equazione:

$$\delta^{18}O_{wm} = -4.47 - 0.096T - 0.003 Q + 0.0009 P$$

esprime, con buona approssimazione ($r^2=0.94$) la variabilità spaziale dei valori medi ponderati della composizione isotopica dell'ossigeno in funzione non di un solo parametro, come avviene per il gradiente isotopico, ma di una serie di parametri che hanno un ruolo nella formazione delle caratteristiche isotopiche delle precipitazioni.

La relazione così ottenuta ha permesso di estrapolare un valore di composizione isotopica anche per i siti della rete termo-pluviometrica del Servizio Idrografico della Regione Siciliana, dei quali si conosce l'altitudine, e per i quali sono stati calcolati i valori medi annui di precipitazione e temperatura su serie storiche cinquantennali. Si è costruita così una rete di pluviometri fittizi che ha consentito di elaborare una mappa che restituisce in forma grafica il modello di isotopico ottenuto per le precipitazioni sugli Iblei (Fig. 9). L'andamento delle linee di isocomposizione isotopica evidenzia un effetto "continentalità" nelle aree settentrionali confermando così che le perturbazioni che generano precipitazioni si originano a sud e si muovono prevalentemente verso Nord.

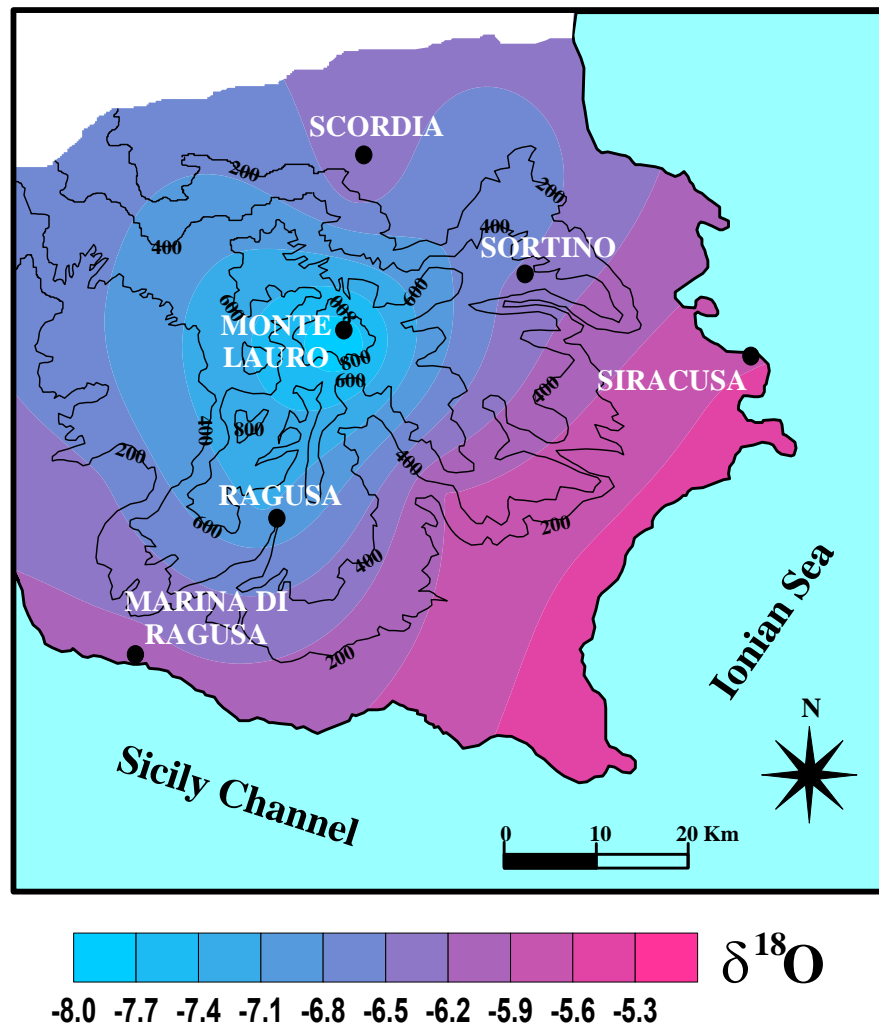


Fig. 9 - Modello isotopico del $\delta^{18}O$ delle precipitazioni

E' stata calcolata quindi la composizione isotopica media delle acque di infiltrazione ($\delta^{18}\text{O}_{\text{inf}}$)

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{inf}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_{\text{eff}} * \delta^{18}\text{O}_i}{P_{\text{eff}}}$$

mediata ponderalmente sulla precipitazione efficace mensile (P_{eff}) ottenuta sottraendo all'ammontare delle precipitazioni mensili, le aliquote relative alla evapotraspirazione potenziale ed al ruscellamento superficiale.

I valori ottenuti sono di poco più negativi rispetto a quelli della media ponderata delle precipitazioni, poichè la maggior parte della infiltrazione efficace ha luogo durante la stagione fredda, quando la composizione isotopica è più negativa, mentre nel restante periodo dell'anno le acque sotterranee non ricevono alcuna ricarica meteorica significativa.

I valori isotopici delle acque sotterranee dei corpi idrici significativi presenti sull'altopiano ibleo sono stati comparati con quelli delle acque di infiltrazione (fig.10)

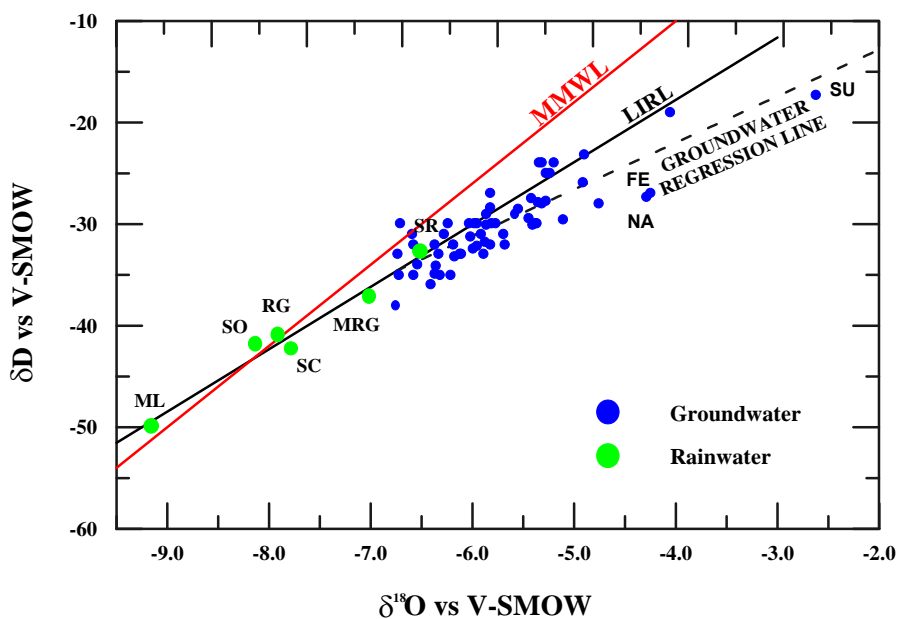


Fig. 10 - Valori isotopici delle acque sotterranee dei corpi idrici significativi e delle precipitazioni.

Dal confronto sul diagramma $\delta\text{D}/\delta^{18}\text{O}$ si evidenziano due peculiarità: la prima è che le acque di falda ricadono alla destra della retta locale delle acque meteoriche con valori di δD e $\delta^{18}\text{O}$ più positivi rispetto a quelli che competono alla ricarica teorica calcolata per il bacino. La seconda peculiarità è che la retta di regressione delle acque

sotterranee ha una pendenza inferiore (4.85) rispetto ai valori delle acque di precipitazione (6.85). Entrambi gli aspetti evidenziano che le acque di ricarica meteorica durante l'infiltrazione subiscono processi secondari che ne alterano la originaria connotazione isotopica. L'instaurarsi di processi di evaporazione è la più probabile spiegazione capace di giustificare una tale modificazione nella composizione isotopica nelle acque di falda. Tuttavia, un contributo in falda di acque superficiali contenute in alcuni invasi artificiali quali la diga sul fiume Anapo e quella di S. Rosalia sul fiume Irminio e che sottoposte ad evaporazione non può essere escluso.

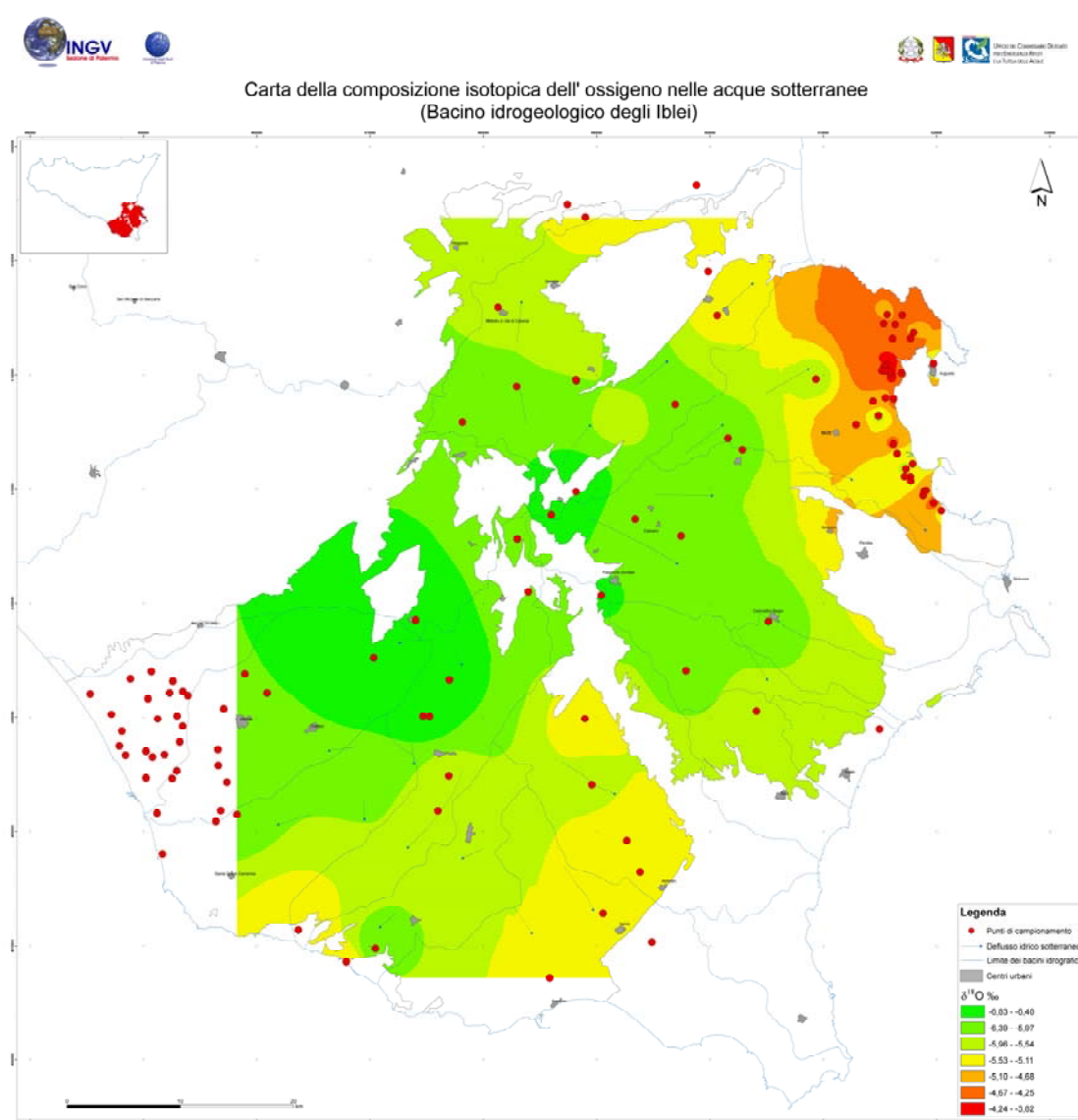


Fig. 11 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ dei Monti Iblei

Incrociando il dato isotopico con quello chimico è stato possibile individuare, anche in accordo con l'assetto climatico ed idrostrutturale dell'area, la ricarica meteorica dei corpi idrici del bacino idrogeologico “Monti Iblei”.

La mappa di fig. 11 mette in evidenza che la falda ha caratteristiche più negative nel settore di monte Lauro, anche se, per i motivi spiegati precedentemente i valori non raggiungono mai i -7 delta ‰.

Dal confronto dei valori di $\delta^{18}\text{O}$ e δD delle sorgenti e delle piogge sono state identificate le aree di ricarica dei vari corpi idrici.

Siracusano nord orientale

Il corpo idrico Siracusano nord-orientale è costituito da vulcaniti subaeree e subacquee e da depositi carbonatici.

Le composizioni isotopiche dei siti monitorati indicano che la ricarica meteorica del corpo idrico Siracusano nord-orientale è compatibile con un'alimentazione di tutto il corpo idrico, sia dai settori a quota più elevata che da quelli a quota inferiore, per cui la connotazione isotopica risulta di alimentazione da zone medio basse. I settori più orientali del corpo idrico risentono isotopicamente della presenza, in questa zona, di alcune sorgenti termali che sono più positive.

Questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono e mantenerlo, così come in tutta il bacino idrogeologico ibleo, è necessario porre dei limiti e quindi tenere sotto controllo lo sviluppo di agricoltura intensiva e attività industriale ad alto impatto. Tutto ciò ha chiaramente una certa difficoltà operativa connessa alla morfologia di altipiano dei monti Iblei su cui vengono effettuate tutte le attività umane.

In queste zone è assolutamente necessario tenere sotto controllo anche gli attingimenti in falda.

Lentinese

Il corpo idrico Lentinese si estende in affioramento nelle zone comprese tra Monte Lauro, Scordia e Punta Castelluccio. Il corpo idrico è costituito da vulcaniti, subaeree e subacquee verificate nel Pliocene e nel Pleistocene inferiore.

Le composizioni isotopiche dei siti monitorati indicano che la ricarica meteorica del corpo idrico lentinese è compatibile con un'alimentazione di tutto il corpo idrico, sia dai settori a quota più elevata che da quelli a quota inferiore, per cui la connotazione

isotopica risulta di alimentazione da zone medio basse. I settori più orientali del corpo idrico sono più positivi e la loro alimentazione è probabilmente relazionata all'alimentazione di settiri a bassa quota del corpo idrico. Questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono e mantenerlo, così come in tutta il bacino idrogeologico ibleo, è necessario porre dei limiti e quindi tenere sotto controllo lo sviluppo di agricoltura intensiva e attività industriale ad alto impatto. Tutto ciò ha chiaramente una certa difficoltà operativa connessa alla morfologia di altipiano dei monti Iblei su cui vengono effettuate tutte le attività umane.

In queste zone è assolutamente necessario tenere sotto controllo anche gli attingimenti in falda.

Ragusano

Il corpo idrico Ragusano è costituito da una sequenza carbonatica che occupa il settore più occidentale dell'altipiano Ibleo. Morfologicamente il corpo idrico è costituito da un blocco degradante verso Ovest e Sud-Ovest che si raccorda con la piana di Comiso-Vittoria con una serie di strutture ribassate per faglia.

I terreni risultano profondamente incisi in corrispondenza dei corsi d'acqua del Fiume Irmínio, della fiumara di Modica, del Fiume Tellarò e della Cava d'Ispica.

Le composizioni isotopiche dei siti monitorati indicano che la ricarica meteorica del corpo idrico Ragusano è compatibile con un'alimentazione di tutto il corpo idrico, sia dai settori a quota più elevata che da quelli a quota inferiore, per cui la connotazione isotopica risulta di alimentazione da zone medio basse. I settori più orientali del corpo idrico sono più positivi e la loro alimentazione è probabilmente relazionata all'alimentazione di settori a bassa quota del corpo idrico. Questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono e mantenerlo, così come in tutta il bacino idrogeologico ibleo, è necessario porre dei limiti e quindi tenere sotto controllo lo sviluppo di agricoltura intensiva e attività industriale ad alto impatto. Tutto ciò ha chiaramente una certa difficoltà operativa connessa alla morfologia di altipiano dei monti Iblei su cui vengono effettuate tutte le attività umane.

In queste zone è assolutamente necessario tenere sotto controllo anche gli attingimenti in falda.

Siracusano Meridionale

Il corpo idrico Siracusano meridionale è costituito da una successione di depositi

carbonatici, calcareo-calcarenitici.

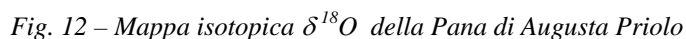
L'acquifero carbonatico interessa la maggior parte della Provincia di Siracusa con esclusione della porzione settentrionale. L'altipiano carbonatico si presenta interessato da profonde incisioni quali il Fiume Anapo–Cassibile– Cavadonna degradanti verso la piana di Siracusa.

Le composizioni isotopiche dei siti monitorati indicano che la ricarica meteorica del corpo idrico Siracusano meridionale è compatibile con un'alimentazione di tutto il corpo idrico, sia dai settori a quota più elevata che da quelli a quota inferiore, per cui la connotazione isotopica risulta di alimentazione da zone medio basse.

Questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono e mantenerlo, così come in tutta il bacino idrogeologico ibleo, è necessario porre dei limiti e quindi tenere sotto controllo lo sviluppo di agricoltura intensiva e attività industriale ad alto impatto. Tutto ciò ha chiaramente una certa difficoltà operativa connessa alla morfologia di altipiano dei monti Iblei su cui vengono effettuate tutte le attività umane.

In queste zone è assolutamente necessario tenere sotto controllo anche gli attingimenti in falda.

Il corpo idrico della Piana di Augusta-Priolo è uno dei corpi idrici che hanno maggiori potenzialità che hanno una compromissione abbastanza accentuata sia per motivazioni qualitative che quantitative.



28

sovrasfruttamenti di questo corpo idrico.

Lo stato ambientale del corpo idrico è complessivamente scadente. La presenza lungo la fascia costiera diverse attività industriali significative incide tanto sulla qualità delle acque quanto sulle quantità di acqua edotta rispetto alle potenzialità del corpo idrico. Quindi, ai fini della redazione del piano di tutela delle acque, va sottolineato che lo stato ambientale scadente del corpo idrico è relazionato sia alla contaminazione derivata dalle attività industriali che dal sovrasfruttamento di questa falda. Le azioni da compiere per il recupero del corpo idrico vanno dal severo controllo dei reflui delle attività industriali e antropiche alla limitazione ed il controllo degli attingimenti in falda che sono anch'esse fortemente correlate alle notevoli esigenze idriche del tipo di attività industriali che vengono effettuate nella zona di Augusta.

Va anche sottolineato che attualmente l'attingimento principale nell'area viene effettuato su una falda che fino a circa 20 anni fa era in pressione adesso il livello di questo acquifero è stato abbassato di alcune decine di metri, quindi va controllato anche l'attingimento un questo acquifero. Vanno anche dettate alcune norme per evitare che le acque contaminate possano, attraverso i pozzi scavati, inquinare anche l'acquifero profondo.

Piana di Vittoria

Il corpo idrico della Piana di Vittoria è costituita in affioramento da depositi pleistocenici arenaceo-sabbiosi con intercalati livelli limoso-argillosi. Al di sotto sono presenti i depositi carbonatici e marnosi dell'Avampaese Ibleo.

Il corpo idrico della Piana di Vittoria ha notevoli potenzialità idriche anche se presenta uno stato ambientale abbastanza compromesso sia per motivazioni qualitative che quantitative.

La mappa di fig. 13 indica che la composizione isotopica dei siti di monitoraggio è relazionabile con una ricarica meteorica proveniente da aree di alimentazione di bassa quota compatibile con l'altezza dei sedimenti affioranti nella piana.

Carta della composizione isotopica dell'ossigeno nelle acque sotterranee
(Corpo idrico della Piana di Vittoria)

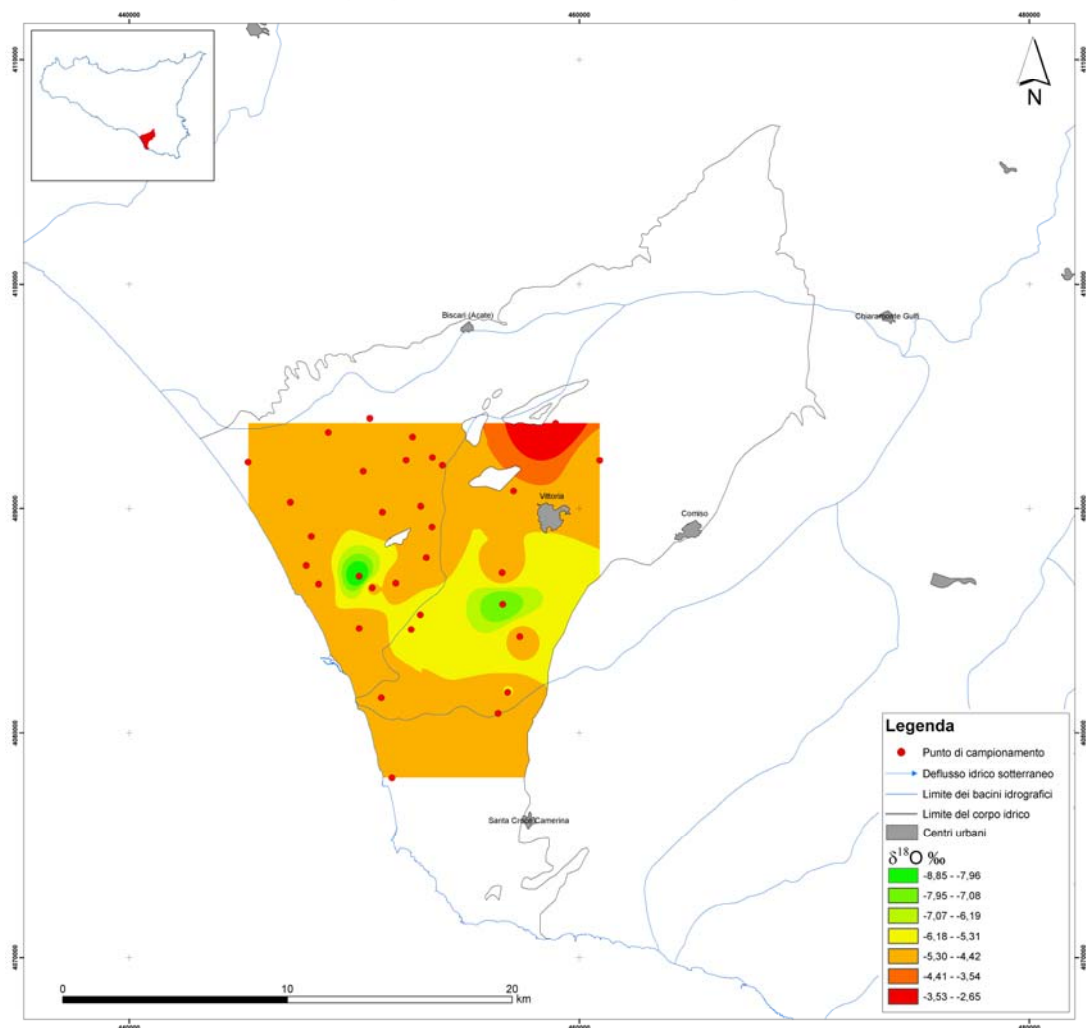


Fig. 13 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ della Piana di Vittoria

Lo stato ambientale del corpo idrico è complessivamente scadente. La presenza all'interno della piana di attività agricole intensive incide tanto sulla qualità delle acque quanto sulle quantità di acqua edotta rispetto alle potenzialità del corpo idrico. Quindi, ai fini della redazione del piano di tutela delle acque, va sottolineato che lo stato ambientale scadente del corpo idrico è relazionato sia alla contaminazione derivata dalle attività agricole che al sovrasfruttamento di questa falda. Le azioni da compiere per il recupero del corpo idrico vanno dalla severa limitazione e controllo dell'uso dei fertilizzanti nelle attività agricole, nel controllo dei reflui di origine antropica ed alla limitazione ed il controllo degli attingimenti in falda che sono

anch'esse fortemente correlate alle notevoli esigenze idriche del tipo di attività agricola intensiva che viene effettuate nella piana.

Nella mappa sono evidenti due siti con connotazione isotopica molto negativa che indica aree di alimentazione di quota molto elevata. Questi pozzi educono acqua da una falda profonda in pressione impostata nelle porzioni carbonatiche degli iblei (f.ne Ragusa) che viene protetta dalla contaminazione dell'acquifero superficiale da una formazione impermeabile di natura marnosa (f.ne Tellaro). Va anche sottolineato che attualmente tutte le aziende agricole tendono ad attingere acque da questa falda che attualmente è ancora in pressione, quindi andrebbe preservata con un severo controllo sull'attingimento. Vanno anche dettate alcune norme per evitare che le acque contaminate dell'acquifero superficiale possano, attraverso i pozzi scavati, inquinare anche l'acquifero profondo.

Bacino idrogeologico “Madonie”

Sui Monti delle Madonie, le metodologie di indagine isotopica sono state applicate con lo scopo di modellizzare la distribuzione spaziale della composizione isotopica delle precipitazioni atmosferiche. Inoltre gli isotopi stabili sono stati utilizzati come marker geochimici per la ricostruzione delle aree di ricarica dei corpi idrici della zona e per la ricostruzione dei modelli di flusso e dei circuiti idrogeologici. Nell'area madonita, possiamo distinguere due zone con caratteristiche climatiche diverse: una fascia litoranea o sublitoranea, caratterizzata da altitudini inferiori ai 300 m e regime termico tipico delle aree mediterranee, con variabilità stagionale meno marcata e temperature medie annue minime e massime piuttosto contenute, favorite anche dall'effetto-tampone del mare. La seconda zona è quella della fascia montuosa interna, più a Sud, in cui il clima tende maggiormente ad assumere caratteristiche di continentalità, ossia forti escursioni stagionali e temperature medie annue minime e massime più accentuate. Questa differenziazione ha notevole influenza sui processi dipendenti dalla temperatura, quali ad esempio la variabilità spaziale e temporale della composizione isotopica delle precipitazioni atmosferiche. Per quanto riguarda le precipitazioni, la distribuzione delle stazioni pluviometriche del Genio Civile non copre adeguatamente l'intero territorio, lasciando scoperte le aree topograficamente più elevate. Tuttavia nella fascia costiera le piogge medie annue sono intorno ai 500-600 mm mentre, nella fascia montuosa che raggiunge quasi quota 2.000 m dove conseguentemente si verificano cospicue precipitazioni che raggiungono anche i 1300 mm/annui, in questa zona anche la neve ha un ruolo importante.

L'attuale rete pluviometrica isotopica nell'area madonita consta di due pluviometri ed un pluvio-nivometro ubicati rispettivamente a Cefalù (a livello del mare) Isnello (500 m s.l.m.) e P.Battaglia (1600 m s.l.m.). I dati ottenuti sono stati confrontati con quelli degli studi isotopici delle precipitazioni nell'area effettuati negli anni 70 e nei primi anni 90. I valori di composizione isotopica ($\delta^{18}\text{O}$) medio ponderato a Piano Battaglia (-8.4‰), sono in perfetta congruenza (-8.7‰) con quelli misurati in Passato, così come quelli della

stazione di Cefalù, (-5.4‰) posta sul livello del mare concordano con quelli della stazione di Palermo (-5.5‰).

Il confronto tra i dati si evidenzia chiaramente che le precipitazioni nevose giocano un ruolo secondario nella determinazione della composizione isotopica media annua, almeno per ciò che riguarda la fascia non superiore ai 1500 m s.l.m. Infatti, mentre il dato del 1978 si riferisce esclusivamente alle precipitazioni liquide, il dato attuale, lievemente più positivo, è comprensivo sia delle precipitazioni solide sia di quelle liquide.

Un discorso differente deve invece essere fatto per la fascia superiore ai 1600m, dove i dati relativi ai campionamenti occasionali effettuati nel corso di due nevicate mostrano chiaramente che proprio a partire dai 1600 m slm la composizione isotopica della neve tende rapidamente a valori molto più negativi, con un minimo di quasi -15‰ a P.zo Carbonara (1979 m). Questa peculiarità consente di “marcare” isotopicamente le aree di alimentazioni delle sorgenti di Scillato.

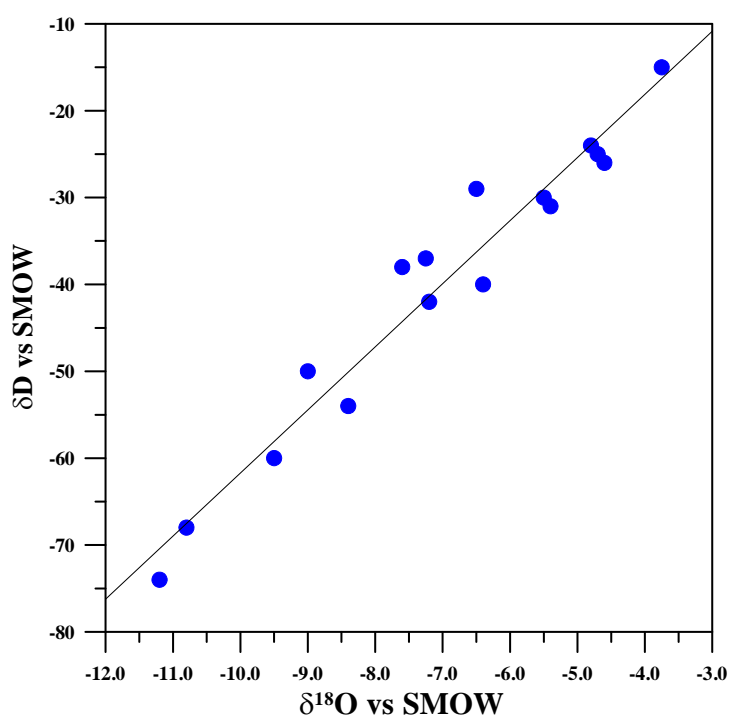


Fig. 14 - Retta di regressione lineare delle precipitazioni

La correlazione lineare tra $\delta^{18}\text{O}$ e δD (Fig. 14), espressa attraverso la retta di regressione lineare, relativa alla composizione isotopica delle precipitazioni campionate e che rappresenta la retta meteorica delle piogge nell'area delle

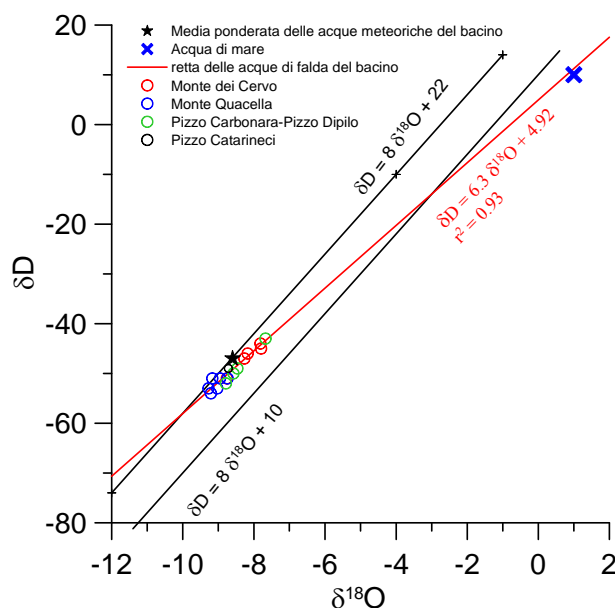


Fig.15 – Confronto tra la retta locale e la MWL ed MMWL

Madonie, viene descritta dall'equazione $\delta\text{D} = 6,3 \cdot \delta^{18}\text{O} + 4,92$, con un coefficiente di correlazione pari a 0.93.

Anche in quest'area, condizioni climatiche e topografiche locali, provocano deviazioni sia rispetto all'equazione valida su scala globale (MWL) sia rispetto a quella del Mediterraneo Orientale (MMWL) (Fig.15). L'equazione verificata per i dati delle Madonie, è caratterizzata da un coefficiente angolare minore rispetto a quelle generali. Questo comportamento è del tutto analogo a quanto osservato in stazioni poste in aree caratterizzate da climi aridi o semi-aridi. I dati isotopici indicano che i fenomeni di condensazione e precipitazione sono essenzialmente legati a fattori locali e non dipendono, se non in minima parte, da perturbazioni di origine atlantica.

Per quanto invece riguarda la dipendenza della composizione isotopica delle precipitazioni atmosferiche da parametri geografici e climatici, sono state individuate le seguenti variabili:

- 1) Distanza dal mare;
- 2) Orografia;
- 3) Ammontare di precipitazioni;
- 4) Temperatura al suolo;

Nel caso delle Madonie, la dominanza dei venti è dai quadranti settentrionali, anche se con minore frequenza, si verificano eventi connessi a masse d'aria di origine meridionale. Anche l'orografia è molto complessa. Infatti, procedendo

lungo un profilo nord-sud si riscontrano inoltre notevoli cambiamenti dell'andamento altimetrico. Dalla linea di costa si ha un progressivo incremento delle quote sino alla cima di P.zzo Dipilo (1400 m s.l.m.) scendendo subito dopo ai 600 m della Valle di Isnello per poi risalire sino ai quasi 2000 m di P.zo Carbonara. Ciò implica che un parametro come il gradiente isotopico verticale, che esprime la variazione della composizione isotopica con la sola quota non può essere utilizzato in quest'area, ma trova valida applicazione in quei casi in cui la geometria dei gruppi montuosi mostra un andamento quanto mai regolare.

È stato quindi realizzato un modello di variazione della composizione isotopica (Fig.16), che tiene conto della variazione della composizione isotopica in parte per effetto della prevalente direzione di propagazione degli eventi piovosi ed in parte un effetto dell'orografia e temperatura dell'aria e delle precipitazioni. Va anche detto, per una migliore comprensione di chi legge la mappa, che il campo di valori rappresentato è molto negativo e va da -7,7 a -9,3. Dall'esame del modello, si evince un progressivo arricchimento in isotopi leggeri procedendo da N verso S sul versante settentrionale del massiccio con valori di composizioni isotopiche compresi tra -6δ ed -8δ.

Tutte le zone topograficamente più elevate mostrano invece valori medi compresi tra -8 e -9 δ, con le precipitazioni nevose che raggiungono valori anche di -15 δ‰. Si osserva inoltre che la composizione isotopica misurata alla stazione di Petralia (940 m s.l.m.) posta sul versante meridionale mostra valori più negativi rispetto a quella di Piano Battaglia, che si trova però ad una quota quasi doppia (1650m s.l.m.) ma sul versante settentrionale. Ciò è legato al fatto che il massiccio delle Madonie esercita “effetto barriera” influenzando la composizione isotopica delle precipitazioni del versante meridionale con una somma dell'effetto quota a quello continentalità.

I punti d'acqua monitorati hanno evidenziato differenti comportamenti isotopici andando da variazioni pressoché nulle a modificazioni stagionali apprezzabili con escursioni isotopiche di quasi un delta.

Nel caso della stabilità della composizione isotopica si presuppone un modello di circolazione delle acque sotterranee che assicura un completo mescolamento di tutti gli apporti in falda che si realizzano nell'arco dell'anno

idrologico, questo fenomeno, che presuppone una elevata permeabilità delle

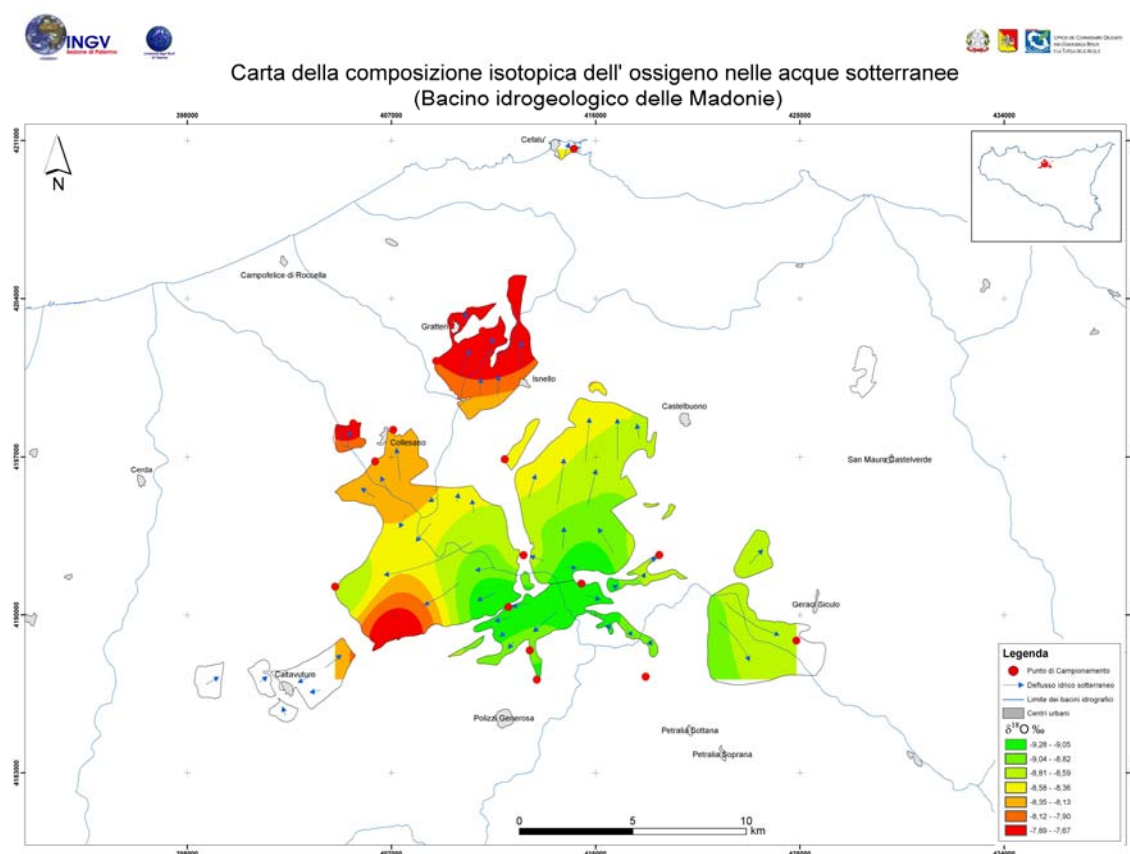


Fig. 16 - Distribuzione del $\delta^{18}O$ nelle precipitazioni delle Madonie

rocce serbatoio, in molti casi sono circuiti carsici, è tale da omogeneizzare la composizione isotopica delle sorgenti dell'area. A titolo di esempio, la sorgente di Scillato, durante l'arco dell'anno, evidenzia valori che rientrano essenzialmente all'interno dell'errore di misura. Nel caso della sorgente Cataratti, invece abbiamo escursioni isotopiche che arrivano a quasi 18‰, questo indica un circuito abbastanza breve e veloce in cui gli apporti isotopicamente differenziati che si verificano durante l'arco dell'anno si ripercuotono nelle acque della sorgente. Questa caratteristica riesce anche a dare indicazioni sulla mancanza di un reservoir idrico capace di omogeneizzare i valori isotopici dell'acquifero.

La limitata escursione isotopica di Cateratti, rispetto a quella annua delle precipitazioni è connessa al fatto che la ricarica degli acquiferi avviene quasi esclusivamente nel periodo compreso tra Ottobre e Marzo, quando, in virtù dei valori di temperatura, le precipitazioni eccedono l'evapotraspirazione potenziale, quindi in questo periodo l'escursione isotopica delle precipitazioni

atmosferiche presenta una minore variabilità.

La comparazione tra la composizione isotopica delle piogge ed i dati relativi alle sorgenti, oltre che indicare la validità del modello isotopico di riferimento adottato, ha consentito di individuare con sufficiente approssimazione le aree di ricarica dei corpi considerati.

Isotopicamente non esistono differenze significative negli acquiferi impostati su rocce afferenti alle unità “Panormidi” e “Imeresi” con valori di $\delta^{18}\text{O}$ più negativi di -8.5 -8,8 ‰.

Dal confronto dei valori di $\delta^{18}\text{O}$ e δD delle sorgenti e delle piogge sono state identificate le aree di ricarica dei vari corpi idrici

Monte dei Cervi

Il corpo idrico di “Monte dei Cervi” è caratterizzato da sedimenti di tipo carbonatico appartenenti all’Unità Stratigrafico strutturale del “Bacino Imprese”. La sorgente di Scillato è la maggiore sorgente presente nel corpo idrico di M. dei Cervi oltre alle notazioni precedentemente fatte è importante sottolineare che la sua connotazione isotopica sull’ossigeno è di -8,8 molto costante durante l’anno. Questo valore esprime la media isotopica di tutti i contributi che questa falda riceve. Questi valori, comparati con il modello isotopico delle precipitazioni indica quote medie di alimentazione intorno ai 1600 m. Il valore così fortemente negativo di Scillato e delle altre emergenze degli acquiferi imeresi sembra giustificabile, solo se si ipotizza il contributo delle quote più alte di monte dei Cervi e dell’Antenna Piccola dove viene concentrato anche un contributo idrico molto negativo proveniente dalle precipitazioni nevose.

Lo stato ambientale di questo corpo idrico è buono in virtù della presenza nelle aree affioranti del corpo idrico delle zone di protezione del Parco regionale delle Madonie.

Ai fini della redazione del piano di tutela delle acque è sufficiente mantenere l’attuale livello di protezione.

Monte Quacella

Il corpo idrico di “Monte Quacella” è costituito dalle dolomie e calcari dolomitici

della Fm. Quacella. Dal punto di vista geologico, il corpo idrico della Quacella è un'unità tettonica che deriva dalla deformazione di una zona di raccordo fra la Piattaforma carbonatica Panormide ed il Bacino Imerese.

I siti di monitoraggio del corpo idrico della Quacella che evidenziano i valori isotopici più negativi del $\delta^{18}\text{O}$ dell'intero comprensorio montuoso delle Madonie. Infatti le sorgenti riferibili a questo corpo idrico esibiscono valori inferiori a -9 ‰. Questo rispecchia sia l'elevata quota di alimentazione del corpo idrico ma anche, come si evince dalla mappa del $\delta^{18}\text{O}$, la connotazione isotopica più negativa delle precipitazioni in virtù della somma dell'effetto quota che le masse d'aria hanno subito per superare lo sbarramento di Pizzo Carbonara e dell'effetto continentalità dovuto alla distanza dal mare di questa zona. Quindi questo corpo idrico viene alimentato dalle zone elevate di Monte S. Salvatore e M. Quacella.

Lo stato ambientale di questo corpo idrico è buono in virtù della presenza nelle aree affioranti del corpo idrico delle zone di protezione del Parco regionale delle Madonie.

Ai fini della redazione del piano di tutela delle acque è sufficiente mantenere l'attuale livello di protezione.

Pizzo Carbonara –Pizzo Dipilo

Il corpo idrico di “Pizzo Carbonara – Pizzo Dipilo” è caratterizzato da sedimenti di tipo carbonatico appartenenti all'Unità Stratigrafica strutturale della “Piattaforma Panormide”.

I valori isotopi dei siti di monitoraggio di questo corpo idrico sono comparabili a quelli del corpo idrico di monte dei Cervi con valori medi che oscillano tra - 8,5 e -8.8 ‰ e che quindi rendono valide, anche per questo corpo idrico, le notazioni effettuate per Monte dei Cervi riguardo le quote medie delle aree di alimentazione del corpo idrico, che in questo caso sono identificate nelle zone a quote elevata di Pizzo Carbonara e Pizzo Dipilo. Una particolare riflessione deve essere effettuata per la sorgente di Presidiana. Infatti, il suo valore di $\delta^{18}\text{O}$ sia -8.5 ‰, sottratto dal contributo derivato dall'apporto di acqua di mare, di cui questa sorgente risulta contaminata per una percentuale di circa il 5%, si ottiene una composizione isotopica di -8.8

‰, che risulta essere pressoché identica a quella delle sorgenti nell'area basale delle Madonie. Per cui per l'alimentazione di questa sorgente devono essere invocate aree di ricarica con caratteristiche di quota simili a quelle di Scillato e quindi quote di alimentazione intorno ai 1600m che nella zona di Cefalù non sono reperibili. Infatti le aree con queste caratteristiche più prossime alla galleria drenante di Presidiana sono le Madonie e quindi necessario supporre una continuità di rocce carbonatiche tra la rocca di Cefalù e le Madonie perché solo questo tipo di rocce tra quelle presenti nell'area sono in grado di veicolare questi volumi d'acqua dall'entroterra verso la costa.

Lo stato ambientale di questo corpo idrico è buono in virtù della presenza nelle aree affioranti del corpo idrico delle zone di protezione del Parco regionale delle Madonie.

Ai fini della redazione del piano di tutela delle acque è sufficiente mantenere l'attuale livello di protezione.

Pizzo Catarineci

Il corpo idrico di "Pizzo Catarineci" è caratterizzato da una successione di depositi terrigeni del Flysch Numidico caratterizzati da una facies arenacea costituita da un'alternanza di argilliti e quarzareniti.

Il corpo idrico di Pizzo Catarineci anche se di piccole dimensioni ha un marker isotopico che è compatibile con la quota di emergenza della sorgente di Piano Lana che si trova a circa 1400 m, per cui l'area di ricarica di questo acquifero consiste in tutto il territorio a quota elevata del Catarineci. La sorgente di P.Lana è infatti caratterizzata da valori prossimi a -8.7 ‰. Questo corpo idrico è relativo alla sola struttura quarzenitica di P.Catarineci che è idraulicamente isolata rispetto al resto delle Madonie.

L'importante refluenza delle considerazioni appena effettuati su tutti i corpi idrici delle Madonie riguarda il piano di tutela che in questo bacino idrogeologico deve solo mantenere i vincoli sanciti dal Parco delle Madonie in quanto le aree di ricarica degli acquiferi madoniti sono individuati in zone di protezione A e B.

Bacino idrogeologico “Monti Trapanesi”

Nell'area trapanese, la presenza di rilievi isolati favorisce la formazioni di precipitazioni orografiche, con particolare caratterizzazione isotopica, che contribuiscono in modo significativo alla ricarica degli acquiferi. Solo con l'ausilio di una rete di pluviometri che copra anche i principali rilievi, è possibile stimare accuratamente la distribuzione spaziale delle precipitazioni e delle loro particolarità isotopiche. La rete pluviometrica dell'area trapanese consta attualmente di 5 pluviometri, mentre la rete che ha operato per uno studio isotopico degli acquiferi dell'area trapanese era di 11 stazioni ubicate lungo la costa e nelle zone collinari interne (con quote comprese tra 400 e 700 m s.l.m.) e sui principali rilievi (con quote comprese tra 900 e 1100m s.l.m.). Nell'area è stato possibile distinguere:

- circuiti superficiali che riflettono la composizione isotopica delle precipitazioni;
- circuiti profondi, intercettati in corrispondenza delle manifestazioni termali lungo la direttrice tettonica Nord-Sud che comprende Sciacca, Montevago e Segesta, che presentano una composizione isotopica talvolta differente rispetto a quella della ricarica meteorica;
- circuiti caratterizzati anche da intrusione di acqua di mare con composizione isotopica intermedia tra ricarica meteorica e acqua di mare.

Le precipitazioni mostrano valori più negativi nei mesi invernali e più positivi nei mesi estivi, riflettendo le peculiarità climatiche dell'area (Fig. 17). La temperatura, infatti, è il fattore più importante nel determinare la composizione isotopica delle precipitazioni. La composizione isotopica delle acque di falda, invece, non mostra solitamente variazioni stagionali comparabili.

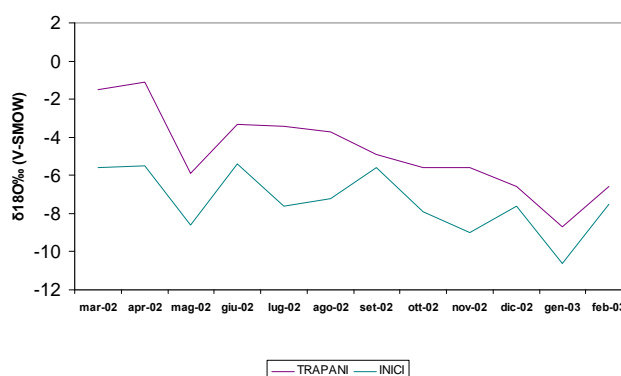


Fig. 17: Variazioni temporali della composizione isotopica. Si osservi che le precipitazioni raccolte a Monte Inici (980 m s.l.m.) hanno sempre composizione isotopica più negativa rispetto a quelle raccolte a Trapani (15 m s.l.m.).

Le ricerche condotte negli ultimi anni, hanno consentito di mettere in relazione la composizione isotopica media pesata delle precipitazioni con la quota. In particolare, per l'ossigeno, è stato stimato un gradiente isotopico verticale pari a $0.18 \delta^{18}\text{O} \text{ ‰} / 100 \text{ m}$; questo valore è prossimo a quello stimato da Hauser et al. (1980) ($-0.20 \delta^{18}\text{O} \text{ ‰} / 100 \text{ m}$), quello stimato da Favara et al. (1998) ($-0.21 \delta^{18}\text{O} \text{ ‰} / 100 \text{ m}$), e quello stimato da Fancelli et al. (1991) in diverse aree della Sicilia.

La mappa della composizione isotopica dell'ossigeno mostra come in corrispondenza dei principali rilievi si riscontrino i valori più negativi (Fig. 18).

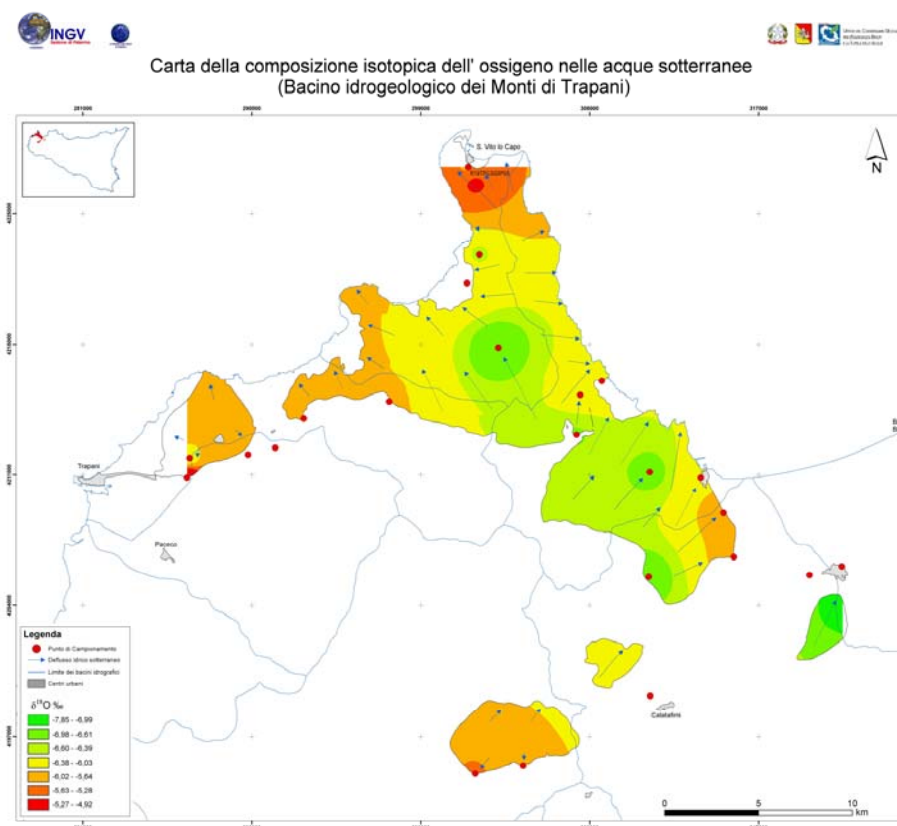


Fig. 18: Mappa della composizione isotopica dell'ossigeno.

Anche i valori di $\delta \text{D} \text{ ‰}$ sono inversamente correlati alla quota; il gradiente isotopico verticale stimato per l'idrogeno è pari a $-0.85 \delta \text{D} \text{ ‰} / 100 \text{ m}$ (Liotta et al. 2004).

Anche l'eccesso in deuterio (definito come $d = \delta \text{D} - 8 \delta^{18}\text{O}$) mostra una discreta correlazione con la quota, rivelandosi un ulteriore strumento di indagine negli studi idrogeologici. Esso risulta particolarmente efficace nelle aree interessate da precipitazioni orografiche. Infatti, mentre le aree costiere sono caratterizzate da

precipitazioni con un valore medio di eccesso in deuterio pari a 12.5‰ e le precipitazioni delle aree collinari interne presentano un valore medio pari a 16‰, sui principali rilievi il valore medio di eccesso in deuterio delle precipitazioni si attesta a circa 19‰ (Liotta et al. 2004).

La mappa dei valori di eccesso in deuterio mostra come i valori più elevati si riscontrino nelle aree interessate da precipitazioni orografiche (Fig. 19).

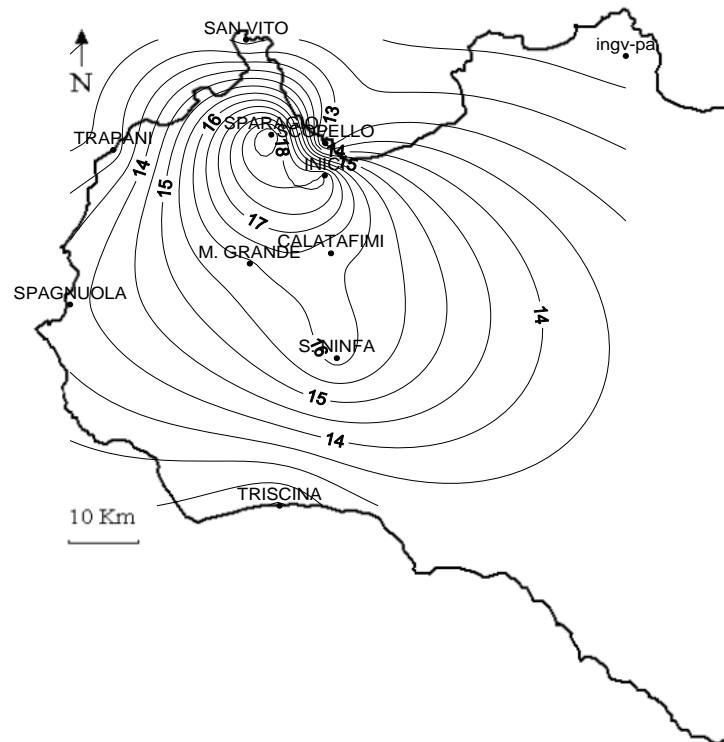


Fig. 19: Mappa dei valori di eccesso in deuterio.

L'eccesso in deuterio mostra, inoltre, delle variazioni stagionali. Nei mesi estivi esso risulta solitamente più basso rispetto ai mesi invernali (Fig. 20).

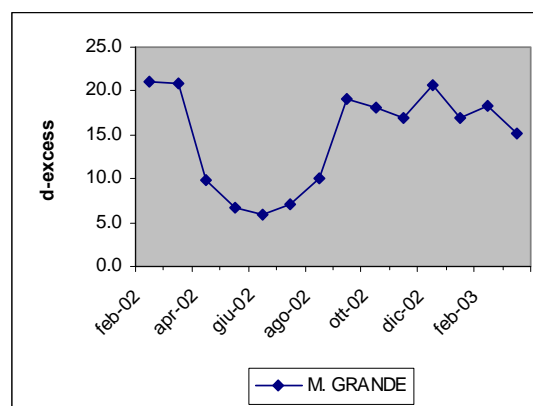


Fig. 20: Variazione stagionale dei valori di eccesso in deuterio relative al sito Montagna Grande.

Usando i valori medi ponderati delle precipitazioni raccolte in diverse stazioni dell'area trapanese, è stata definita la retta locale delle precipitazioni con equazione:

$$\delta D\text{‰} = 4.70 \cdot \delta^{18}\text{O}\text{‰} - 8.16 \quad r^2 = 0.96$$

Essa differisce significativamente da quella definita da Craig (1961) $\delta D\text{‰} = 8\delta^{18}\text{O}\text{‰} + 10$, e da quella definita da Gat e Carmi (1970) $\delta D\text{‰} = 8\delta^{18}\text{O}\text{‰} + 22$ per il Mediterraneo orientale. In particolare si riscontra una pendenza molto bassa, che può essere ragionevolmente attribuita ai valori elevati di eccesso in deuterio riscontrati sui principali rilievi.

Le acque di falda dell'area trapanese hanno, mediamente, una composizione isotopica pari a $-6 \pm 1 \delta^{18}\text{O}\text{‰}$ per l'ossigeno e $-35 \pm 5 \delta D\text{‰}$ per l'idrogeno (Fig. 21).

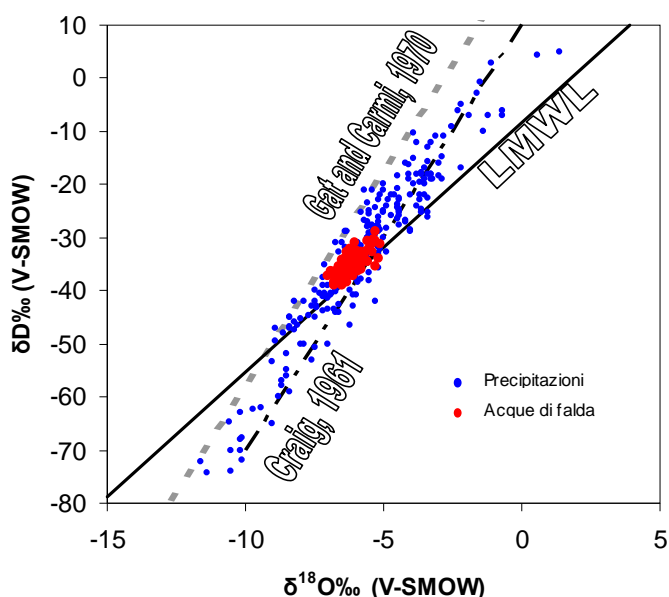


Fig. 21: Composizione isotopica delle acque di falda e dei campioni mensili di precipitazione. Sono tracciate anche la retta locale (LMWL), la retta globale (GMWL; Craig, 1961) e la retta valida per la parte più orientale del Mediterraneo (EMMWL, Gat and Carmi, 1970).

La conoscenza delle relazioni esistenti tra parametri morfologici ed isotopici consente numerose applicazioni nello studio delle acque di falda. Per gli acquiferi ad elevata permeabilità, l'acqua di falda riflette la composizione isotopica media della ricarica meteorica, pertanto le differenze riscontrate possono essere attribuite a differenti quote dei bacini di alimentazione.

Dal confronto dei valori di $\delta^{18}\text{O}$ e δD delle sorgenti e delle piogge sono state identificate le aree di ricarica dei vari corpi idrici.

Monte Erice

Il corpo idrico di “Monte Erice” è caratterizzato da un rilievo carbonatico isolato rispetto ai rilievi montuosi circostanti.

Nell’area di Monte Erice sono state campionate ed analizzate sia le acque delle emergenze naturali ubicate sul monte, sia quelle emunte dai pozzi ubicati alle pendici del monte. I valori isotopici dei siti di monitoraggio campionati in questo corpo idrico, sono compatibili con una ricarica meteorica localizzata nelle zone di affioramento del corpo idrico stesso.

Lo stato ambientale di questo corpo idrico è particolare in virtù della sua scarsa potenzialità idrica. Va però sottolineato in questo corpo idrico una presenza eccessiva di nitrati. Ai fini della redazione del piano di tutela delle acque devono essere tenuti sotto controllo i reflui di origine antropica probabilmente connessi all’abitato di Erice.

Monte Bonifato

Il corpo idrico di Monte Bonifato comprende in affioramento un rilievo carbonatico del Dominio Trapanese ubicato nel settore più orientale dei Monti di Trapani

I valori isotopici dei siti di monitoraggi indicano la compatibilità dell’area di ricarica con le porzioni affioranti di questo corpo idrico.

Lo stato ambientale di questo corpo idrico è scadente in virtù dei contenuti di nitrati.

Ai fini della redazione del piano di tutela delle acque devono essere tenuti sotto controllo i reflui di origine antropica probabilmente connessi all’abitato di Alcamo.

Monte Sparacio - Monte Monaco

Il corpo idrico di “Monte Sparacio – Monte monaco comprende numerosi rilievi della penisola di Capo S. Vito quali Monte Sparagio, Monte Speciale, Monte Acci, Monte Monaco e Monte Cofano in cui le sorgenti sono in numero limitato e l’acqua viene spesso intercettata da numerosi pozzi ubicati principalmente nel centro abitato di S. Vito Lo Capo e nell’area compresa tra Castelluccio e Custonaci. L’assenza di sorgenti è imputabile al fatto che l’assetto morfologico e strutturale della penisola favorisce il deflusso dell’acqua di falda verso le emergenze sottomarine presenti nel versante

orientale. Nella parte nord della penisola di San Vito lo capo nella mappa di fig. si evidenzia una zona più positiva dove si sono riscontrati fenomeni di ingressione marina che condizionano la composizione chimica ed isotopica delle acque. Le acque, non interessate da contaminazione di acqua di mare, presentano valori di composizione isotopica compresi tra -6 e -7 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ per l'ossigeno e tra -31 e -39 $\text{D}\text{‰}$ per l'idrogeno. Quelle salmastre invece presentano valori di poco più positivi. I valori mediamente più negativi rispetto a quelli di Montagna Grande dipendono dal fatto che la quota media delle aree di ricarica è più elevata. La rete pluviometrica, ha consentito di stimare che mediamente a Monte Sparagio la composizione isotopica dell'ossigeno è circa 1 ‰ più negativa di quella di Montagna Grande. La maggiore eterogeneità, invece, riflette la presenza di discontinuità strutturali che differenzia i percorsi sotterranei delle acque di falda. Le discontinuità, inoltre, si devono considerare le linee preferenziali di deflusso prodotte dal carsismo, che nell'area è notevolmente sviluppato.

I valori isotopici dei siti di monitoraggio indicano la compatibilità dell'area di ricarica con le porzioni affioranti di questo corpo idrico.

Lo stato ambientale di questo corpo idrico è scadente in virtù dei contenuti di cloruri e nitrati.

Ai fini della redazione del piano di tutela delle acque, devono essere tenuti sotto controllo i reflui di origine antropica dei centri urbani ricadenti all'interno del corpo idrico e sicuramente deve essere limitato e controllato l'attingimento nella zona di S. Vito Lo Capo per evitare l'ingressione di acqua di mare.

Monte Ramallaro - Monte Inici

Il corpo idrico di Monte Ramallaro - Monte Inici è costituito da terreni derivanti dalla deformazione delle aree più interne del dominio Trapanese. Si tratta di complessi montuosi prevalentemente carbonatici che comprendono una serie di rilievi: Monte Ramallaro - Monte Inici, , Monte Barbaro e Montagna Grande.

Per quanto riguarda Monte Inici, le emergenze idriche del versante meridionale presentano una composizione isotopica dell'ossigeno pari a -7,1 mentre quelle del versante orientale presentano una composizione isotopica pari a -6.1. Applicando il

gradiente isotopico verticale, precedentemente determinato sulla base della composizione isotopica delle precipitazioni, è possibile calcolare una differenza nelle quote medie delle aree di alimentazione pari a 500 m. Ciò significa che l'assetto strutturale di Monte Inici favorisce, nel versante meridionale, il deflusso di acque che si sono infiltrate a quote più elevate.

Per quanto riguarda le sorgenti presenti alle pendici di Montagna Grande presentano valori di composizione isotopica abbastanza omogenei. Tale omogeneità indica un acquifero che non presenta discontinuità strutturali tali da determinare linee di deflusso differenziate per le varie sorgenti.

I valori isotopici dei siti di monitoraggio indicano la compatibilità dell'area di ricarica con le porzioni affioranti di questo corpo idrico.

Lo stato ambientale di questo corpo idrico è sufficiente in virtù dei contenuti di nitrati.

Ai fini della redazione del piano di tutela delle acque, devono essere tenuti sotto controllo i reflui di origine antropica dei centri urbani ricadenti all'interno del corpo idrico e sicuramente deve essere controllato l'attingimento nelle zone affioranti del corpo idrico, perché dato i rapporti diretti tra questo corpo idrico e il mare, l'eccessivo emungimento potrebbe provocare fenomeni di ingressione marina che comprometterebbe ulteriormente il suo stato ambientale.

Bacino idrogeologico “Monte Etna”

Lo studio dei fenomeni legati al ciclo naturale dell'acqua, attraverso le metodologie di indagine isotopica, hanno avuto nell'area etnea un ruolo fondamentale nella modellizzazione idrogeologica degli acquiferi presenti sull'Etna, consentendo di ottenere informazioni sulla loro origine, sulle aree di ricarica, sulle modalità di circolazione degli acquiferi, sui tempi di residenza, ecc..

A tale scopo sia nel corso del presente studio che nel corso degli ultimi anni, sono state effettuate numerose analisi della composizione isotopica delle precipitazioni e delle acque naturali dell'area etnea (D'Alessandro et al., 2001; 2004; Favara 2004;).

Sono state indagate le variazioni sia nel tempo che nello spazio della composizione isotopica dell'Ossigeno e del Deuterio, sia nei campioni prelevati con cadenza mensile da 11 pluviometri installati a varie quote e su differenti versanti in modo da ottenere campioni rappresentativi delle acque piovane dell'intera area, sia nelle acque degli acquiferi circolanti nelle rocce vulcaniche dell'Etna.

La rete pluviometrica, costruita nell'ambito della presente convenzione, dell'area etnea consta attualmente di 8 pluviometri mentre la rete che ha operato per uno studio isotopico degli acquiferi dell'Etna era di 15 stazioni ubicate sui vari versanti dell'edificio vulcanico a quote comprese tra il livello del mare e 2900 m s.l.m. di Torre del Filosofo.

E' stata inoltre misurata la composizione isotopica delle acque sotterranee dei 29 siti di campionamento distribuiti omogeneamente lungo tutti i versanti del vulcano e scelti tra quelli più rappresentativi degli acquiferi etnei. Questi punti d'acqua, costituiscono la rete di monitoraggio dell'Etna per le attività previste nell'ambito di questa convenzione.

Data la sua elevata altitudine (circa 3300 m. s.l.m.) e la sua particolare posizione geografica al margine della Sicilia orientale, l'Etna presenta condizioni climatiche ben diverse dalle zone circostanti caratterizzate da un clima mediterraneo. In particolare si osserva un graduale passaggio, in funzione della quota, da un clima di tipo subtropicale ad uno temperato caldo, per passare, salendo ancora di quota, a un clima temperato freddo e freddo alle quote più elevate. La distribuzione delle precipitazioni risulta influenzata dall'altitudine e dall'esposizione dei versanti rispetto alla direzione dei venti dominanti e quindi delle masse di aria umida provenienti soprattutto dai quadranti orientali. In tal senso l'edificio vulcanico, costituendo una barriera al percorso delle masse d'aria, funge da centro di condensazione dell'umidità

atmosferica. Nel versante orientale, infatti, si registrano le massime precipitazioni, imputabili sia all'esposizione che alla vicinanza del mare, che svolge un'azione mitigatrice della temperatura delle masse d'aria, favorendo così l'incontro tra le correnti umide ascendenti e gli strati freddi dell'atmosfera.

Si osserva inoltre un incremento delle precipitazioni da Sud verso Nord e da Ovest verso Est. Le medie trentennali (1965-1994) delle precipitazioni si attestano su valori di circa 800 mm per tutta l'area Etnea con un massimo registrato alla stazione pluviometrica Zafferana (1192 mm). I dati pluviometrici relativi alle alte quote risultano invece scarsi, verosimilmente a causa del fatto che per buona parte dell'anno le precipitazioni piovose sono sostituite da quelle nevose.

L'elevata permeabilità delle lave che costituiscono l'edificio etneo impedisce lo sviluppo di un vero e proprio reticolo idrografico superficiale limitando il ruscellamento e favorendo così l'infiltrazione efficace che risulta molto elevata rispetto alla potenziale ricarica meteorica totale. L'edificio etneo è costituito da una successione di orizzonti lavici molto permeabili che ospitano gli acquiferi alimentati dalle precipitazioni e dallo scioglimento delle nevi, intercalati da livelli discontinui di piroclastiti scarsamente permeabili.

Gli acquiferi poggiano su un substrato sedimentario costituito da rocce impermeabili di età variabile dal Cretaceo al Quaternario. La gran parte delle sorgenti si localizzano al contatto tra le vulcaniti e il basamento impermeabile. In alcuni casi un fenomeno di impermeabilizzazione secondaria dovuta ad esempio all'occlusione dei pori degli strati semipermeabili da parte dei materiali fini trasportati dalle acque di percolazione o ad alterazione idrotermale di vulcaniti che originano minerali argillosi, possono generare falde sospese e sorgenti di bassa portata a quote relativamente elevate.

In generale l'andamento del deflusso idrico all'interno dell'Etna è radiale con un asse eccentrico verso Ovest in corrispondenza del culmine del basamento sedimentario. Sulla base dei dati geologici strutturali e geofisici sono stati distinti all'interno dell'area etnea tre bacini idrogeologici principali (Ovest, Nord e Est) tributari del Simeto dell'Alcantara e del mar Ionio all'interno dei quali sono presenti strutture più piccole ed indipendenti.

La composizione isotopica delle piogge e delle acque di falda viene rappresentata nel diagramma $\delta D - \delta^{18}O$ appresso riportato, le acque meteoriche e le acque sotterranee dell'area etnea ricadono in un'area compresa tra la retta delle acque meteoriche a

scala globale (WMMWL $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$) e la retta delle acque meteoriche relativa al Mediterraneo orientale (EMMWL $\delta D = 8 \delta^{18}O + 22$).

Le piogge mostrano un'ampia variazione sia nel rapporto D/H (δD da -84 a -12 ‰) sia nel rapporto $^{18}O/^{16}O$ ($\delta^{18}O$ da -12.8 a -3 ‰) con i valori più negativi misurati nei periodi invernali e nei campioni prelevati alle quote più elevate. Questo effetto, come già descritto nella parte generale, deriva dalla progressiva “negativizzazione” (impoverimento in isotopi pesanti) delle masse d’aria per successive evaporazioni e condensazioni a temperature sempre più basse. Ad una temperatura di condensazione più bassa corrisponde dunque un contenuto minore in isotopi pesanti dovuto all’aumento del fattore di frazionamento legato alla diminuzione della temperatura. Tale effetto, come precedentemente descritto nella parte generale, nel nostro caso si traduce con un effetto di “negativizzazione” nei periodi invernali (effetto stagionale) ed alle quote più elevate per espansione adiabatica delle masse d’aria (effetto altitudine). La composizione isotopica delle acque meteoriche (Fig. 22) indica inoltre che generalmente le fonti del vapore da cui originano le precipitazioni nell’area etnea derivano dal mescolamento di due termini estremi, uno proveniente dall’oceano Atlantico e l’altro, predominante, dal Mar Mediterraneo (D’Alessandro et al., 2004).

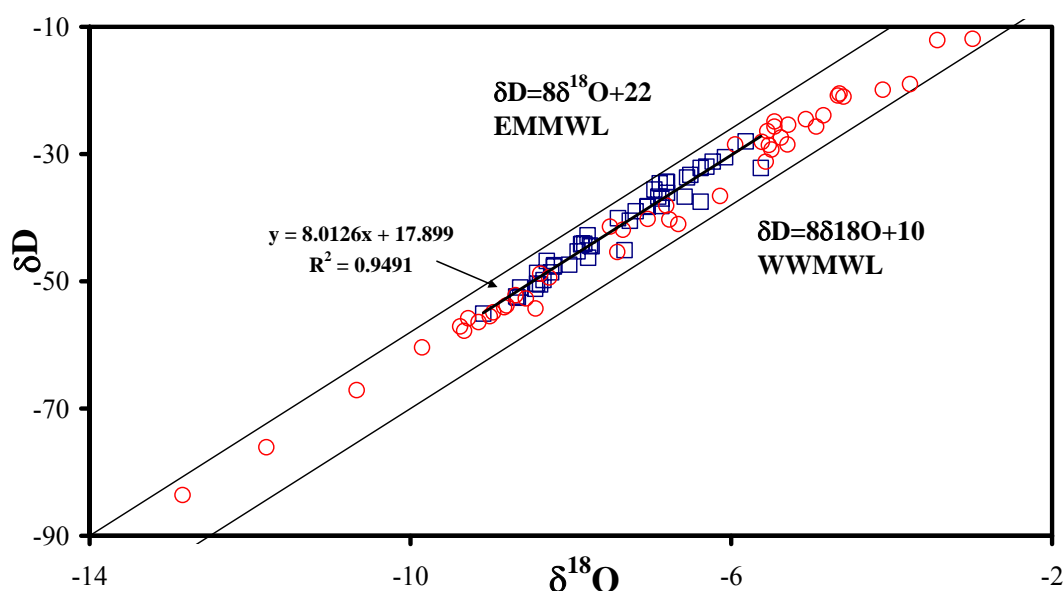


Fig. 22 - Diagramma di correlazione $\delta D/\delta^{18}O$. I campioni delle acque meteoriche e delle acque sotterranee ricadono nella medesima area compresa tra la retta delle acque meteoriche mondiale e quella del mar Mediterraneo orientale, mostrando una stretta relazione.

Le medie annuali della composizione isotopica pesata per la quantità di precipitazione sono inversamente correlate con la quota di campionamento come mostrato in fig. 23, anche se i siti di quota più alta (> 1500 m s.l.m.) presentano un gradiente minore. Il valore del gradiente isotopico stimato per l'intervallo di quota 0 – 1500 m ($0,27 \text{ ‰} / 100 \text{ m.}$) è simile a quello misurato da Anzà et al. (1989) sul fianco sud-orientale del vulcano ($0,3 \text{ ‰} / 100 \text{ m.}$) e da Hauser et al. (1980) per aree limitrofe in Sicilia ($0,2 \text{ ‰} / 100 \text{ m.}$). La retta di regressione per i siti di bassa quota mostra un buon coefficiente di correlazione ($R^2 = 0.96$) indicando che il gradiente isotopico è indipendente dalla posizione geografica del sito di campionamento.

I siti di alta quota sull'Etna, al contrario, mostrano un gradiente isotopico molto basso di $0,05 \text{ ‰} / 100 \text{ m.}$, ed una maggiore dispersione dei dati ($R^2 = 0.61$). Questo fatto è con tutta probabilità da imputare all'influenza del vapore rilasciato dai crateri sommitali (D'Alessandro et al., 2004), anche se a quote elevate un abbassamento del gradiente verticale è stato più volte osservato.

Confrontando la composizione isotopica delle acque sotterranee con il gradiente isotopico è possibile ottenere per ogni corpo idrico una quota di alimentazione media del circuito idrologico che lo alimenta. Ciò ha permesso di mettere in evidenza il fatto che i circuiti idrologici dell'acquifero del versante orientale presentano mediamente una quota alimentazione più bassa (circa 600 m) di quelli degli acquiferi settentrionale e occidentale (che oscillano tra i 1000 m e i 1300 m.).

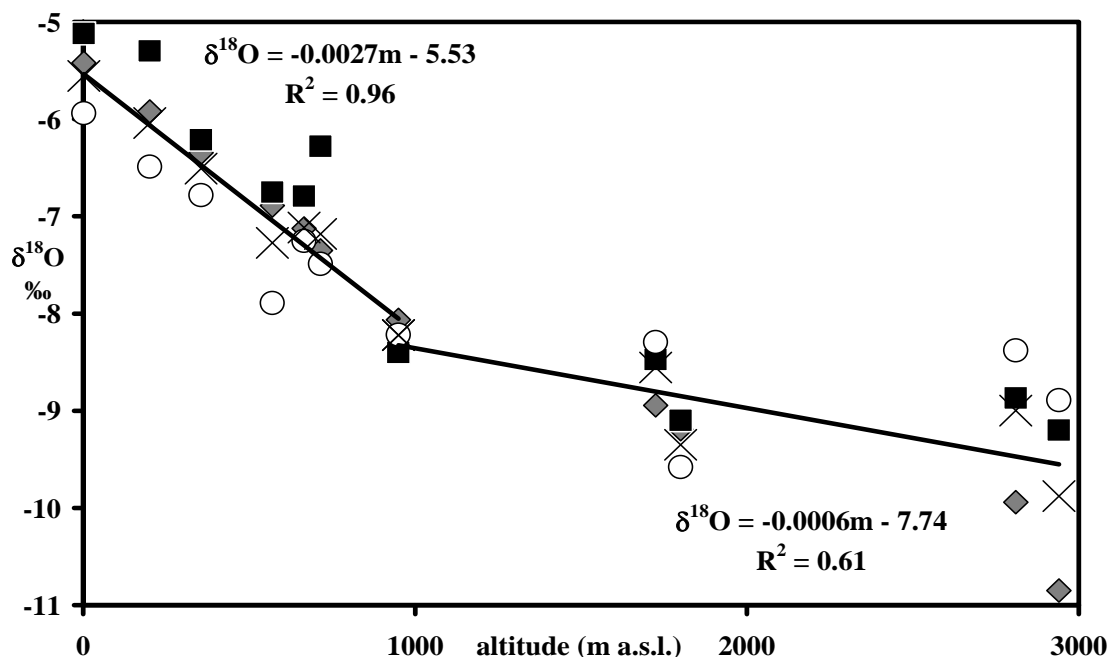


Fig. 23 - Relazione tra composizione isotopica e altitudine [modificato da D'alessandro et al. 2004]

La composizione isotopica delle acque sotterranee ricade nell'intervallo di valori misurato nelle precipitazioni, a conferma della loro prevalente origine meteorica. L'assenza di shift isotopico rispetto alle precipitazioni lascia escludere la presenza di eventi evaporativi o di reazioni di scambio isotopico con le rocce ad alta temperatura, inoltre non vi sono evidenti indizi di mescolamenti cospicui con acque saline (acqua di mare, acque connate).

Le acque sotterranee presentano due stili comportamentali:

- Il primo è relativo alle sorgenti di quota più elevata che hanno, durante l'arco dell'anno, variazioni isotopiche significative nell'ordine di 0,5 unità δ . Questi punti d'acqua presentano valori di portata bassi nell'ordine di qualche l/s e sono riconducibili a circuiti superficiali che risentono sensibilmente degli apporti in falda isotopicamente differenziati durante l'arco dell'anno.
- Il secondo è relativo alle sorgenti di quota più bassa che non presentano, durante l'arco dell'anno, modificazioni isotopiche significative. Tali variazioni sono poco al di fuori dell'errore di misura, all'interno di 0,2 unità δ ‰. Questi punti d'acqua presentano valori di portata abbastanza elevati nell'ordine delle centinaia di l/s e sono riconducibili a circuiti profondi il cui affioramento è intermediato dalla presenza di grandi bacini sotterranei che riescono ad omogeneizzare gli apporti in falda isotopicamente differenziati durante l'arco dell'anno.

Le acque provenienti dal bacino idrologico Est mostrano generalmente valori più positivi (-6.5 ‰) rispetto agli altri due bacini (-7.8 e -8.0 ‰ rispettivamente per il bacino Nord e Ovest (SW)). In particolare i campioni Ilce e San Giacomo, rappresentativi di acquiferi superficiali appartenenti al bacino Est, mostrano una certa variabilità temporale, strettamente legata alle variazioni nell'input di ricarica meteorica, dovuta alla relativa rapidità del loro circuito idrologico. Chiaramente le variazioni riscontrabili in questi acquiferi risultano smorzate nei valori stagionali estremi per effetto della circolazione sotterranea che conferisce un minimo mescolamento della ricarica.

I campioni rappresentativi dei bacini Nord e Ovest (SW) mostrano valori piuttosto omogenei legati a circuiti idrologici relativamente lunghi e tempi di residenza compresi tra circa 1 e 50 anni (D'Alessandro et al., 2001).

In Fig. 24 è rappresentata la distribuzione geografica della composizione isotopica dell'ossigeno nelle acque sotterranee dell'Etna.

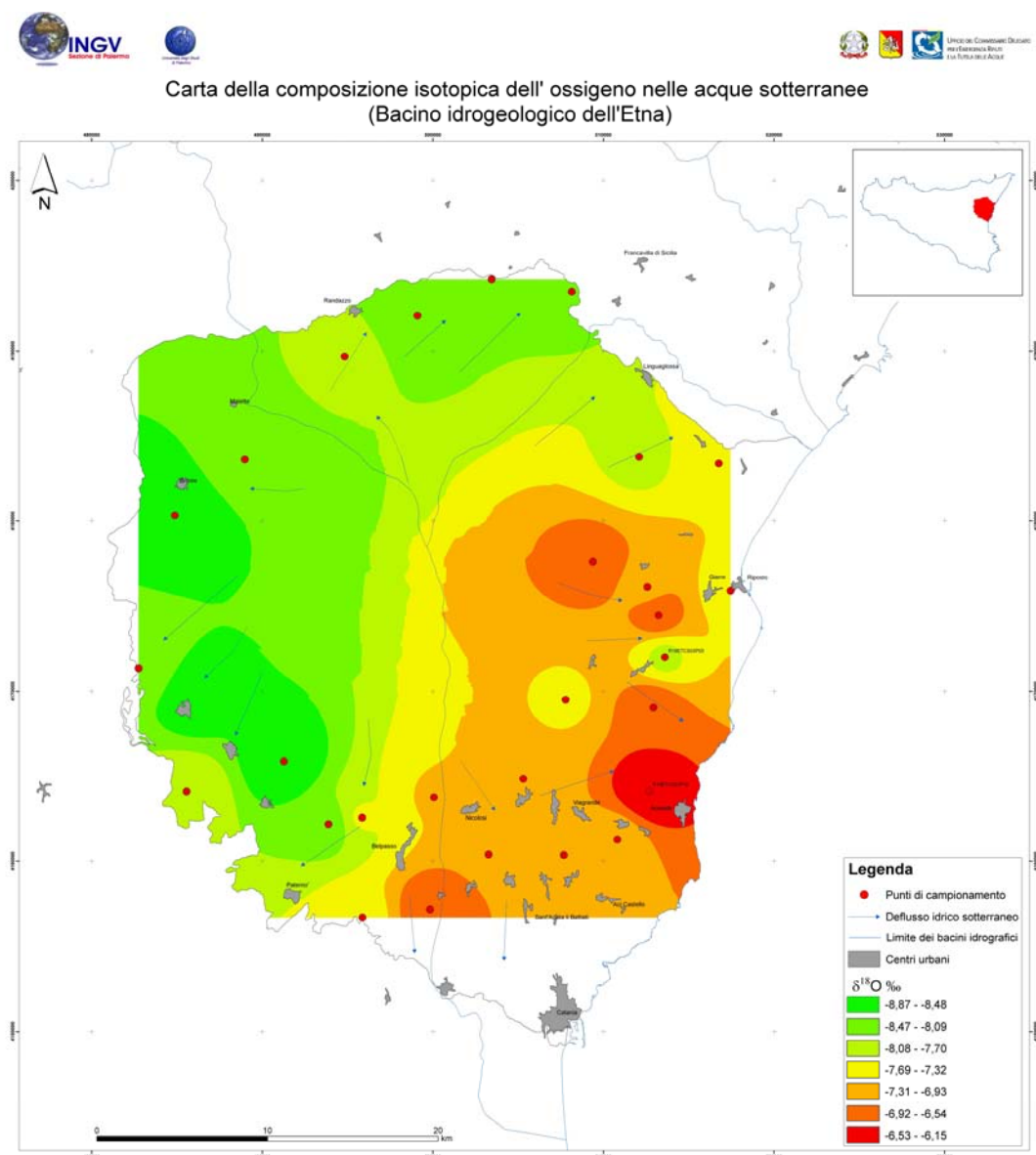


Fig. 24. Distribuzione geografica della composizione isotopica dell'ossigeno nelle acque sotterranee dell'Etna.

I punti monitorati nell'ambito di questo progetto mostrano una bassa variabilità stagionale, come la maggior parte delle acque sotterranee dell'Etna, confermando la buona omogeneizzazione isotopica nei circuiti che alimentano gli acquiferi campionati. Ciò è dovuto alle caratteristiche idrogeologiche di tali acquiferi la cui alta permeabilità per fratturazione consente un facile mescolamento di acque provenienti da differenti quote, nonostante in alcuni casi, soprattutto sul versante orientale, la

circolazione sotterranea sia molto rapida.

Dal confronto dei valori di $\delta^{18}\text{O}$ e δD delle sorgenti e delle piogge sono state identificate le aree di ricarica dei tre corpi idrici:

Etna Ovest

Il corpo idrico “Etna Ovest” comprende il settore del versante sud-occidentale dell’edificio etneo. Seguendo l’esemplificazione generale precedentemente descritta, si caratterizza per due tipi di connotazione isotopica: la prima presenta valori di $\delta^{18}\text{O}$ intorno a $-7,2$, questi valori di composizione isotopica più positiva corrispondono agli acquiferi attorno all’area urbana di Catania (Acque Sorrentine e Pattaglini-Pianoconte) le cui zone di alimentazione sono state identificate a quote piuttosto basse (400-600 m) comprese in aree in parte urbanizzate. Ai fini della redazione del piano di tutela andrebbero tenuti sotto controllo i reflui di origine antropica e i fertilizzanti utilizzati in agricoltura, che rischiano di compromettere lo stato ambientale del corpo idrico in corrispondenza della fascia urbanizzata.

La seconda connotazione isotopica è relativa a valori intorno a $-8,9$ ‰ con punte negative che raggiungono i $-9,65$ ‰ che evidenziano aree di alimentazione media di oltre 1300 m con una consistente componente nevosa nel sistema di alimentazione. Questi acquiferi drenano le acque di un paleoalveo del fiume Simeto che ha un andamento NE-SW ed è stato ricoperto dalle lave dell’Etna. Queste falde ricevono i contributi meteorici di quota più elevata. In questo settore le aree di alimentazioni possono essere individuate nelle zone comprese tra Monte Minardo e Monte Turchio. Tali aree, ai fini della redazione del piano di tutela non necessitano di misure supplementari in quanto bisognerebbe mantenere lo stesso attuale livello di protezione, dato che le aree di ricarica individuate ricadono all’interno della zona A del Parco Regionale dell’Etna. Lo stato ambientale attualmente risulta particolare in virtù di un eccesso di manganese ($1190 \mu\text{g/l}$) nel pozzo Piano Elisi.

Etna Nord

Il corpo idrico “Etna Nord” comprende il settore del versante settentrionale dell’edificio etneo.

Il corpo idrico del versante settentrionale (Nord) del vulcano presenta un intervallo di valori di $\delta^{18}\text{O}$ molto più ristretto, compreso tra $-8,0$ e $-8,6$ ‰. Le quote di

alimentazione media di questo corpo idrico sono state individuate nelle aree di questo settore dell'Etna ubicate intorno ai 1000 m di quota. La struttura idrogeologica principale che drena tali acque corrisponde ad alcuni paleoalvei dell'Alcantara con andamento all'incirca WSW-ENE e le aree di alimentazione principali corrispondono alle aree di Monte La Nave e Monte Spagnolo.

Lo stato ambientale di questo corpo idrico risulta scadente in virtù di un eccessivo sfruttamento di questo corpo idrico. Ai fini della redazione del piano di tutela, devono essere limitati e controllati gli attingimenti da questo acquifero. Dal punto di vista qualitativo non sono necessarie misure supplementari rispetto a quelle attualmente operanti, in quanto le aree di ricarica di questo corpo idrico ricadono all'interno della zona B del Parco Regionale dell'Etna. Infine vanno sempre tenuti sotto controllo i reflui di origine antropica che incidono molto sulla qualità delle acque a quote inferiori ai 400-600 metri.

Etna Est

Il corpo idrico "Etna Est" comprende il settore del versante orientale dell'edificio etneo. Anche questo corpo idrico segue l'esemplificazione generale descritta nella parte generale, infatti, si caratterizza per due tipi di connotazione isotopica: la prima presenta valori di $\delta^{18}\text{O}$ intorno a $-6,5\text{‰}$. A questi valori corrispondono quote di alimentazione mediamente più basse comprese tra i 400 e 600 m. Le quote di alimentazione più basse si trovano nella parte meridionale dell'acquifero in aree intensamente sfruttate dall'agricoltura ed in parte anche interessate da una elevata urbanizzazione (Acireale ed aree limitrofe). Lo stato ambientale di questo corpo idrico risulta scadente in virtù di un eccessivo sfruttamento di questo corpo idrico. Ai fini della redazione del piano di tutela, devono essere limitati e controllati gli attingimenti da questo acquifero.

Al contrario le aree di alimentazione più elevate si riscontrano nella parte settentrionale dell'acquifero dove osserviamo valori isotopici intorno a $-7,8\text{‰}$. In quest'ultima area le acque sotterranee sono anch'esse drenate da un paleoalveo (Paleoalcantara-Fiumefreddo) che veicola acque da quote superiori e le cui zone di alimentazione si trovano in aree poco antropizzate ubicate sotto la zona di piano Pernicana a quote medie intorno ai 1100 m.. Tali aree, ai fini della redazione del piano di tutela non necessitano di misure supplementari di protezione in quanto non

dovrebbero avere problemi di contaminazione ricadendo all'interno delle zone protette (A e B) del Parco Regionale dell'Etna.

Infine vanno sempre tenuti sotto controllo i reflui di origine antropica che incidono molto sulla qualità delle acque a quote inferiori ai 400-600 metri.

I risultati ottenuti hanno consentito, per l'area etnea, una serie di valutazioni che costituiscono un valido strumento per una accurata gestione quantitativa e qualitativa delle risorse idriche degli acquiferi. In particolare gli acquiferi che presentano le maggiori criticità sono quelle che insistono nelle aree antropizzate ed in particolare in quelle del basso versante sud-orientale. Essi sono, infatti, caratterizzati da circuiti più brevi e presentano la maggiore ricarica in aree urbanizzate e in buona parte sfruttate dalle attività agricole. La ricarica meteorica, che in quest'ultima area è pure quantitativamente superiore, può rappresentare un veicolo per l'immissione in falda sia dei prodotti chimici adoperati in agricoltura (fertilizzanti, pesticidi, etc.) sia di acque reflue urbane che possono compromettere la qualità di queste acque sotterranee.

Bacino idrogeologico "Nebrodi"

Il bacino idrogeologico dei Nebrodi è caratterizzata da una dorsale montuosa intorno ai 1500 metri, con la massima elevazione di monte Soro 1847 m, che si sviluppa in senso est-ovest che degrada a nord verso il mar Tirreno. Ciò comporta la distinzione di due zone a caratteristiche climatiche diverse: la fascia litoranea o sub-litoranea tirrenica, con regime termico tipico delle aree mediterranee, con variabilità stagionale meno marcata e temperature medie annue minime e massime piuttosto contenute, favorite anche dall'effetto-tampone del mare. La seconda zona è quella della dorsale montuosa interna, in cui il clima tende maggiormente ad assumere caratteristiche di continentalità, ossia forti escursioni stagionali e temperature medie annue minime e massime più accentuate. Questa differenziazione ha notevole influenza sui processi dipendenti dalla temperatura, quali ad esempio la variabilità spaziale e temporale della composizione isotopica delle precipitazioni atmosferiche.

Nel bacino idrogeologico dei Monti Nebrodi data la presenza di numerose unità terrigene, la circolazione idrica sotterranea è meno sviluppata rispetto ad altri bacini idrogeologici siciliani. Fanno eccezione i depositi alluvionali di fondovalle dei torrenti e delle fiumare, le facies conglomeratiche, nei settori in cui le formazioni geologiche sono pervase da reticoli di faglie e fratture dove la permeabilità può divenire molto elevate, le facies arenacee e le intercalazioni quarzarenitiche.

Il modello isotopico delle precipitazioni confrontato con la composizione isotopica dei punti di monitoraggio dei vari corpi idrici, è riuscito interessanti indicazioni per l'individuazione delle aree di ricarica dei singoli corpi idrici.

La composizione isotopica dell'Ossigeno e del Deuterio dei siti di monitoraggio, presenta valori che sono compresi rispettivamente tra -6,2 e -8,85 e tra -34 e -49, che rappresentano un ampio campo di variabilità che conferma le notevoli differenze che vengono riscontrate in questo territorio.

La mappa di fig. 25 evidenzia una distribuzione isotopica delle acque da valori più negativi nella parte meridionale che corrispondono alle quote più elevate ai valori più positivi nella parte settentrionale dove le quote si abbassano fino al livello del mare.

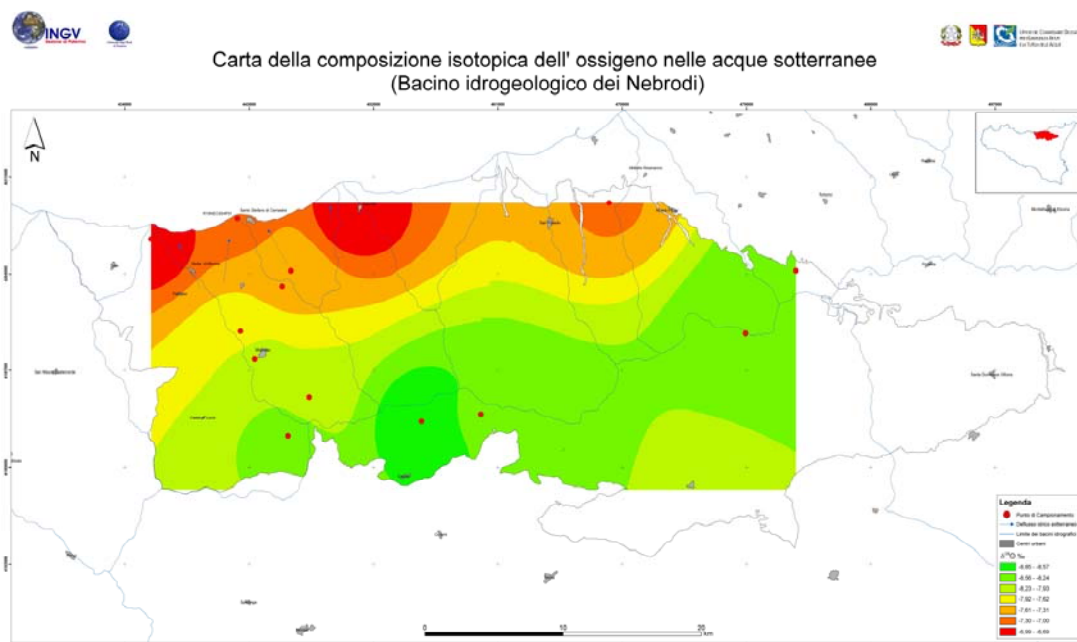


Fig. 25 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ dei Monti Nebrodi

Tusa

Il corpo idrico “Tusa” è impostato sulle alluvioni della Fiumara dove la prevalenza litologica è di tipo alluvionale a componente quarzarenitica.

I valori isotopici del sito di monitoraggio indicano quote di alimentazione medio basse dovute alle caratteristiche di questo corpo idrico, impostato su una fiumara, che raccoglie nel suo alveo e quindi nel sub alveo tutte le componenti di un'alimentazione a varie quote che viene realizzata anche attraverso sversamenti da corpi idrici adiacenti.

Questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che quest'area non è sede di attività agricole e/o produttive di entità significativa. Ai fini della redazione del piano di tutela sarebbe necessario evitare in questa zona incrementi le attività agricole e insediamenti industriali ad alto impatto e mantenere un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Reitano - Monte Castellaci

Il corpo idrico Reitano-Monte Castellaci si identifica con i rilievi montuosi retrostanti l'abitato di Santo Stefano di Camastra ed è ospitato in una successione torbiditica arenaceo-argillitica caratterizzata da depositi conglomeratico-sabbiosi silicoclastici.

I valori isotopici del sito di monitoraggio indicano quote di alimentazione medio-alte

che sono compatibili con aree di alimentazione costituite dagli affioramento dello stesso corpo idrico.

Questo corpo idrico ha uno stato ambientale particolare dovuto ad al concentrazioni anomale di arsenico e ferro, peraltro in quest'area non sembrano essere presenti attività agricole e/o produttive di entità significativa.

Ai fini della redazione del piano di tutela andrebbe mantenuto, nei settori a quota più elevata, l'attuale regime di protezione dato che queste aree sono zone A e B del Parco regionale dei Nebrodi. Sarebbe inoltre utile evitare in questa zona incrementi le attività agricole e insediamenti industriali ad alto impatto e mantenere un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Pizzo Michele – Monte castelli

Il corpo idrico “Pizzo Michele – Monte Castelli” si identifica con i rilievi montuosi retrostanti l'abitato di Mistretta è ospitato in una successione torbidityca arenaceo-argillitica dove i livelli idrogeologicamente produttivi sono costituiti da formazioni quarzarenitiche fratturate.

I valori isotopici del sito di monitoraggio indicano quote di alimentazione tra le più alte dell'intero bacino idrogeologico e sono compatibili con aree di alimentazione costituite dagli affioramento dello stesso corpo idrico.

Questo corpo idrico ha uno stato ambientale particolare dovuto alla presenza di valori elevati, di origine naturale, di manganese (397 µg/l) e di ferro (564 µg/l) nella sorgente Neviera. Inoltre va considerato che le caratteristiche idrogeologiche dei terreni che costituiscono il corpo idrico non permettono il costituirsi di acquiferi di rilevante portata. Va anche detto che in quest'area non sembrano essere presenti attività agricole e/o produttive di entità significativa.

Ai fini della redazione del piano di tutela è necessario mantenere, nei settori a quota più elevata, l'attuale regime di protezione dato che queste aree sono zone A e B del Parco Regionale dei Nebrodi. Sarebbe necessario inoltre, evitare in questa zona incrementi le attività agricole e insediamenti industriali ad alto impatto e mantenere un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Santo Stefano

Il corpo idrico di “ Santo Stefano” si sviluppa sulla fiumara di Santo Stefano costituita da depositi fluviali. I valori isotopici del sito di monitoraggio indicano quote

di alimentazione medie dovute alle caratteristiche di questo corpo idrico, impostato su una fiumara, che raccoglie nel suo alveo e quindi nel sub alveo tutte le componenti di un'alimentazione a varie quote che viene realizzata anche attraverso sversamenti da corpi idrici adiacenti.

Questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che quest'area non è sede di attività agricole e/o produttive di entità significativa, a che riceve acque da zone boscate inserite nel Parco Regionale dei Nebrodi. Ai fini della redazione del piano di tutela è necessario mantenere, nei settori a quota più elevata, l'attuale regime di protezione dato che queste aree sono zone A e B del Parco Regionale dei Nebrodi. Sarebbe necessario inoltre, evitare in questa zona incrementi le attività agricole e insediamenti industriali ad alto impatto e mantenere un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Monte Soro

Il corpo idrico di “ Monte Soro” è costituito essenzialmente dai corpi terrigeni delle unità Sicilidi. I livelli idrogeologicamente produttivi sono costituiti da formazioni quarzarenitiche fratturate.

I valori isotopici del sito di monitoraggio indicano le quote di alimentazione più alte dell'intero bacino idrogeologico che sono inoltre compatibili con aree di alimentazione costituite dagli affioramento dello stesso corpo idrico.

Questo corpo idrico ha uno stato ambientale particolare in virtù delle caratteristiche idrogeologiche dei suoi terreni che non permettono il costituirsi di acquiferi di rilevante portata. Peraltro in quest'area non sembrano essere presenti attività agricole e/o produttive di entità significativa.

Ai fini della redazione del piano di tutela andrebbe mantenuto, nei settori a quota più elevata, l'attuale regime di protezione dato che queste aree sono zone A e B del Parco regionale dei Nebrodi. Sarebbe inoltre utile, alle basse quote, evitare, in questa zona, incrementi le attività agricole e insediamenti industriali ad alto impatto. Inoltre bisogna mantenere un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Caronia

Il corpo idrico di “ Caronia” si sviluppa sulla fiumara di Caronia costituita da depositi fluviali. I valori isotopici del sito di monitoraggio indicano quote di alimentazione medie-basse dovute alle caratteristiche di questo corpo idrico, impostato su una

fiumara, che raccoglie nel suo alveo e quindi nel sub alveo tutte le componenti di un'alimentazione a varie quote che viene realizzata anche attraverso sversamenti da corpi idrici adiacenti.

Questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che quest'area non è sede di attività agricole e/o produttive di entità significativa, a che riceve acque da zone boscate inserite nel Parco Regionale dei Nebrodi. Ai fini della redazione del piano di tutela è necessario mantenere, nei settori a quota più elevata, l'attuale regime di protezione dato che queste aree sono zone A e B del Parco Regionale dei Nebrodi. Sarebbe necessario inoltre, evitare in questa zona incrementi le attività agricole e insediamenti industriali ad alto impatto e mantenere un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Capizzi-Portella Cerasa

Il corpo idrico "Capizzi-Portella Cerasa" si identifica con i rilievi montuosi a nord dell'abitato di Capizzi ed è ospitato in una successione torbiditica arenaceo-argillitica caratterizzata da depositi conglomeratico-sabbiosi silicoclastici

I valori isotopici del sito di monitoraggio indicano quote di alimentazione elevate che sono compatibili con aree di alimentazione costituite dagli affioramento dello stesso corpo idrico.

Questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che quest'area non è sede di attività agricole e/o produttive di entità significativa, a che le aree di alimentazione sono individuate nelle zone boscate inserite nel Parco Regionale dei Nebrodi. Ai fini della redazione del piano di tutela è necessario mantenere, nei settori a quota più elevata, l'attuale regime di protezione dato che queste aree sono zone A e B del Parco Regionale dei Nebrodi. Sarebbe necessario inoltre, evitare in questa zona incrementi le attività agricole e insediamenti industriali ad alto impatto e mantenere un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Bacino idrogeologico “Piana di Marsala – Mazara del Vallo”

La piana di Marsala – Mazara del Vallo evidenzia, in tutti i siti di monitoraggio del corpo idrico, valori di composizione isotopica dell'Ossigeno e del Deuterio che sono compresi rispettivamente tra -4,2 e -5,5 e tra -21 e -37.

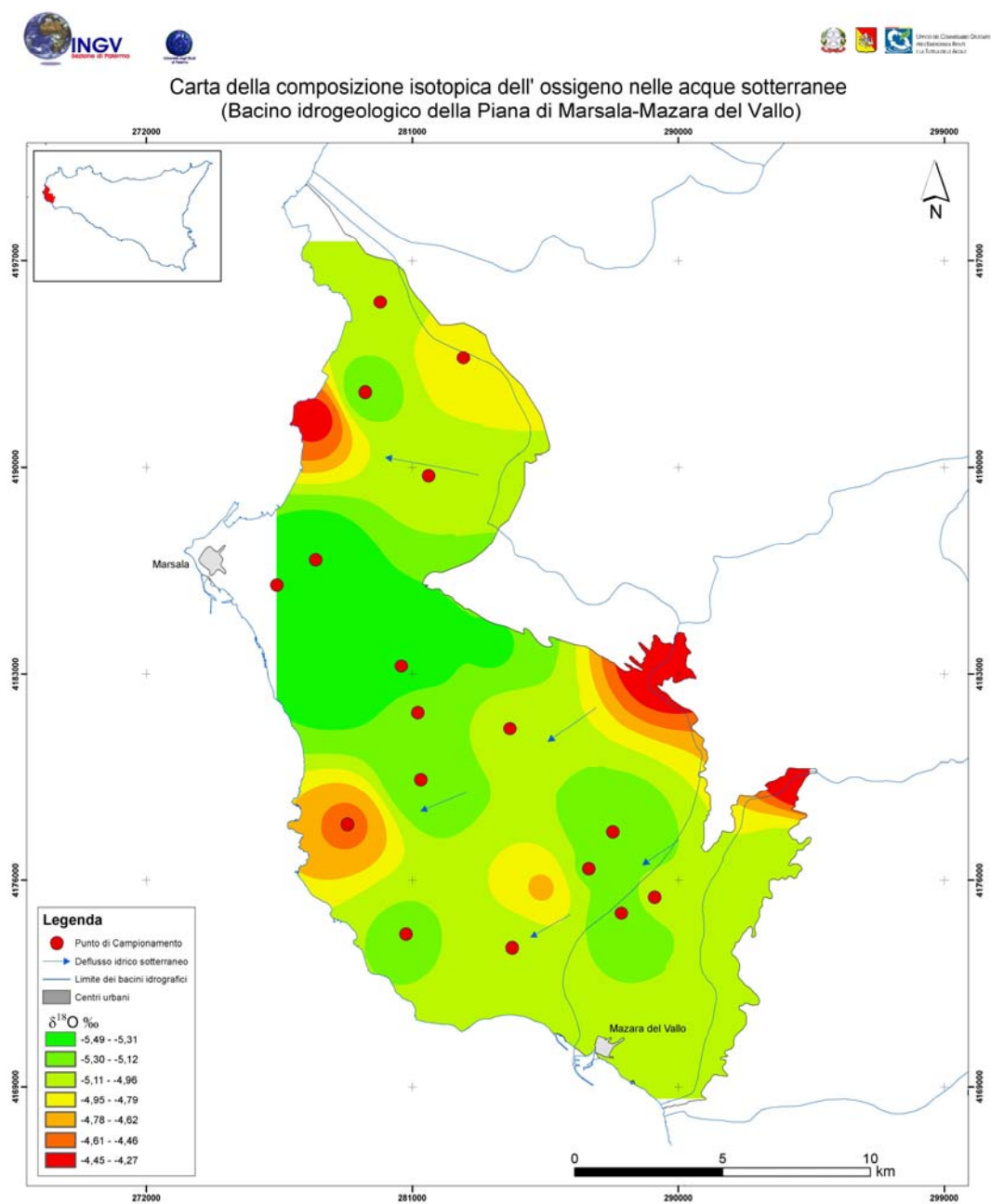


Fig. 26 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ di Marsala – Mazzara del Vallo

La mappa di Fig. 26 distingue in maniera chiara le differenze isotopiche dell'acquifero. Va però considerato che il range di variazione rappresentate è di poco più di un delta ‰, con mancanza di valori negativi che avrebbero indicato apporti da altre aree. Questi valori, rispetto al modello di composizione isotopica delle precipitazioni in Sicilia elaborato sulla base delle osservazioni effettuate sulla rete isotopica prevista dalla convenzione, sono compatibili con un'alimentazione da parte di precipitazioni che si sono verificate a quote basse che coincidono con l'area di affioramento delle calcareniti di Marsala costituenti il corpo idrico. In questa porzione di territorio il reticolo idrografico superficiale è poco sviluppato confermando che la precipitazione efficace, al netto dell'evapotraspirazione, alimenta quasi per intero l'acquifero sottostante.

Ai fini del piano di tutela, considerato l'attuale stato ambientale scadente sia per motivazioni quantitative che qualitative, dovute alla presente sull'altipiano di attività agricole e industriali, e considerato altresì che alcuni pozzi sono utilizzati per l'approvvigionamento idropotabile del comune di Marsala sarebbe necessario porre una serie di limiti di utilizzo nell'uso di fertilizzanti ed un attento controllo dei reflui industriali e di origine antropica.

Bacino idrogeologico “Piana di Castelvetro-Campobello di Mazara”

Il corpo idrico di Castelvetro – Campobello di Mazara, così come la Piana di Marsala – Mazara del Vallo, ha caratteristiche di altipiano a quote basse che evidenzia, in tutti i siti di monitoraggio del corpo idrico, valori di composizione isotopica dell'Ossigeno e del Deuterio che sono compresi rispettivamente tra -5,1 e -5,7 e tra -27 e -33.

Carta della composizione isotopica dell'ossigeno nelle acque sotterranee
(Bacino idrogeologico della Piana di Castelvetro-Campobello di Mazara)

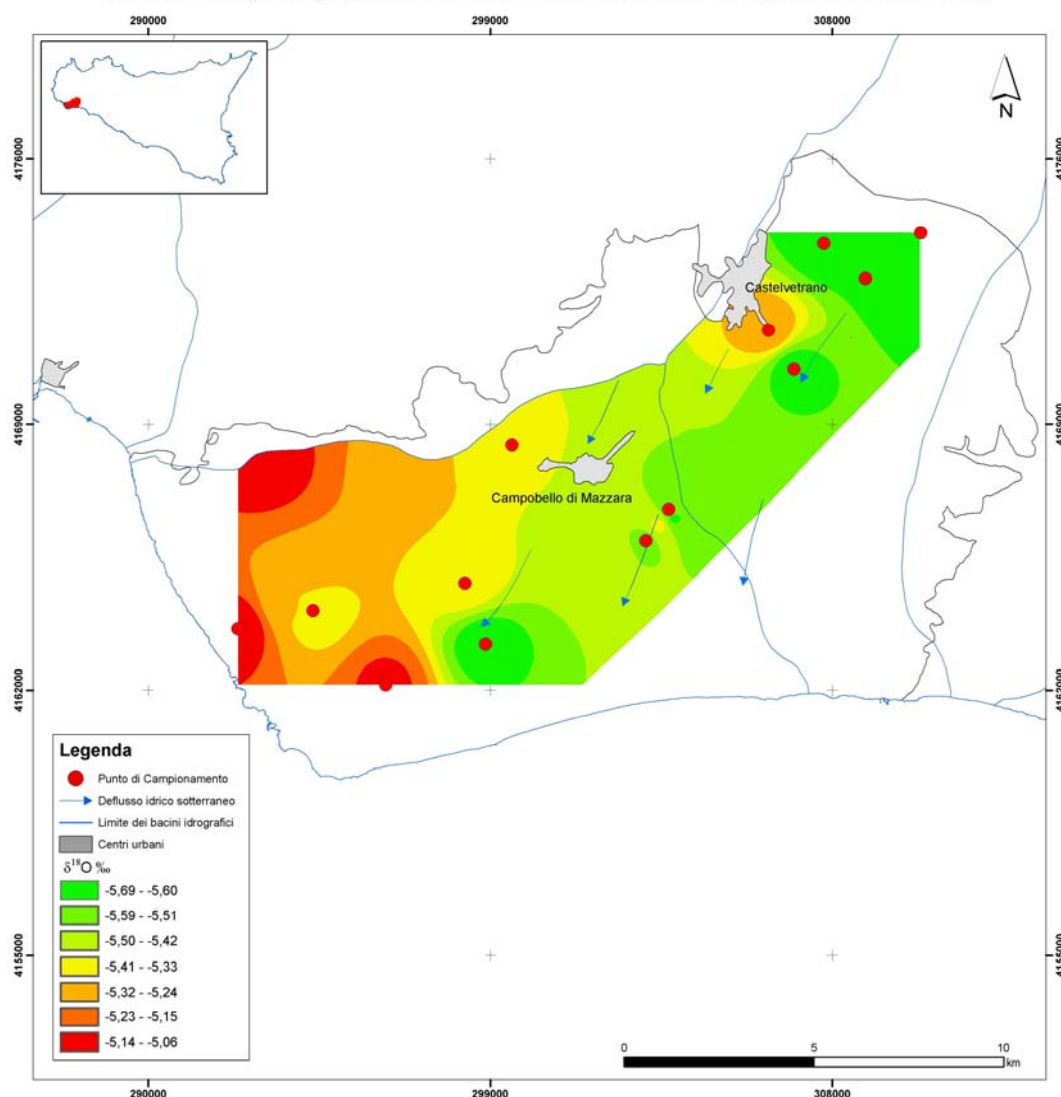


Fig. 27 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ di Castelvetro-Campobello di Mazara

La mappa di Fig. 27 distingue in maniera chiara le differenze isotopiche dell'acquifero. Va però considerato che il range di variazione rappresentate è di circa 0,7 delta ‰, con mancanza di valori negativi che avrebbero indicato apporti da altre aree. Va anzi sottolineato che i valori più positivi che si osservano nella mappa nell'area costiera sono connessi a zone di ingressione di acqua di mare nell'acquifero. Questi valori, rispetto al modello di composizione isotopica delle precipitazioni in Sicilia elaborato sulla base delle osservazioni effettuate sulla rete isotopica prevista dalla convenzione, sono compatibili con un'alimentazione da parte di precipitazioni

che si sono verificate a quote basse che coincidono con l'area di affioramento calcarenitico che costituiscono le rocce serbatoio del corpo idrico.

Ai fini del piano di tutela, considerato l'attuale stato ambientale scadente sia per motivazioni quantitative che qualitative, dovute alla presenza sulla piana di attività agricole, sarebbe necessario porre una serie di limiti di utilizzo nell'uso di fertilizzanti ed un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Bacino idrogeologico “Piazza Armerina”

Il corpo idrico di Piazza Armerina, che ha caratteristiche di altipiano calcarenitico ubicato nell'entroterra centro-meridionale dell'isola, esibisce valori isotopici che competono alle aree di affioramento del corpo idrico in questo settore della Sicilia. La composizione isotopica dell'Ossigeno e del Deuterio dei siti di monitoraggio, presenta valori che sono compresi rispettivamente tra -5,7 e -6,8 e tra -31 e -39.

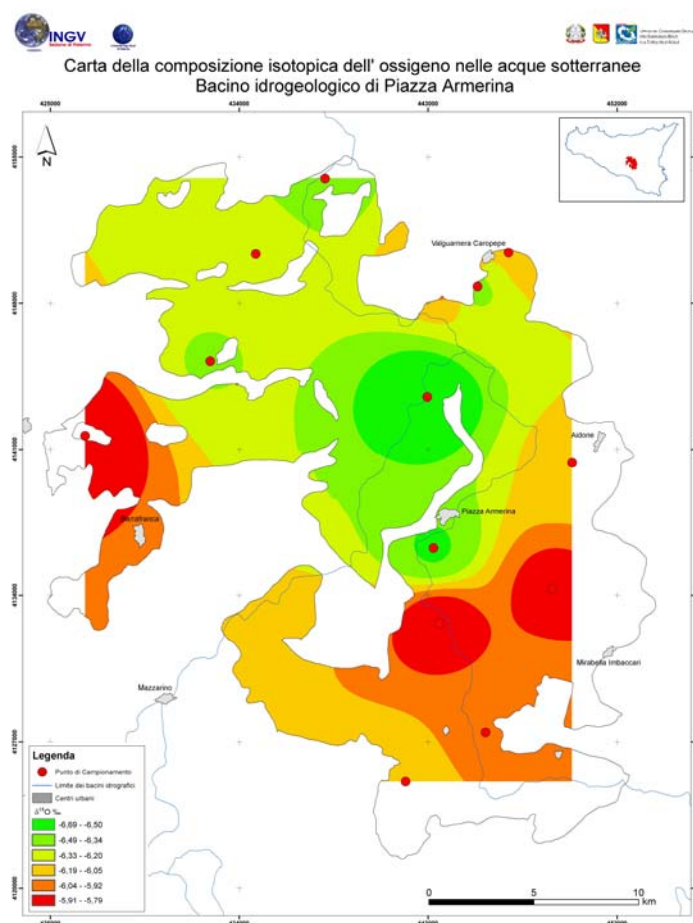


Fig. 28 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ di Piazza Armerina

In quasi tutti i siti, si riscontrano, nel secondo campionamento (stagione umida), valori di composizione più negativi che testimoniano, in alcuni settori del corpo idrico, la mancanza, di capacità di omogeneizzare i vari apporti idrici durante l'arco dell'anno. Anche in questo bacino idrogeologico non sono stati riscontrati valori più negativi rispetto a quanto non gli competerebbe per la sua posizione e che avrebbero indicato apporti da altre aree.

Ai fini del piano di tutela, considerato l'attuale stato ambientale sufficiente sia per motivazioni quantitative che qualitative, nonostante una consistente parte del suo territorio è riserva regionale, per cui lo stato ambientale del corpo idrico denota un certo degrado dovuto sia alla presenza di attività agricole intensive che alla presenza di centri urbani, per cui, sarebbe necessario porre una serie di limiti di utilizzo nell'uso di fertilizzanti ed un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Bacino idrogeologico “Peloritani”

L'area dei Peloritani è caratterizzata da una dorsale montuosa, le cui maggiori elevazioni superano di poco i 1.000 metri di quota, che si sviluppa in senso sud-ovest nord-est che degrada a nord verso il mar Tirreno e a sud verso lo ione. Ciò comporta la distinzione di due zone a caratteristiche climatiche diverse: le fasce litoranee o sub-litoranee tirrenica e ionica, con regime termico tipico delle aree mediterranee, con variabilità stagionale meno marcata e temperature medie annue minime e massime piuttosto contenute, favorite anche dall'effetto-tampone del mare. La seconda zona è quella della dorsale montuosa interna, in cui il clima tende maggiormente ad assumere caratteristiche di continentalità, ossia forti escursioni stagionali e temperature medie annue minime e massime più accentuate. Questa differenziazione ha notevole influenza sui processi dipendenti dalla temperatura, quali ad esempio la variabilità spaziale e temporale della composizione isotopica delle precipitazioni atmosferiche.

L'area peloritana è certamente una delle zone più complesse da interpretare rispetto alla circolazione delle acque sotterranee in quanto la situazione geologica e strutturale andrebbe ulteriormente indagata e approfondita con studi di dettaglio che siano in grado di meglio definire i rapporti reciproci tra le varie unità idrogeologiche. Il modello isotopico delle precipitazioni confrontato con la composizione isotopica dei punti di monitoraggio dei vari corpi idrici, è riuscito comunque a dare un importante contributo di chiarezza sulla individuazione delle aree di ricarica dei singoli corpi idrici.

La composizione isotopica dell'Ossigeno e del Deuterio dei siti di monitoraggio, presenta valori che sono compresi rispettivamente tra -5,0 e -8,8 e tra -27 e -57, che rappresentano un ampio campo di variabilità che conferma le notevoli differenze di contesto climatico che vengono riscontrate in questo territorio.

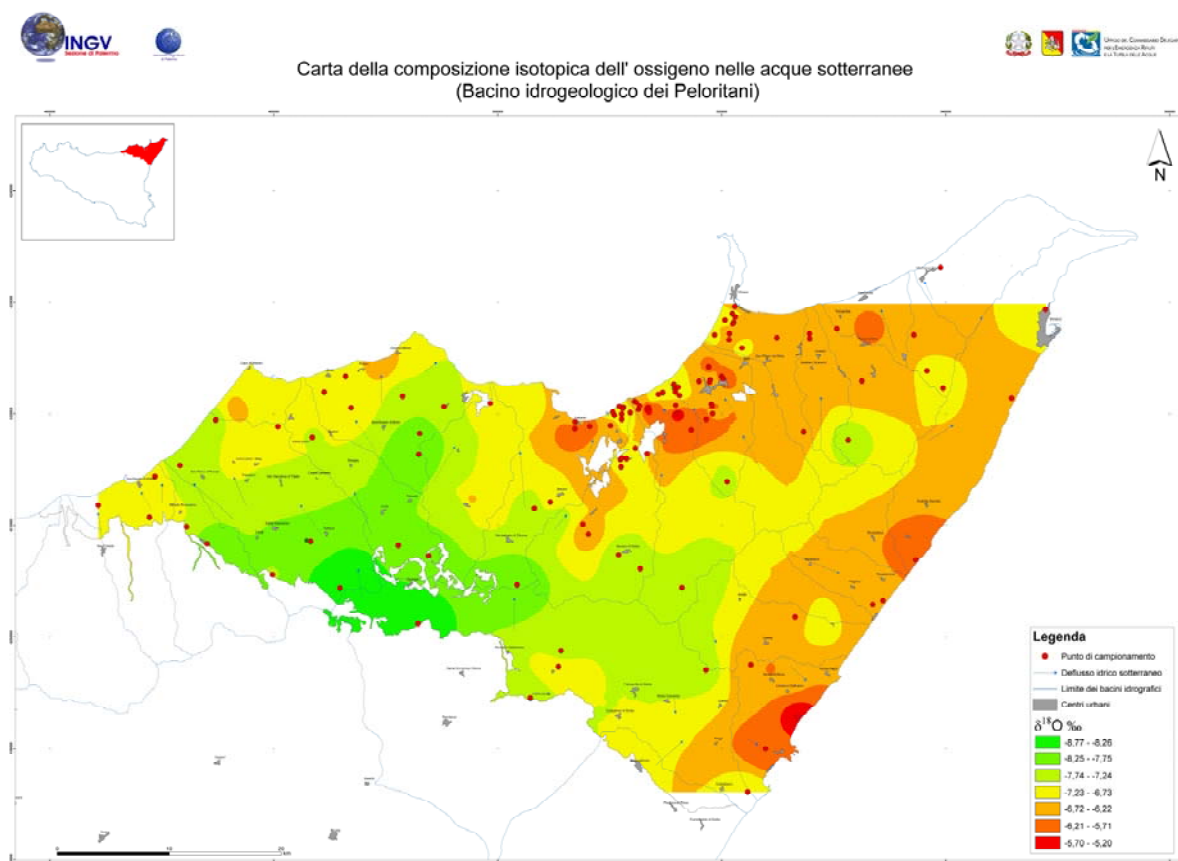


Fig. 29 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ dei Peloritani

La mappa di fig. 29 evidenzia una distribuzione isotopica delle acque da valori più negativi nella parte occidentale a valori più positivi nella parte orientale, ciò è legato alle maggiori quote che i complessi montuosi coinvolti hanno ad ovest mentre ad est l'altezza della dorsale è minore. Chiaramente questa distribuzione ha una notevole influenza sulle temperature e quindi sulla composizione isotopica.

Una parte importante del monitoraggio è stata dedicata alla piana di Barcellona – Milazzo che rappresenta il collegamento costiero di un sistema di fiumare che attraversano ortogonalmente la dorsale peloritani. Ciò vuol dire che questo corpo idrico ha una elevata valenza idrogeologica.

Peloritani Nord-occidentali

Il corpo idrico “ Peloritani nord-occidentali “ è sede di una falda idrica che non sembra avere connessioni con corpi idrici adiacenti, ciò è confermato dall'assetto geologico che prevede una struttura carbonatica su un substrato flyschioide

impermeabile i cui punti di recapito idrico mostrano composizioni isotopiche compatibili con l'infiltrazione efficace nelle porzioni affioranti del corpo idrico.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che quest'area non è sede di attività agricole e/o produttive di entità significativa. Per cui sarebbe necessario evitare in questa zona incrementi le attività agricole e insediamenti industriali ad alto impatto e mantenere un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Peloritani Occidentali

Il corpo idrico "Peloritani Occidentali" è certamente tra i più significativi presenti in questo bacino idrogeologico. E' infatti costituito da una estesa struttura carbonatica che raggiunge quote abbastanza elevate fino a circa 1.100 metri. I valori di composizione isotopica riscontrati nei siti di monitoraggio evidenziano una alimentazione di tutta la struttura in affioramento del corpo idrico. Anche emergenze idriche a bassa quote hanno caratterizzazione isotopica molto negativa che conferma un'alimentazione dalle quote più elevate del corpo idrico.

Inoltre questo corpo idrico non sembra avere significative interazioni con quelli adiacenti, in quanto sono delimitate morfotettonicamente da vari elementi strutturali.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che le aree montuose sopraccitate sono zone del demanio forestale o zone di protezione speciale. Per cui sarebbe necessario mantenere almeno l'attuale livello di protezione, anche in considerazione del fatto che sono presenti strutture carsiche di superficie che immettono direttamente in falda eventuali agenti inquinanti.

S. Agata-Capo d'Orlando

Il corpo idrico S. Agata-Capo d'Orlando possiede una notevole potenzialità idrica in quanto esso è costituito da depositi costieri e da depositi fluviali ad elevata permeabilità. Questi ultimi ricevono apporti idrici provenienti dal ruscellamento lungo i versanti costituiti da rocce poco permeabili.

I valori di composizione isotopica riscontrati nei siti di monitoraggio evidenziano una alimentazione proveniente da settori a quote medio-alte, che possono essere individuate nei tratti mediani delle fiumare che si connettono con i depositi della piana costiera. Il corpo idrico riceve anche una parziale alimentazione dai rilievi carbonatici

retrostanti la piana costiera, coerentemente con l'indicazione isotopica delle acque di falda.

Ai fini della redazione del piano di tutela delle acque, va sottolineato che questo corpo idrico ha uno stato ambientale scadente relazionato principalmente al sovrasfruttamento di questa falda, per cui la prima azione da compiere per il recupero del corpo idrico è la limitazione ed un controllo sugli attingimenti in falda. Inoltre data la presenza in questa zona di attività agricole, sarebbe necessario porre una serie di limiti di utilizzo nell'uso di fertilizzanti ed un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Peloritani Centrali

Il corpo idrico Peloritani Centrali è costituito in prevalenza da metamorfiti di vario grado. Esso affiora fino a quote di circa 800-900 metri e possiede delle parziali connessioni con i corpi adiacenti ed alimenta in parte le fiumare di Brolo, Gioiosa e Timeto. Ha una potenzialità abbastanza elevata e i cui punti di recapito idrico mostrano composizioni isotopiche compatibili con l'infiltrazione efficace nelle porzioni affioranti del corpo idrico.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto al fatto che su di esso insistono ampi settori boscati e che, ad eccezione dei centri urbani e di alcune contrade, l'attività antropica presente nelle aree di ricarica è molto ridotta e rappresentata da modeste ed isolate attività rurali di autosostentamento. Ai fini del piano di tutela delle acque sarebbe necessario approfondire le connessioni idrauliche che il corpo possiede con quelli adiacenti attraverso una opportuna indagine geologico-strutturale. E' inoltre necessario non incrementare l'attuale livello di impatto antropico derivante da locali attività agricole e industriali.

Peloritani Meridionali

Il corpo idrico Peloritani Meridionali è costituito esclusivamente dalle successioni arenaceo-argillitiche della Fm. Stilo-Capo d'Orlando. Esso si sviluppa fino a quote di 900-1000 metri e possiede delle parziali connessioni idrauliche con i corpi idrici adiacenti, che andrebbero investigate nel dettaglio attraverso più approfondite indagini geologico-strutturali. Possiede una elevata potenzialità idrica e uno stato

ambientale buono dovuto al fatto che su di esso vi sono settori molto ampi di bosco e una attività antropica molto ridotta.

La composizione isotopica delle acque campionate nei punti di monitoraggio confermano che l'alimentazione della falda avviene per l'infiltrazione efficace delle acque che precipitano entro il perimetro del corpo arenaceo affiorante.

Ai fini del piano di tutela delle acque è assolutamente necessario mantenere l'attuale stato di naturalità del territorio, evitando eventuali insediamenti industriali ad alto impatto.

Corpi idrici alluvionali (Brolo, Gioiosa Marea, Timeto, Roccalumera e Alcantara)

Questi corpi idrici vengono descritti unitariamente in quanto possiedono caratteristiche molto simili tra loro. Si tratta dei depositi alluvionali delle Fiumare di Brolo, Naso, Zappardino (Gioiosa Marea), Timeto sul versante tirrenico e Fiumedinisi, Agrò, Savoca e Pagliara (Roccalumera) sul quello ionico.

Sono depositi che possiedono delle elevate potenzialità idriche e che sono alimentate sia da acque di infiltrazione diretta che da quelle di ruscellamento provenienti dai versanti in cui affiorano i litotipi metamorfici di basso grado e quindi scarsamente permeabili. Essi ricevono anche alimentazione dai massicci metamorfici fessurati. I depositi alluvionali si saldano con quelli costieri e possiedono tutti uno stato ambientale buono dovuto al fatto che l'attività agricola nelle piane fluviali non è generalmente di tipo intensivo e non vi sono attività industriali di rilievo e ad alto impatto. Lungo i versanti dell'entroterra inoltre vi sono ampie aree boscate e adibite a pascolo.

I valori di composizione isotopica delle acque campionate nei diversi punti di monitoraggio sono coerenti con il tipo di ricarica descritta.

Ai fini della tutela è necessario mantenere l'attuale stato antropico dei luoghi, evitando di incrementare un'attività industriale o agricola ad alto impatto.

Piana di Barcellona-Milazzo

Il corpo idrico Barcellona-Milazzo possiede una potenzialità idrica estremamente elevata in quanto esso è costituito da un sistema di depositi alluvionali di importanti fiumare che si saldano a formare un'ampia piana costiera. Queste fiumare incidono la

dorsale peloritana che è costituita in prevalenza da metamorfiti di alto grado molto fessurate.

La composizione isotopica dei siti monitorati indicano che la piana riceve un'alimentazione idrica anche dal massiccio metamorfico che puntualmente viene evidenziata dai valori più negativi riscontrati in alcuni settori della piana, in verde nella mappa di fig. 30. E' anche evidente che nell'acquifero della piana arrivano anche i contributi dell'infiltrazione efficace di aree di ricarica poste a quota inferiore che mescolandosi con i contributi di quota più elevata conferiscono un marker di alimentazione di quote medio-alta che caratterizza ampi settori della piana.

Le fiumare che maggiormente drenano le acque di falda provenienti dai rilievi metamorfici sono Elicona, Mazzarrà, Niceto, Mela, Patri e Longano.

Lo stato ambientale del corpo idrico è complessivamente scadente. La presenza lungo la fascia costiera diverse attività industriali significative e di attività agricole intensive non sembra incidere tanto sulla qualità delle acque quanto sulle quantità di acqua edotta rispetto alle potenzialità del corpo idrico. Quindi, ai fini della redazione del piano di tutela delle acque, va sottolineato che lo stato ambientale scadente del corpo idrico è relazionato principalmente al sovrasfruttamento di questa falda, per cui la prima azione da compiere per il recupero del corpo idrico è la limitazione ed il controllo degli attingimenti in falda. Inoltre data la presenza in questa zona di attività agricole intensive, sarebbe necessario porre una serie di limiti di utilizzo nell'uso di fertilizzanti ed un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Carta della composizione isotopica dell'ossigeno nelle acque sotterranee
(Corpo idrico Piana di Barcellona-Milazzo)

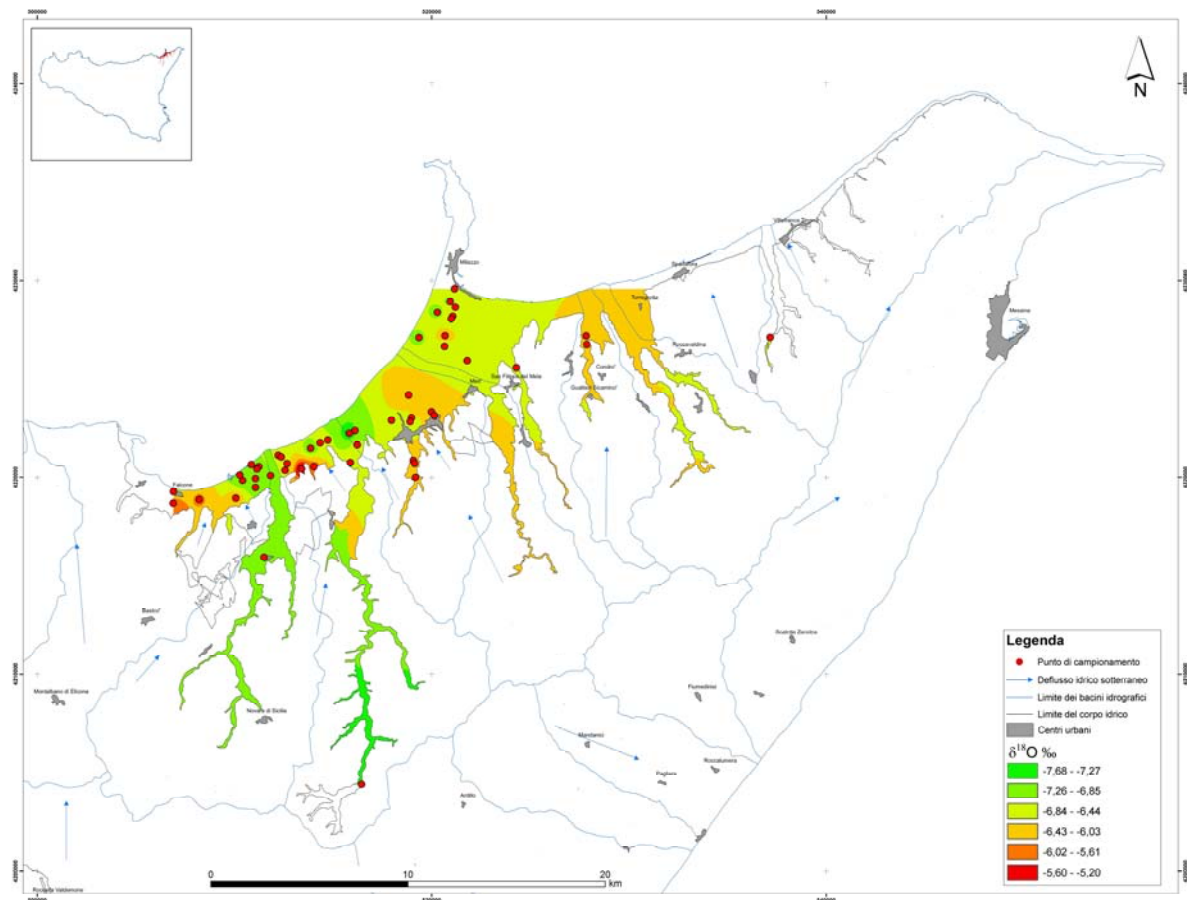


Fig. 30 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ della Piana di Barcellona-Milazzo

Un attento controllo deve anche essere esercitato anche rispetto alle attività industriali presenti nella piana. Ciononostante, lungo le fiumare l'attività antropica è notevolmente più ridotta, così come quella agricola, mentre quella industriale è assente.

Ai fini del piano di tutela delle acque è consigliabile quindi preservare questi tratti di fiumara da eventuali impatti derivanti dall'istaurarsi di attività inquinanti sia industriali che agricole.

Messina-Capo Peloro

Il corpo idrico Messina-Capo Peloro possiede delle caratteristiche molto simili a quello Barcellona-Milazzo, benchè la sua estensione e quindi la sua potenzialità idrica

siano inferiori.

Esso è costituito completamente dai depositi ghiaiosi sui quali si sviluppa l'area metropolitana di Messina. Tali depositi ricevono sia un'infiltrazione delle acque meteoriche che un'alimentazione diretta dai rilievi metamorfici fessurati che costituiscono i rilievi retrostanti la città di Messina, così come evidenziato dai valori di composizione isotopica delle acque monitorate che indicano alimentazioni da quote maggiori rispetto a quelle medie della piana di Messina.

Lo stato ambientale del corpo idrico è scadente, dato che su di esso insiste l'intera area metropolitana rappresentata anche dalla zona industriale presente nel settore meridionale della piana.

Non è migliorabile lo stato qualitativo della falda presente entro il corpo idrico. E' possibile tentare di salvaguardare i settori pedecollinari retrostanti la città, lungo il confine tra il corpo idrico e i rilievi metamorfici, in quanto in queste aree è meno intenso il processo di antropizzazione e pertanto lo stato qualitativo delle acque può risultare meno scadente e pertanto soggetto ad eventuali politiche di tutela.

Peloritani Nord-orientali

Il corpo idrico Peloritani Nord-orientali è costituito da successioni clastiche cementate che poggiano su un substrato impermeabile. Esso è costituito da rilievi che raggiungono i 450-500 metri, alimenta in parte la piana costiera di Barcellona-Milazzo ed in parte possiede connessioni idrauliche con la dorsale metamorfica. Queste ultime si realizzano attraverso una gradinata di faglie dirette neotettoniche.

L'alimentazione del corpo idrico avviene pertanto quasi esclusivamente per infiltrazione efficace delle acque meteoriche che si riversano entro il suo perimetro affiorante, così come confermano i valori di composizione isotopica delle acque monitorate.

La sua potenzialità idrica è molto elevata e il suo stato ambientale è buono e risulta conseguente all'assenza di attività industriali e/o agricole di rilievo. Pertanto, ai fini del piano di tutela delle acque è necessario mantenere l'attuale stato dei luoghi evitando l'installazione di impianti industriali che prevedano la produzione di scarti fluidi inquinanti.

Peloritani Orientali

Il corpo idrico Peloritani orientali è costituito da rocce metamorfiche di alto grado che

compongono rilievi che raggiungono quote anche superiori a 1000-1100 metri.

Esso possiede una notevole potenzialità idrica e alimenta in parte i corpi idrici circostanti. La composizione isotopica delle acque campionate nei punti di monitoraggio confermano che l'alimentazione della falda avviene per l'infiltrazione efficace delle acque che precipitano entro il perimetro del corpo idrico affiorante.

Il suo stato qualitativo è buono e dipende dal fatto che su di esso vi è una ridottissima attività antropica, agricola ed industriale ed è per buona parte ricoperto da coperture boschive o da macchia mediterranea.

Data la sua importanza idrogeologica, ai fini del piano di tutela delle acque, sarebbe necessario mantenere almeno l'attuale livello di naturalità dei luoghi, evitando eventuali insediamenti industriali e/o agricoli ad alto impatto.

Peloritani Sud-orientali

Il corpo idrico Peloritani Sud-orientali è costituito da corpi carbonatici che costituiscono rilievi che raggiungono i 600 metri. Possiede delle parziali connessioni idriche con i corpi adiacenti che andrebbero indagate in modo più approfondito tramite studi di multidisciplinari di carattere geologico-strutturale.

Ha una media potenzialità idrica. La composizione isotopica delle acque campionate nei punti di monitoraggio confermano che l'alimentazione della falda avviene attraverso l'infiltrazione efficace nelle rocce affioranti del corpo idrico..

Il suo stato qualitativo è buono ed è relativo al fatto che l'urbanizzazione è rappresentata da pochi centri abitati (Taormina, Castelmola Mongiuffi Melia) e da alcune case rurali sparse sul territorio. Non vi è inoltre attività industriale.

Ai fini della redazione del piano di tutela sarebbe necessario evitare in questa zona attività agricole intensive e insediamenti industriali ad alto impatto e mantenere un attento controllo dei reflui di origine antropica nelle località turistiche.

Floresta

Il corpo idrico Floresta è costituito da limitati affioramenti di successioni arenacee mioceniche che formano corpi tabulari affioranti a circa 1000 metri di quota. Il corpo idrico poggia su un substrato argilloso impermeabile che appare isolato completamente alla base. Tuttavia, le portate dei punti d'acqua monitorati non appaiono coerenti con l'estensione del corpo idrico e pertanto andrebbero approfonditi i rapporti idraulici tra esso e i corpi idrici produttivi sottostanti (corpo idrico Peloritani

Meridionali). La composizione isotopica delle acque campionate nei punti di monitoraggio confermano che l'alimentazione della falda avviene per l'infiltrazione efficace delle acque che precipitano entro il perimetro del corpo arenaceo affiorante.

La qualità ambientale è buona e deriva dal fatto che nei luoghi di affioramento (Floresta) vi è una ridotta attività antropica, che si manifesta solo attraverso pascoli di modesta entità.

Ai fini del piano di tutela delle acque è necessario mantenere lo stato di naturalità dei luoghi, evitando l'insediarsi di attività colturali o produttive che prevedano lo scarto di reflui inquinanti.

Naso

Il corpo idrico Naso è costituito da depositi arenacei pleistocenici posti a quota di alcune centinaia di metri.

Esso è limitato verso il basso da depositi argillosi a permeabilità molto bassa e pertanto non dovrebbe avere connessioni idrauliche significative con i corpi idrici adiacenti.

La composizione isotopica delle acque monitorate suggerisce che la ricarica del corpo idrico avviene essenzialmente per infiltrazione diretta nei litotipi affioranti del corpo idrico.

Il suo stato qualitativo è particolare ed è dovuto al fatto che pur essendovi un impatto antropico modesto la sua potenzialità idrica non è elevata. Pertanto, ai fini del piano di tutela delle acque non è necessario prevedere particolari sistemi di protezione ambientale.

Bacino idrogeologico "Piana di Catania"

La Piana di Catania ha una estensione di circa 428 km² ed è la più estesa pianura siciliana. La sua dimensione e l'attività agricola intensiva di cui è sede, unita alla particolare posizione geografica e geologica ne fanno una delle aree di interesse dal punto di vista idrogeologico. La peculiarità geologica sta nel fatto che la piana è compresa tra il margine settentrionale dell'Altipiano Ibleo e le propaggini meridionali dell'Etna quindi è soggetta ad interazioni con questi due bacini idrogeologici.

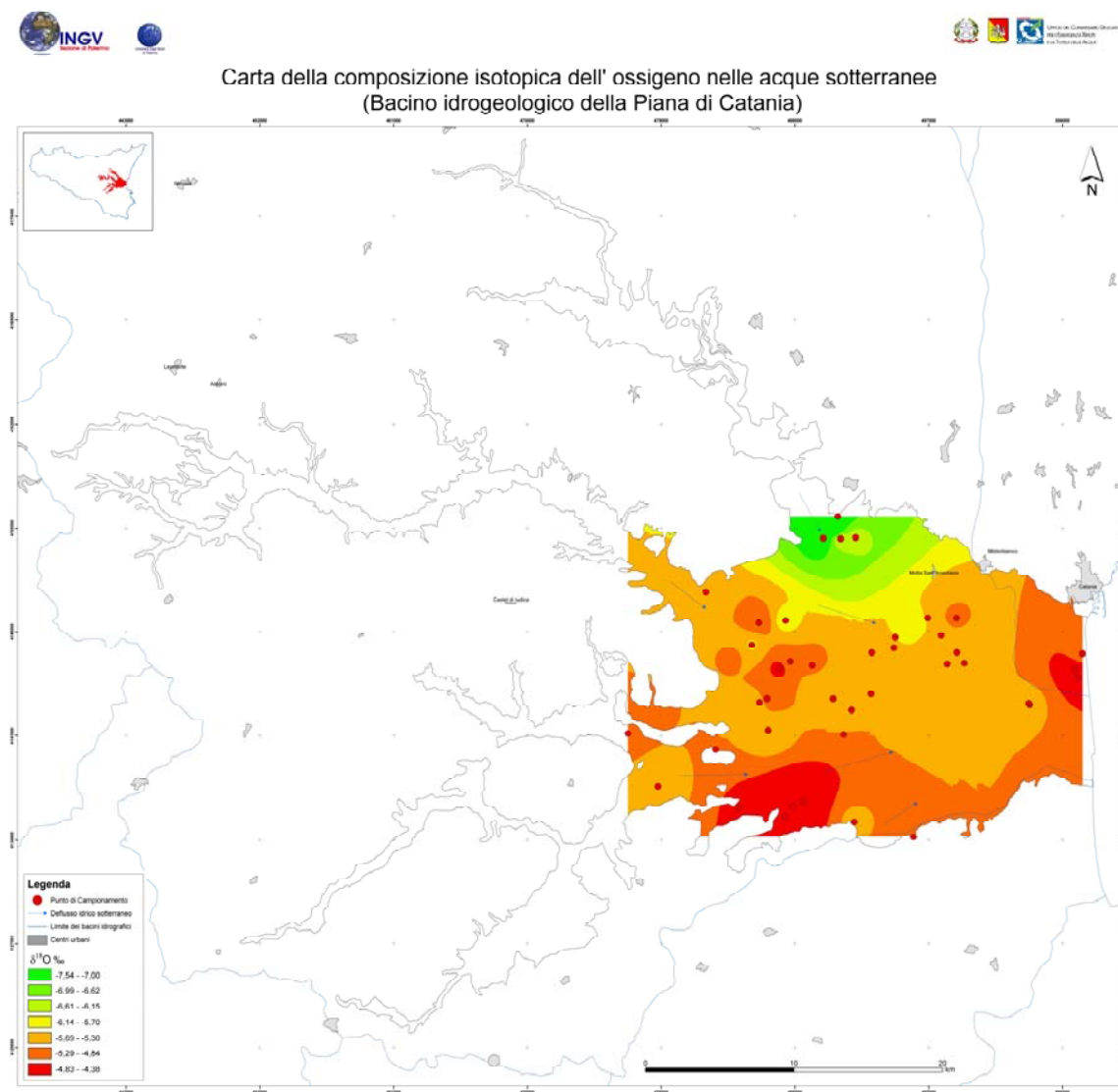


Fig. 31 – Mappa isotopica $\delta^{18}\text{O}$ della Piana di Catania

Tutti i siti di monitoraggio del corpo idrico hanno valori di composizione isotopica dell'Ossigeno e del Deuterio che sono compresi rispettivamente tra -3,59 e -7,54 e tra -21 e -43. Questi valori mettono in evidenza un' ampia variabilità dei risultati che non

possono essere giustificati dall'alimentazione risultante dalle porzioni affioranti del corpo idrico. Infatti, la mappa della composizione isotopica dell'ossigeno dei siti di monitoraggio evidenzia come la piana (fig.31), oltre ad avere una ricarica dell'acquifero derivante dalla sua superficie di affioramento, riceve contributi dai bacini idrogeologici limitrofi. Nella parte nord il contributo idrico è dato dall'Etna con contributi di acque a composizione isotopica molto negativa e relativi a precipitazioni avvenute a quote molto più elevate rispetto alla piana. Per quanto riguarda l'eventuale contributo di sversamento idrico dal fianco settentrionale ibleo questo sembra essere relativo ad acque di natura termale presenti in questo settore degli Iblei proprio in considerazione della particolare situazione strutturale di quest'area. Inoltre il contributo di acque termali modificate isotopicamente non sembra essere quantitativamente rilevante in quanto influenza poco la composizione isotopica dell'acquifero della Piana.

Ai fini del piano di tutela, considerato l'attuale stato ambientale scadente sia per motivazioni quantitative che qualitative, dovute principalmente alla presenza sulla piana di attività agricole intensive, sarebbe necessario porre una serie di limiti di utilizzo nell'uso di fertilizzanti ed un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Bacino idrogeologico “Monti di Trabia-Termini Imerese”

Il bacino idrogeologico di Trabia-Termini Imerese per la sua conformazione geologico-strutturale è una di quelle aree che avrebbe la necessità di studi di dettaglio per capire meglio quali sono i rapporti reciproci tra le unità idrogeologiche e le loro eventuali connessioni in profondità. Questo tipo di esigenza viene fuori anche dall'analisi dei dati di composizione isotopica che in tutti i siti di monitoraggio dei vari corpi idrici, sono compresi rispettivamente tra -7,07 e -8,09 per l'Ossigeno e tra -41 e -46 per il Deuterio. Fanno chiaramente eccezione le terme di Termini Imerese e il pozzo Ponte Sicilia che hanno una forte componente termale .

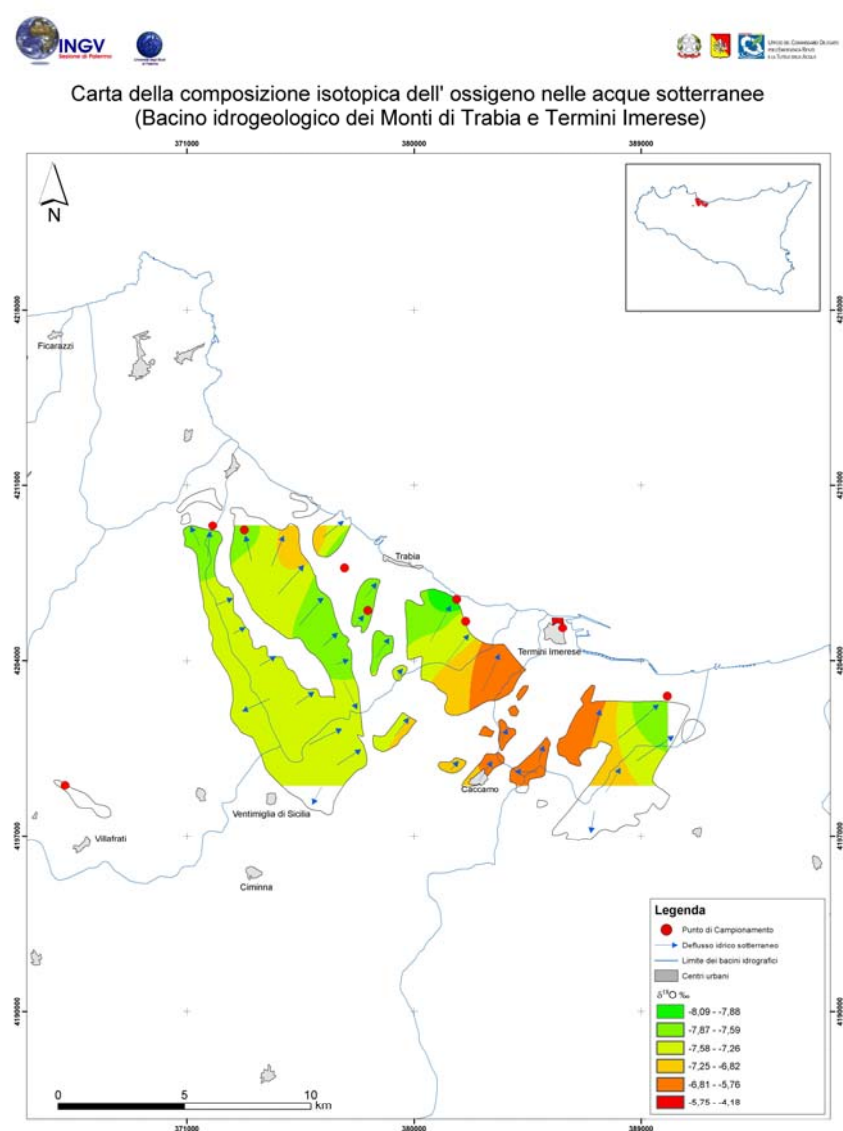


Fig. 32 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ dei Monti di Travia e Termini Imerese

Questi dati sono molto negativi rispetto alle zone montuose coinvolte nei vari corpi idrici e comporta un'alimentazione da aree con quote medie intorno ai 1.000 metri. In parte questo assetto isotopico può essere giustificato dalla presenza dei rilievi prevalentemente calcareo-dolomitici tra i quali spiccano le due dorsali di Monte Cane e Monte S. Onofrio tra Trabia e Ventimiglia di Sicilia, il Monte S. Calogero (1325 m s.l.m.) tra Termini Imerese, Caccamo e Sciara. Però va anche considerato che il bacino idrogeologico di Trabia-Termini Imerese ricade all'interno dei bacini idrografici dei fiumi Torto, S. Leonardo, che hanno a loro volta un bacino imbrifero molto esteso nell'entroterra, rendono probabile un apporto in falda di acque isotopicamente più negative non solo per effetto quota ma anche per effetto di continentalità. Inoltre andrebbero verificate eventuali connessioni profonde tra il bacino idrogeologico di Trabia-Termini Imerese e strutture carbonatiche dell'immediato entroterra.

Corpo idrico Pizzo Cane-Monte S. Calogero

Questo corpo idrico ha caratteristiche di circolazione che possiamo differenziare sulla falda di Monte Cane –Pizzo Trigna e la falda di monte S.Calogero. Tutti e due i circuiti hanno una compatibilità isotopica con le loro rispettive aree montuose che alimentano gli acquiferi: Monte Cane-Pizzo Trigna e Monte S.Calogero. La mappa isotopica di fig. evidenzia per questo corpo idrico una zona dove prevale il colore rosso che è relativo a punti di monitoraggio dove è stato evidenziato un contributo termale che risulta essere modificato e quindi non significativo ai fini della modellizzazione isotopica.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che le aree montuose sopraccitate sono zone del demanio forestale o zone di protezione speciale. Per cui sarebbe necessario mantenere almeno l'attuale livello di protezione.

Corpo idrico Monte Rosamarina-Monte Pileri

I punti di monitoraggio di questo corpo idrico esibiscono tutti valori di composizione isotopica molto negativi, per cui pur ammettendo che una parte della ricarica meteorica può provenire dallo sversamento idrico dalla dorsale montuosa di S.Onofrio è probabile un contributo di unità carbonatiche dell'immediato entroterra che possono essere in continuità idraulica con questo corpo idrico.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che le aree montuose sopraccitate sono zone del demanio forestale. Per cui sarebbe necessario mantenere almeno l'attuale livello di protezione.

Corpo Idrico Monte S.Onofrio-Monte Rotondo

Questo corpo idrico ha caratteristiche di circolazione che possiamo differenziare sulla falda di Monte S.Onofrio e la falda di monte Monte Rotondo. Tutti e due i circuiti hanno una compatibilità isotopica con le loro rispettive aree montuose che alimentano gli acquiferi: Monte S.Onofrio e Monte Rotondo. La mappa isotopica di fig. evidenzia la compatibilità dell'alimentazione del corpo idrico con le rispettive aree ricarica evidenziate dai valori isotopici dei punti di monitoraggio.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale scadente. Il recupero di questo corpo idrico è connesso a studi di dettaglio, che come precedentemente accennato dovrebbero risolvere l'assetto geologico-strutturale dell'area.

Corpo idrico Capo Grosso-Torre Colonna

Il sito di monitoraggio di questo corpo idrico evidenzia una composizione isotopica molto negativa rispetto alle sue aree di affioramento -8,06 sull'Ossigeni e -43 sul deuterio. Questi valori sono compatibili con aree di ricarica media intorno ai 1.000 metri che non sono certamente comprese nelle zone in cui i litotipi che costituiscono il corpo idrico affiorano. Ciò vuol dire essenzialmente che la ricarica di questo corpo idrico avviene attraverso connessioni sotterranee con zone dove si infiltrano acque con queste caratteristiche. Per cui anche in questo caso per la pianificazione del recupero di questo corpo idrico è necessario effettuare studi di dettaglio per modellizzare l'assetto geologico-strutturale dell'area.

Corpo idrico di Pizzo Chiarastella

Anche in questo caso abbiamo una scarsa compatibilità tra composizione isotopica dei siti di monitoraggio, l'affioramento del corpo idrico, ma soprattutto non è relazionabile la quantità d'acqua che viene edotta per scopi idropotabili dal comune di Villafrati e l'estensione dell'affioramento di Pizzo Chiarastella. Anche in questo caso

la pianificazione del recupero di questo corpo idrico è connesso a studi specifici che riescano a dare un quadro esauriente sulle connessioni profonde tra i vari corpi idrici di questo bacino idrogeologico ed eventuali interconnessioni con altri bacini.

Bacino idrogeologico “Rocca Busambra”

Il bacino idrogeologico di Rocca Busambra comprende tre corpi idrici di cui solo uno è stato ritenuto significativo e su cui è stato effettuato il monitoraggio. Il corpo idrico significativo è quello di Rocca Busambra che comprende tutta una struttura carbonatica allungata in senso est-ovest dove i valori isotopici delle acque dei siti di monitoraggio sono compatibili con le porzioni affioranti del corpo idrico. L'elevazione maggiore di Rocca Busambra raggiunge i 1600 metri di quota.

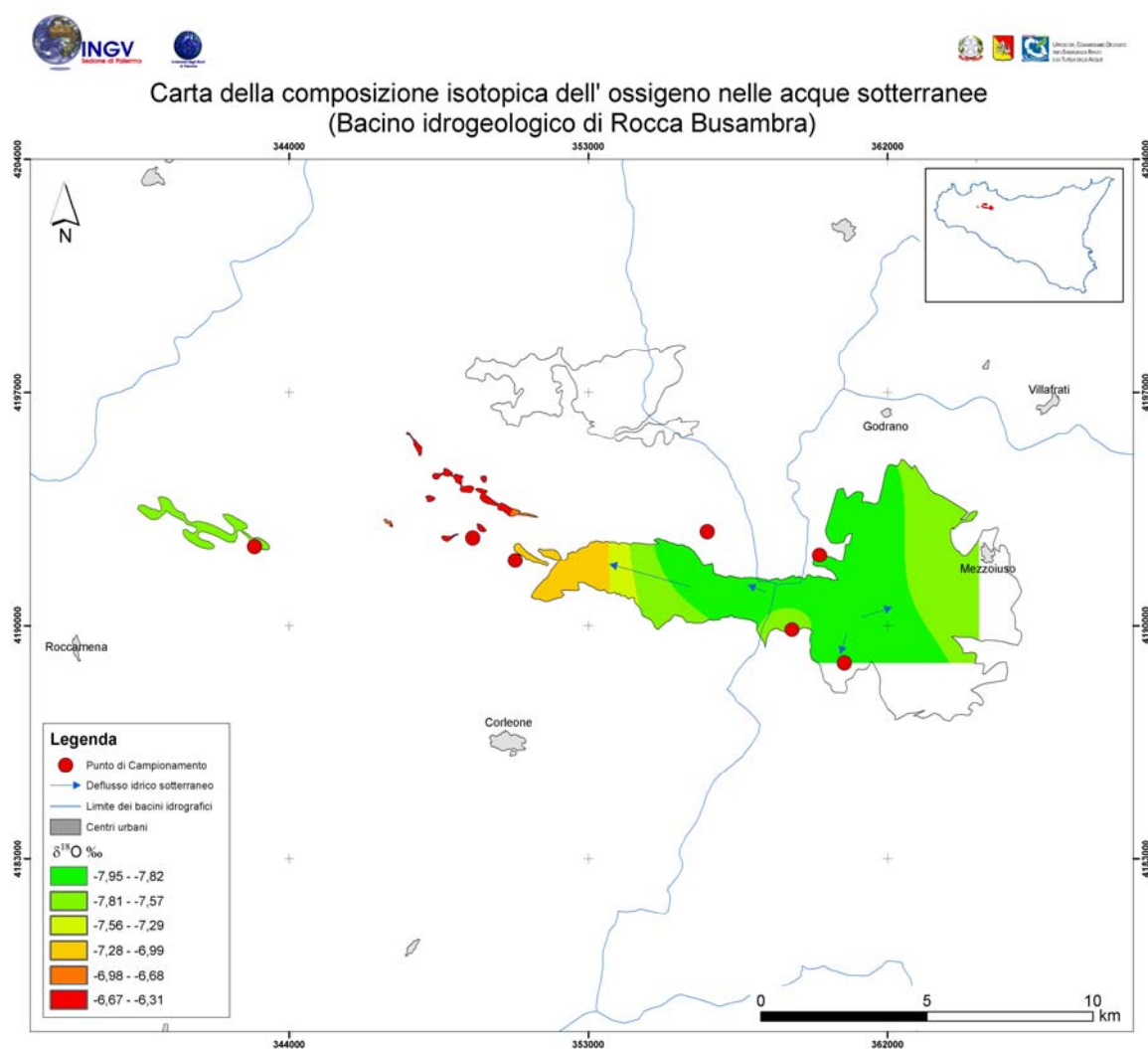


Fig. 33 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ di Rocca Busambra

La mappa di fig. 33, che è stata realizzata su un campo di valori poco inferiore a due delta ‰. Tutte le acque di tutti i siti, tranne Magione, sono comprese tra -7 e -8 delta

‰ sull'Ossigeno. Per cui le aree di ricarica del corpo idrico sono individuate nell'affioramento carbonatico di Rocca Busambra e man mano che i siti di monitoraggio scendono di quota risentono dell'apporto delle precipitazioni che si verificano a quota via via inferiore.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che le aree montuose sopraccitate sono zone del demanio forestale o zone di protezione speciale. Per cui sarebbe necessario mantenere almeno l'attuale livello di protezione.

Bacino idrogeologico “Sicani”

Il bacino idrogeologico dei Monti Sicani comprende un'area estesa a cavallo delle province di Agrigento e Palermo, con una serie di rilievi montuosi che superano i 1000 metri (Monte Cammarata, 1524 m, Monte Genuardo 1180, Monte delle Rose 1436). Dal punto di vista della disponibilità e gestione della risorsa idrica l'area Sicana riveste un ruolo strategico in quanto è il più vasto comprensorio carbonatico della Sicilia centro-meridionale e quindi è sede dei maggiori acquiferi di questo settore della Sicilia. Proprio per questo motivo sarebbe necessario studiare nel dettaglio questa zona, con lo scopo di avere un quadro ben definito di tutti i rapporti relativi tra i vari corpi idrici specialmente per quanto riguarda le strutture sotterranee. La caratterizzazione isotopica delle precipitazioni dell'area ed il relativo confronto con i valori isotopici dei siti di campionamento riescono a dare buone indicazioni per la determinazione delle aree di ricarica dei relativi corpi idrici. Queste indicazioni vengono anche supportate dall'assetto geologico e morfologico dei vari complessi montuosi.

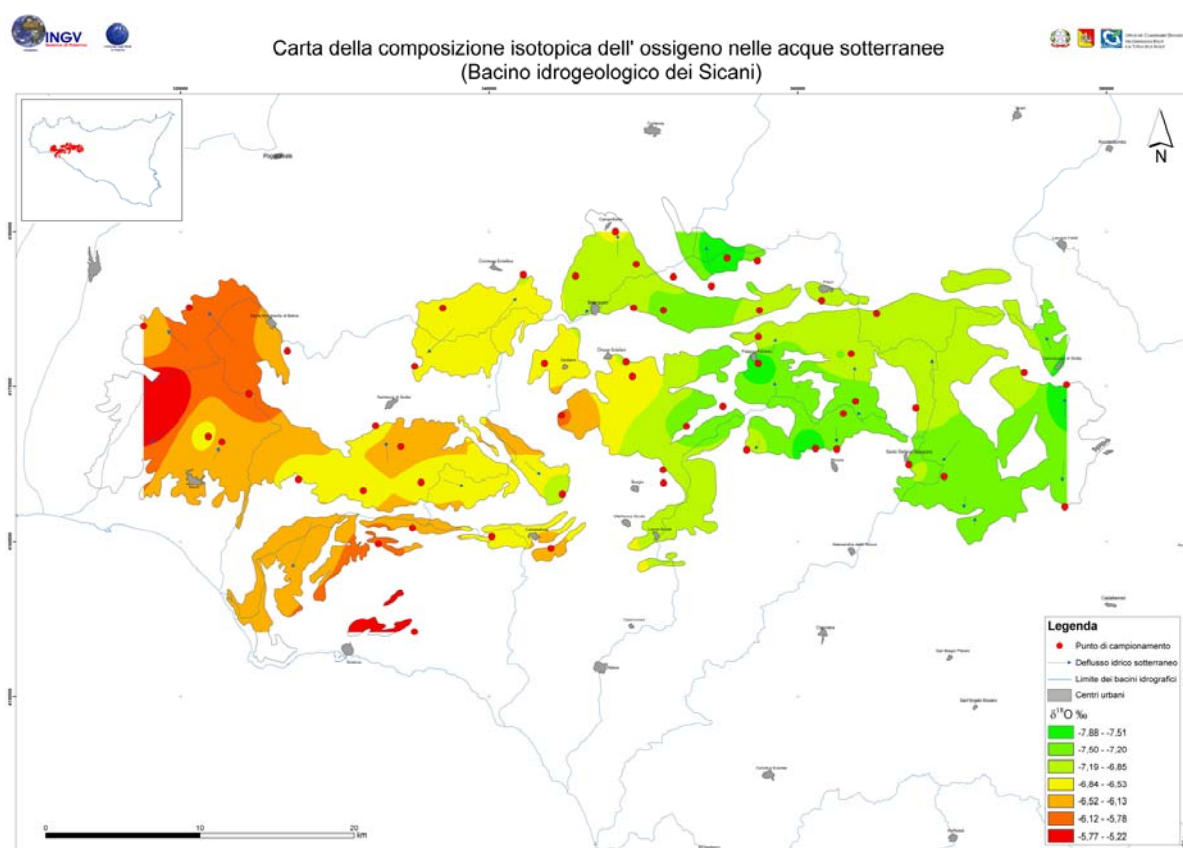


Fig. 34 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ dei Sicani

Questa zona è caratterizzata dalla presenza di alcune riserve naturali: Monte Carcaci, Monte Cammarata, Monti di Palazzo Adriano e Valle del Sosio, Monte Genuardo e S. Maria del Bosco. Sono anche presenti acquiferi termali che incidono consistentemente in alcuni settori della parte occidentale sicana.

Nella mappa di fig. 34 viene evidenziato che gli acquiferi occidentali sono più positivi perché le loro aree di ricarica sono ubicate a bassa quota, questa caratteristica viene ulteriormente accentuata dalla presenza di bacini termali di grande potenzialità come la sorgente Acqua Pia di Montevago e le sorgenti termali di Sciacca. Verso oriente, proprio in virtù della presenza dei gruppi montuosi più elevati di quota, abbiamo i valori più negativi della ricarica meteorica.

La composizione isotopica dell'Ossigeno e del Deuterio dei siti di monitoraggio, presenta valori che sono compresi rispettivamente tra -5,0 e -8,3 e tra -29 e -46, che rappresentano un ampio campo di variabilità che conferma le notevoli differenze in termini di alimentazione degli acquiferi riscontrati in questo territorio.

Menfi -Capo S. Marco

Il corpo idrico di Menfi-Capo S.Marco, è formato da calcareniti pleistoceniche che giacciono sui depositi argillosi ed argillo-marnosi del Pliocene medio-superiore che ne rappresentano il substrato impermeabile.

I valori isotopici dei siti di campionamento sono compatibili con aree di alimentazione a bassa quota corrispondenti con la aree di affioramento del corpo idrico. La parte occidentale del corpo idrico esibisce valori più positivi relazionati con la presenza di circuiti termali che non sono direttamente relazionabili con un'alimentazione diretta.

Ai fini della redazione del piano di tutela delle acque, va sottolineato che questo corpo idrico ha uno stato ambientale scadente relazionato principalmente al sovrasfruttamento di questa falda, per cui la prima azione da compiere per il recupero del corpo idrico è la limitazione ed un controllo sugli attingimenti in falda. Inoltre data la presenza in questa zona di attività agricole, sarebbe necessario porre una serie di limiti di utilizzo nell'uso di fertilizzanti ed un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Montevago

Il corpo idrico di Montevago, è formato da calcareniti pleistoceniche che giacciono

sui depositi argillosi ed argillo-marnosi del Pliocene medio-superiore che ne rappresentano il substrato impermeabile. Anche in questo caso i valori isotopici dei siti di monitoraggio sono compatibili con aree di alimentazione a bassa quota corrispondenti con la aree di affioramento del corpo idrico.

Ai fini della redazione del piano di tutela delle acque, va sottolineato che questo corpo idrico ha uno stato ambientale scadente relazionato sia al sovrasfruttamento di questa falda, che ad una compromessa situazione qualitativa relativa specialmente alla presenza di nitrati. Le azioni drastiche da mettere in atto per il recupero del corpo idrico vanno in due direzioni: La limitazione ed un controllo sugli attingimenti in falda. La limitazione e il controllo sull'utilizzo dei fertilizzanti nitrati in particolare, oltre che naturalmente un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Saccense Meridionale

Il corpo idrico Saccense meridionale, è costituito da una successione carbonatica con quote massime poco al di sotto dei 1.000 metri. I valori isotopici dei siti di monitoraggio evidenziano che questo corpo idrico viene alimentato dagli affioramenti carbonatici del corpo idrico stesso, fa eccezione il sito di fontana calda che collegato al bacino termale di Sciacca e che esibendo valori isotopici modificate non deve essere considerato in questa fase.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che le aree montuose che costituiscono le aree di ricarica del corpo idrico, sono zone del demanio forestale. Per cui sarebbe necessario mantenere almeno l'attuale livello di protezione.

Monte Genuardo

Il corpo idrico di Monte Genuardo si estende su un'area di circa 36 km², ed è costituito da un corpo carbonatico che dà luogo ad una serie permeabile in superficie valutabile in alcune centinaia di metri. I valori isotopici dei siti di monitoraggio evidenziano che questo corpo idrico viene alimentato dagli affioramenti carbonatici del corpo idrico stesso. Ciò trova anche conferma nel fatto che monte Genuardo è una struttura isolata rispetto agli altri complessi montuosi limitrofi.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che le aree montuose che costituiscono le

aree di ricarica del corpo idrico, sono zone del demanio forestale. Per cui sarebbe necessario mantenere almeno l'attuale livello di protezione.

Sicani centrali

Il corpo idrico dei Sicani centrali comprende una serie di rilievi la cui massima elevazione è costituita da monte delle Rose 1.436 metri. Anche in questo caso i valori isotopici dei siti di monitoraggio evidenziano che questo corpo idrico viene alimentato dagli affioramenti carbonatici del corpo idrico stesso, senza alcuno sversamento da altri corpi idrici con caratteristiche differenti.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che le aree montuose che costituiscono le aree di ricarica del corpo idrico, sono zone del demanio forestale. Per cui sarebbe necessario mantenere almeno l'attuale livello di protezione.

Sicani Meridionali

Il corpo idrico dei Sicani Meridionali comprende una serie di rilievi la cui massima elevazione è costituita da Pizzo Gallinaro 1.220 metri. Anche in questo caso i valori isotopici dei siti di monitoraggio evidenziano che questo corpo idrico viene alimentato dagli affioramenti carbonatici del corpo idrico stesso, senza alcuno sversamento da altri corpi idrici con caratteristiche differenti.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che le aree montuose che costituiscono le aree di ricarica del corpo idrico, sono zone del demanio forestale. Per cui sarebbe necessario mantenere almeno l'attuale livello di protezione.

Sicani Orientali

Il corpo idrico dei Sicani Orientali comprende una serie di rilievi la cui massima elevazione è costituita da Monte Cammarata 1.578 metri. I valori di composizione isotopica dei siti di monitoraggio evidenziano che questo corpo idrico viene alimentato dagli affioramenti carbonatici del corpo idrico stesso. I valori sono anche tra i più negativi dell'area proprio in virtù della quota media più elevata di tutti i rilievi del corpo idrico.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che le aree montuose che costituiscono le

aree di ricarica del corpo idrico, sono zone del demanio forestale. Per cui sarebbe necessario mantenere almeno l'attuale livello di protezione.

Sicani Settentrionali

Il corpo idrico dei Sicani Settentrionali comprende una serie di rilievi la cui massima elevazione è costituita da Monte Barraci 1.420 metri. I valori di composizione isotopica dei siti di monitoraggio evidenziano che questo corpo idrico viene alimentato dagli affioramenti carbonatici del corpo idrico stesso. I valori sono anche tra i più negativi dell'area proprio in virtù della quota media più elevata di tutti i rilievi del corpo idrico.

Ai fini della redazione del piano di tutela, questo corpo idrico ha uno stato ambientale buono dovuto con molta probabilità al fatto che le aree montuose che costituiscono le aree di ricarica del corpo idrico, sono zone del demanio forestale. Per cui sarebbe necessario mantenere almeno l'attuale livello di protezione.

Monte Magaggiaro

Il corpo idrico di Monte Magaggiaro presenta nella sua parte sommitale un altopiano subpianeggiante di natura carbonatica. L'altezza media dell'altopiano è tra i 250 e i 300 metri con l'elevazione massima di Monte Magaggiaro a 399 metri di quota.

I valori isotopici dei siti di campionamento sono compatibili con aree di alimentazione a bassa quota corrispondenti con la aree di affioramento del corpo idrico. Nella porzione centro meridionale del corpo idrico abbiamo valori più positivi dovuti alla presenza del bacino termale di Montevago.

Ai fini della redazione del piano di tutela delle acque, va sottolineato che questo corpo idrico ha uno stato ambientale scadente relazionato principalmente alla qualità delle acque. Per cui data la presenza in questa zona di attività agricole, sarebbe necessario porre una serie di limiti di utilizzo nell'uso di fertilizzanti oltre che un attento controllo dei reflui di origine antropica. E' necessario anche tenere sotto controllo l'attingimento in questa falda considerato che i corpi idrici limitrofi hanno problemi di sovrasfruttamento.

Bacino idrogeologico “Monti di Palermo”

Il bacino idrogeologico dei monti di Palermo comprende un'area estesa intorno all'area urbana di Palermo ed è caratterizzata da una serie di rilievi montuosi di natura carbonatica che superano i 1000 metri (Monte Cuccio, Monte Gradara, La Pizzuta, Monte Kumeta, ecc).

Dal punto di vista della disponibilità della risorsa idrica, l'area dei monti di Palermo, riveste un ruolo strategico in quanto è un vasto comprensorio carbonatico che è sede di alcuni acquiferi rilevanti che supportano in maniera consistente il fabbisogno idrico della città di Palermo e dei centri limitrofi. La sua situazione geologico-strutturale è estremamente complessa e proprio per questo motivo sarebbe necessario studiare nel dettaglio questa zona, con lo scopo di avere un quadro ben definito di tutti i rapporti relativi tra i vari corpi idrici specialmente per quanto riguarda le strutture sotterranee.

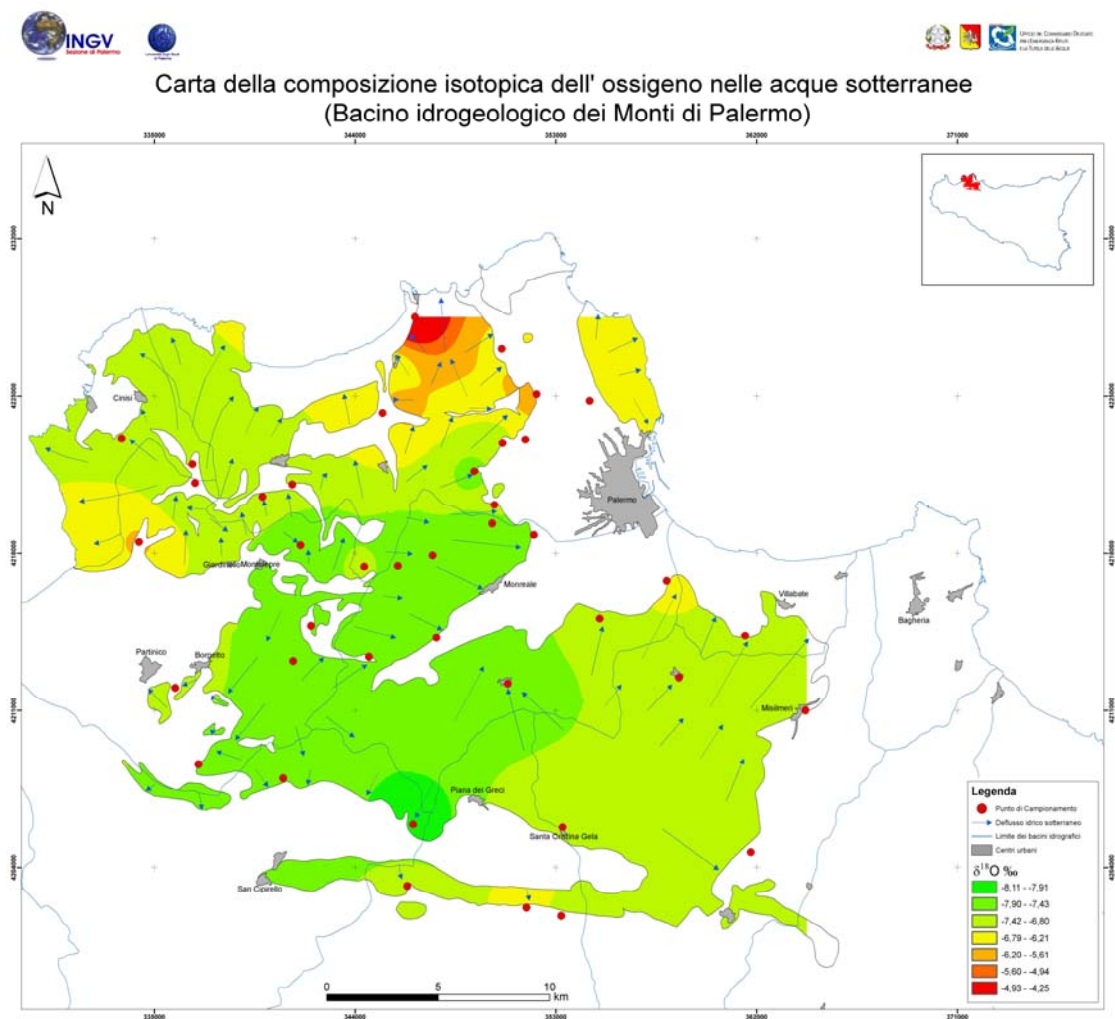


Fig. 35 – Mappa isotopica $\delta^{18}O$ dei Monti di Palermo

La ricostruzione delle aree di alimentazione dei vari corpi idrici in questo bacino è una questione abbastanza complessa. L'utilizzo di tecniche isotopiche ha consentito di chiarire molti aspetti attraverso il confronto tra il modello isotopico delle precipitazioni dell'area e i valori isotopici delle acque dei siti di monitoraggio. Sono infine sono state ottenute buone indicazioni per la determinazione delle aree di ricarica dei relativi corpi idrici. Queste indicazioni hanno anche avuto il riscontro positivo della situazione geologico-strutturale e morfologica di superficie dei vari complessi montuosi.

Nella mappa di fig. 35 viene evidenziato che gli acquiferi meridionali sono i più negativi perché le loro aree di ricarica sono ubicate sulle zone a quota più elevata. Questa caratteristica viene mantenuta nella zona est del bacino idrogeologico, mentre verso ovest i valori positivi sono legati a fenomeni di ingressione marina che si sono verificati in questo settore per eccessivo emungimento dell'acquifero.

La composizione isotopica dell'Ossigeno e del Deuterio dei siti di monitoraggio, presenta valori che sono compresi rispettivamente tra -4,3 e -8,2 e tra -24 e -47, che rappresentano un ampio campo di variabilità che conferma le notevoli differenze in termini di alimentazione degli acquiferi riscontrati in questo territorio.

Belmonte-Pizzo Mirabella

Il corpo idrico Belmonte-Pizzo Mirabella è costituito da corpi calcarei e calcareo-dolomitici, interessati da processi carsici, che costituiscono l'ossatura di rilievi che raggiungono quote di oltre 1200 metri.

Il corpo idrico ha un'elevata potenzialità idrica ed è limitato ad est e ad ovest da due importanti lineamenti strutturali che lo isolano quasi completamente dai corpi idrici adiacenti. Verso sud esso sovrascorre sulle successioni carbonatiche di M. Kumeta, ma per buona parte della sua estensione esso è limitato inferiormente dalle successioni impermeabili del Flysch Numidico.

La composizione isotopica dei punti d'acqua monitorati esibisce valori negativi caratteristici di precipitazioni che si sono verificate a quote medio alte. In alcuni settori sono evidenti contributi di precipitazioni che si verificano a quote inferiori che mescolano con gli apporti più negativi danno luogo a valori tipici di alimentazione medio- bassa. In ogni caso è ragionevole supporre che la ricarica di questo corpo idrico si realizzi essenzialmente per infiltrazione efficace entro le porzioni affioranti del corpo idrico.

Il suo stato ambientale è buono in quanto l'attività antropica è modesta ed è rappresentata da abitazioni sparse. Sono presenti dei settori adibiti a pascolo, ma la gran parte della superficie è caratterizzata dalla presenza di aree del demanio forestale.

Ai fini del piano di tutela delle acque è necessario limitare l'insediamento di attività produttive ad alto impatto e mantenere un attento controllo dei reflui di origine antropica, anche in considerazione del fatto che sono presenti strutture carsiche di superficie che immettono direttamente in falda eventuali agenti inquinanti.

Monte Castellaccio

Il corpo idrico Monte Castellaccio è costituito da carbonati fessurati e carsificati, che costituiscono i rilievi a NO della Piana di Palermo che raggiungono quote di circa 900 metri.

Il corpo idrico sversa le sue acque ad est alimentando, in parte, l'acquifero del settore occidentale della Piana di Palermo mentre a ovest la Piana di Capaci. I carbonati che costituiscono il corpo idrico sono sovrapposti ad un livello di Flysch Numidico che rappresenta la base impermeabile.

I valori di composizione isotopica delle acque monitorate sono compatibili con le quote dei rilievi affioranti del corpo idrico e che rappresentano le sue aree di alimentazione.

Possiede una buona potenzialità idrica mentre il suo stato ambientale è scadente sia per motivazioni qualitative che quantitative. Lo stato di questo corpo idrico risente certamente della presenza dell'area urbanizzata di Palermo e per quanto i siti di monitoraggio siano ubicati a ridosso del complesso montuoso dove sono presenti aree forestali, risentono significativamente del degrado della piana di Palermo dove sono già stati identificati fenomeni di intrusione marina per sovrasfruttamento, ma anche inquinamento organico da scarico incontrollato di reflui, oltre che la presenza di attività industriale che rappresentano delle significative sorgenti inquinanti.

Ai fini del piano di tutela delle acque per effettuare un recupero del corpo idrico è necessario effettuare attingimenti controllati. Va in ogni caso tenuto conto che l'emungimento effettuato non deve superare la disponibilità idrica del corpo idrico, infatti, superandola, si richiama acqua dal corpo idrico contaminato della piana di Palermo. Inoltre, in considerazione dell'elevata vulnerabilità del mezzo carbonatico

che risulta fessurato e carsificato, va almeno mantenuto il livello attuale di protezione nelle aree forestali di quota più elevata.

Monte Pecoraro

Il corpo idrico Monte Pecoraro è costituito da calcari e calcari dolomitici carsificati che costituiscono rilievi che raggiungono quasi 1000 metri di quota. Esso possiede delle limitate connessioni idrauliche con i corpi idrici adiacenti, che andrebbero approfondite attraverso l'ausilio di indagini geologico-strutturali. I carbonati del corpo idrico poggiano su livelli impermeabili del Flysch Numidico.

La composizione isotopica dei punti d'acqua monitorati esibisce valori negativi caratteristici di precipitazioni che si sono verificate a quote medio alte che vengono mantenute anche nelle emergenze a quota inferiore. Questo ci indica che la ricarica che alimenta la falda non riceve contributo dai settori a bassa quota del corpo idrico. Questo è anche confermato dallo stato ambientale buono di questo corpo idrico che non risente minimamente dei fenomeni di contaminazione marina presenti nella piana di Carini. La situazione appena descritta suggerisce anche la presenza di fenomeni di sversamento da acquiferi più interni con composizioni isotopiche negative. Rispetto alla situazione appena rappresentata fa eccezione la sorgente "Susinna1" che con molta probabilità è connessa ad una falda alimentata più direttamente da monte Colubrina.

L'area di ricarica coincide quindi con l'area di affioramento dei calcari e calcari dolomitici e si estende a quegli affioramenti del Flysch Numidico in cui il deflusso superficiale contribuisce alla ricarica dell'acquifero. Esso alimenta in parte la Piana di Carini ed in parte scarica direttamente a mare le acque di falda.

Possiede una notevole potenzialità idrica e il suo stato ambientale risulta buono in relazione alle limitate attività antropiche che insistono sulla sua superficie. Difatti, nei rilievi che costituiscono il corpo idrico, l'attività antropica è incentrata sull'attività agricola e di allevamento di tipo domestico ed è subordinata alla presenza di ampi settori in cui vi è presenza di vegetazione arbustiva e di macchia mediterranea.

I principali centri di pericolo ricadono negli abitati di Torretta, Carini, Giardinello, Villagrazia di Carini, Cinisi e Terrasini.

Ai fini della tutela delle acque è importante tenere presente che il rischio di salinizzazione della falda nei settori costieri è alto, e strettamente in rapporto allo sfruttamento della riserva idrica, poiché l'acquifero è a contatto diretto con il mare. In

questo contesto risulta evidente la necessità di stabilire i volumi di acqua sfruttabili che non determinino fenomeni di intrusione marina e conseguente scadimento della qualità delle acque.

Monte Saraceno

Il corpo idrico Monte Saraceno è costituito da una placca dolomitica che si eleva fino a raggiungere gli 800 metri di quota che poggia sui termini impermeabili del Flysch Numidico. Si tratta quindi di un corpo idraulicamente quasi del tutto isolato.

L'area di ricarica coincide con gli affioramenti carbonatici e ciò è confermato dai valori isotopici molto negativi compatibili con l'altitudine cui è posto il corpo idrico. Difatti, le acque risultano tra le più negative del bacino idrogeologico dei Monti di Palermo e la loro composizione riflette una quota di alimentazione poco al di sotto dei 1000 metri.

Possiede una discreta potenzialità idrica. Il suo stato ambientale è buono in considerazione del fatto che su di esso non si svolgono attività antropiche di rilievo. Gli unici centri di pericolo di rilievo sono dati da alcune cave presenti nella zona di Monte Saraceno; a parte ciò l'attività agricola e di allevamento risulta di ridotta entità e saltuaria.

Ai fini del piano di tutela delle acque è necessario mantenere l'attuale livello di naturalità dei luoghi.

Monte Cuccio-Monte Gibilmesì

Il corpo idrico Monte Cuccio-Monte Gibilmesì è costituito in prevalenza da rocce calcareo-dolomitiche e subordinatamente calcareo-marnose e marnose che costituiscono l'ossatura di rilievi che raggiungono quote di circa 1100 metri.

Anche questo corpo idrico poggia su un livello impermeabile di Flysch Numidico. Esso alimenta in parte la Piana di Palermo e l'area di ricarica coincide con l'area di affioramento del corpo stesso, così come indicano le composizioni isotopiche delle acque monitorate. Difatti, anche le acque di questo corpo idrico sono tra le più negative per cui è possibile ipotizzare che esso venga alimentato da quote intorno ai 1000 m.

Esso possiede limitate connessioni idrauliche con i corpi idrici adiacenti.

In esso sono presenti processi carsici che lo rendono molto vulnerabile all'inquinamento della falda. Il suo stato ambientale è buono, in quanto, oltre ad

alcuni centri abitati, si riscontrano case sparse, generalmente abitate stagionalmente, e collocate su tutto l'affioramento del corpo idrico laddove e una saltuaria attività agricola e di allevamento, subordinata alla presenza di settori boscati e a vegetazione arbustiva e di macchia mediterranea.

Ai fini del piano di tutela delle acque sarebbe necessario evitare incrementi di attività agricole e insediamenti industriali ad alto impatto e mantenere un attento controllo dei reflui di origine antropica.

Pizzo Vuturo-Monte Pellegrino

Il corpo idrico Pizzo Vuturo-Monte Pellegrino è costituito da una successione di terreni calcareo-dolomitici intensamente fessurati e carsificati. Verso N, il corpo idrico viene sovrascorso, assieme alle sue coperture terrigene numidiche dal corpo idrico di Monte Castellaccio, mentre verso S viene sovrastata tettonicamente dal corpo idrico di Monte Cuccio-Monte Gibilmesì. Esso è inoltre disseccato dalla depressione morfotettonica della Piana di Palermo che ha determinato in affioramento l'isolamento di due distinti rilievi: Monte Pellegrino e Pizzo Vuturo, che risultano in connessione idraulica al di sotto dei depositi pleistocenici affioranti all'interno della Piana.

Il corpo idrico possiede inoltre delle limitate connessioni idrauliche con il corpo M. Cuccio-M. Gibilmesì.

I valori di composizione isotopica sono compatibili con le aree affioranti del corpo idrico evidenziando, in alcuni casi, composizioni più positive dovute a contributi di bassa quota.

Possiede una buona potenzialità idrica mentre il suo stato ambientale è scadente in quanto, pur non essendovi su gran parte di esso presenza di attività antropica di rilievo, risente dell'interazione con il corpo idrico compromesso della piana di Palermo.

Ai fini del piano di tutela delle acque per effettuare un recupero del corpo idrico è necessario effettuare attingimenti controllati. Va in ogni caso tenuto conto che l'emungimento effettuato non deve superare la disponibilità idrica del corpo idrico, infatti, superandola, si richiama acqua dal corpo idrico contaminato della piana di Palermo. Inoltre, in considerazione dell'elevata vulnerabilità del mezzo carbonatico che risulta fessurato e carsificato, va almeno mantenuto il livello attuale di protezione nelle aree forestali di quota più elevata.

Monte Kumeta

Il corpo idrico Monte Kumeta è costituito da successioni carbonatiche intensamente fessurate.

In superficie il corpo idrico non possiede alcuna connessione idraulica con i corpi circostanti, ma è ipotizzabile una sua ampia connessione idraulica con i corpi carbonatici sepolti.

Le composizioni isotopiche dei punti d'acqua monitorati indicano una ricarica medio alta compatibile con l'infiltrazione delle precipitazioni nelle aree di affioramento delle successioni carbonatiche che compongono il corpo idrico. La sua potenzialità idrica è elevata.

Il suo stato qualitativo è buono in relazione alla quasi totale assenza di attività antropica. Ai fini del piano di tutela delle acque è necessario mantenere l'attuale livello di naturalità dei luoghi, in considerazione della potenziale vulnerabilità del corpo idrico che aumenterebbe notevolmente con la presenza di sorgenti inquinanti.

Monte Mirto

Il corpo idrico Monte Mirto è costituito quasi esclusivamente da depositi dolomitici e calcareo-dolomitici intensamente fessurati. Il corpo idrico poggia sulle coperture terrigene numidiche impermeabili.

La composizione isotopica evidenzia, almeno in un caso, alimentazioni da quote maggiori rispetto agli affioramenti del corpo idrico quindi sono verosimili connessioni idrauliche tra il corpo idrico e quelli adiacenti (M. Gradara e Belmonte-Pizzo Mirabella). Esso alimenta in parte le calcareniti della Piana di Partinico.

Il suo stato qualitativo è buono in relazione all'assenza di attività antropiche ad impatto elevato. Difatti, si riscontrano case sparse, generalmente abitate stagionalmente, e collocate su tutto l'affioramento del corpo idrico laddove è presente anche una saltuaria attività agricola e di allevamento.

La potenzialità idrica è buona e ai fini del piano di tutela delle acque il corpo idrico deve essere soggetto a protezione evitando l'edificazione di attività produttive e/o di agricoltura intensiva ad alto impatto.

Monte Gradara

Il corpo idrico Monte Gradara è costituito in prevalenza da rocce calcareo-dolomitiche intensamente fessurate che raggiungono quote di quasi 1200 metri.

Esso poggia su un livello impermeabile di Flysch Numidico e possiede delle connessioni idrauliche con i corpi idrici circostanti. In particolare esso alimenta la falda presente entro le calcareniti della Piana di Partinico e parzialmente i corpi idrici di M. Mirto e di Belmonte-Pizzo Mirabella.

Il suo stato qualitativo è buono in conseguenza della relativamente bassa incidenza antropica. Difatti, su di esso, oltre ai centri di pericolo rappresentati dagli abitati di Borgetto, Romitello, Montelepre, Ponte di Sagana e di Pioppo, si riscontrano solo case sparse, generalmente ad uso stagionale e una saltuaria attività agricola e di allevamento.

Il corpo idrico possiede una buona potenzialità. L'alimentazione della falda idrica avviene essenzialmente per infiltrazione diretta e ai fini del piano di tutela delle acque è necessario mantenere un adeguato livello di protezione monitorando i reflui di origine antropica e pianificando eventuali attività di emungimento.

Monte Palmeto

Il corpo idrico Monte Palmeto è costituito da carbonati carsificati che costituiscono rilievi che raggiungono circa 650 metri di quota. Il corpo idrico poggia con discontinuità sulle argilliti impermeabili del Flysch Numidico. Ciò implica delle parziali connessioni idrauliche con l'adiacente idrostruttura di Monte Pecoraro. Il corpo idrico inoltre scarica a mare parte delle acque di falda.

La composizione isotopica delle acque indica che le aree di ricarica sono poste a quote compatibili con quelle di affioramento dei carbonati del corpo idrico.

Il suo stato qualitativo è scadente e deriva dal fatto che il corpo idrico è sfruttato intensamente a mezzo di emungimento da pozzi posti lungo il settore costiero e che hanno determinato processi di salinizzazione marina. Tuttavia, su gran parte della superficie collinare del corpo idrico l'attività antropica è quasi assente (Monte Palmeto e Cozzo Ciangio). Così, ai fini del piano di tutela delle acque sarebbe necessario innanzitutto effettuare un drastico controllo degli attingimenti, inoltre è utile mantenere un'elevata protezione dei settori di ricarica collinari. Difatti, la vulnerabilità del corpo idrico è da considerare molto elevata, sia per le modalità d'infiltrazione (direttamente in rete di frattura e/o in condotti carsici), che per l'elevata velocità del flusso sotterraneo, nonché per la bassa capacità di autodepurazione della zona non satura del corpo idrico.

Monte Gallo

Il corpo idrico Monte Gallo è costituito da successioni calcareo-dolomitiche che costituiscono un rilievo che raggiunge circa 650 metri di quota. Queste successioni poggiano su un substrato impermeabile del Flysch Numidico.

Il corpo idrico alimenta la falde presente entro i depositi calcarenitici della Piana dei Colli ed in parte scarica a mare. Non sono stati trovati siti di campionamento rappresentativi del corpo idrico.

L'area di ricarica con molta probabilità coincide con i versanti del rilievo di Monte Gallo.

La vulnerabilità del corpo idrico è da considerare molto elevata: gli unici centri di pericolo sono dati dalle abitazioni edificate sulla struttura, specialmente sul versante SE che si affaccia sulla Piana dei Colli, e sul versante W, verso gli abitati di Tommaso Natale e di Sferracavallo.

Un altro fattore di rischio è dato dalla vicinanza col mare, per un tratto di circa 7 km, che può determinare fenomeni d'ingressione marina e scadimento della qualità delle acque di falda. Pertanto, ai fini del piano di tutela delle acque sarebbe necessario mantenere un livello elevato di protezione del rilievo, mantenendo un attento controllo dei reflui di origine antropica e pianificando eventuali attività di emungimento.

APPENDICE

Metodiche analitiche utilizzate

Determinazione del $\delta^{18}\text{O}$

Per determinare i rapporti di abbondanza isotopica $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dei campioni d'acqua prelevati, e quindi il loro $\delta^{18}\text{O}$, è stata utilizzata una linea di preparazione automatica connessa in serie ad uno spettrometro di massa AP 2003.

Il sistema analitico utilizzato, rappresentato in figura 36 è costituito da:

- Personal computer, che gestisce l'intero sistema;
- Autocampionatore, che provvede al prelievo automatico del campione dalle provette contenenti i campioni d'acqua.
- Modulo di preparazione del campione, dotato di due aghi: uno per la preparazione del campione (*prep needle*) ed uno per la misura (*sampling needle*).
- Spettrometro di massa AP2003, dove la CO_2 viene analizzata isotopicamente;

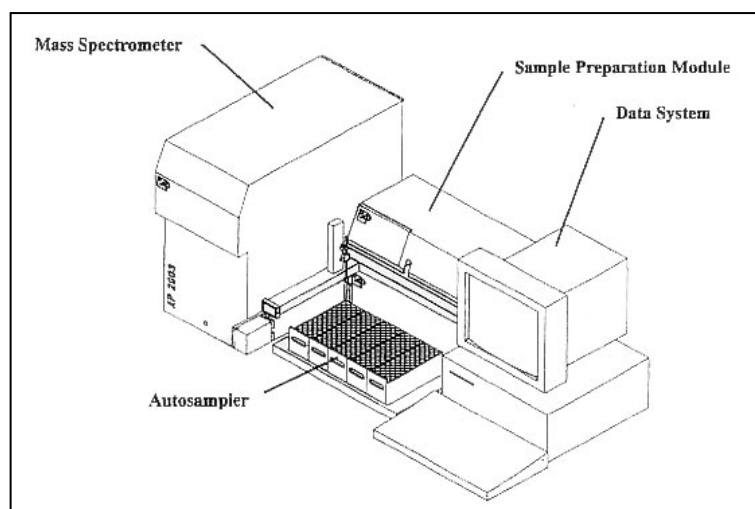
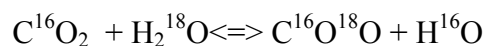


Fig. 36: Sistema di analisi per la determinazione del $\delta^{18}\text{O}$.

Le misure di composizione isotopica dell'ossigeno delle acque si basano sul raggiungimento dell'equilibrio isotopico tra l'ossigeno della molecola dell'acqua e quella dell'anidride carbonica, secondo la seguente reazione:



Dalla misura della composizione isotopica dell'ossigeno della CO₂ si risale alla composizione isotopica dell'ossigeno dell'acqua in equilibrio con essa. Infatti, il rapporto ¹⁸O/¹⁶O della CO₂ che ha raggiunto l'equilibrio isotopico con l'acqua può essere messo in relazione allo stesso rapporto nell'acqua attraverso un fattore di frazionamento α , definito come segue:

$$\alpha = (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{CO}_2}/(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{H}_2\text{Oliq}}$$

Convenzionalmente, per i metodi di preparazione manuale, la reazione avviene a 25°C, in cui il valore di α è pari a 1.0412 (O'Neil et al., 1975). Tuttavia, con la metodologia automatizzata adoperata, non è necessario conoscere l'esatto valore del fattore di frazionamento, ma è indispensabile che sia gli standard che i campioni si riequilibrino alla stessa temperatura.

Le singole fasi di preparazione ed analisi possono essere così brevemente riassunte:

Preparazione del campione

Con un' apposita pipetta viene prelevato 1 ml di campione ed introdotto in una provetta di vetro con tappo a vite e setto in gomma/teflon. Il tappo ha un'apertura circolare che consente la foratura del setto. A questo punto, la provetta contenente il campione viene introdotta in un portaprovette ("batch") di teflon che possiede 44 spazi, disposti in 4 file, ciascuna da 11 alloggi. L'autocampionatore può contenere 5 "batches" per un totale di 220 provette portacampione. Ogni campione viene preparato in doppio: la misura è valida se la differenza tra i due valori è inferiore a 0.2 ‰. In caso contrario il campione va nuovamente preparato. Considerando gli standards di riferimento, per ogni sessione analitica completa (5 batches) possono essere misurati fino a 87 campioni.

Il campione viene identificato con una sigla formata da 3 cifre: la prima si riferisce al numero del "batch" (da 1 a 5), la seconda alla colonna (da 1 a 4) e la terza alla riga (da 1 a 11). Così il primo campione sarà identificato con la sigla 1/1/1, mentre l'ultimo sarà 5/4/11.

Dopo l'introduzione del campione è necessario rimuovere l'aria contenuta nella provetta facendo fluire una miscela di CO₂ (6%) in He per 2 minuti ad un flusso di 10cc/min. Il braccio dell'autocampionatore è dotato di un alloggiamento per un ago

che può essere quello di preparazione (*prep needle*) o quello di misura (*sampling needle*). Per eliminare l'aria dalla provetta, si monta sul modulo di preparazione il *prep needle*: tale dispositivo è costituito da una guida metallica all'interno della quale si trova un ago metallico dotato di due fori posti ad altezza differente. Il primo, localizzato all'estremità inferiore dell'ago dal quale fuoriesce la miscela $\text{CO}_2 + \text{He}$. Il secondo, posto più in alto, ma sempre all'interno della provetta, è collegato ad uno sfiato esterno. Attraverso questo foro l'aria contenuta nella provetta viene progressivamente rimossa. Il flusso di gas con il quale questa operazione si svolge è sufficientemente basso da evitare alcun tipo di frazionamento isotopico nel campione. Attraverso il software, si imposta il numero di campioni ed il modulo di preparazione svolge in maniera automatica l'operazione di avvinamento. Al termine dell'operazione, al di sopra del campione d'acqua sarà, quindi, presente una "atmosfera" costituita da una miscela di He e CO_2 . In circa 8 ore, il sistema automatico di preparazione è in grado di preparare 220 provette.

Equilibrizzazione dei campioni e misura del rapporto isotopico

Una volta terminata l'operazione di preparazione, il campione viene mantenuto in un ambiente a temperatura controllata per 24 ore. Questo lasso di tempo è sufficientemente lungo per assicurare il completo equilibrio isotopico tra l'ossigeno dell'acqua e quello della CO_2 .

Trascorse 24 ore dall'introduzione della miscela He- CO_2 , si procede alla successiva fase di misura. Si distinguono tre fasi, svolte in maniera completamente automatica dal sistema di preparazione: prelievo, purificazione e misura del campione.

- Prelievo: sull'autocampionatore, si sostituisce l'ago usato per la preparazione con l'ago di misura (*sampling needle*). A questo punto, per ridurre al massimo l'effetto-memoria, il modulo di preparazione procede alla pulizia della linea di estrazione e dell'ago di misura, facendo fluire He 99.996 % (5.6). Al termine di questa prima fase, la provetta viene messa in pressione introducendo dal setto del tappo della provetta un'aliquota di elio. Questa fase di pressurizzazione è indispensabile per consentire al campione di gas di attraversare una trappola prima di raggiungere il "loop", un tratto di linea di volume noto (120 μl), compreso tra due valvole.

- Purificazione: il primo dei due processi di purificazione prevede il passaggio del gas attraverso la trappola di NAFION[®] che blocca il vapore acqueo eventualmente

presente. Successivamente, attraverso un sistema di valvole il gas contenuto nel “loop” viene indirizzato verso una colonna gas-cromatografica che provvede alla separazione delle varie molecole gassose non completamente rimosse durante la preparazione del campione. I tempi di ritenzione della colonna sono tali che N_2 e O_2 vengono rilasciati dopo 10 secondi, mentre la CO_2 viene rilasciata dopo circa 20 secondi ed indirizzata verso lo spettrometro di massa.

- Misura: la CO_2 cromatograficamente separata passa attraverso un iniettore di gas (*open split*) in prossimità della sorgente dello spettrometro di massa.

All'interno della sorgente il gas viene ionizzato ed il fascio di ioni così generato, viene deviato da un campo magnetico con traiettorie aventi raggi di curvatura che dipendono dalla massa. I fasci ottenuti raggiungono i collettori dove gli ioni riacquistano l'elettrone perso originando una corrente, la cui intensità è direttamente proporzionale al numero di ioni che entrano nei collettori. Il software “legge” queste intensità, le registra sul database e le riproduce in grafico sul monitor. Si individuano così 3 intensità, ciascuna delle quali corrisponde alle masse 44, 45 e 46.

Il grafico delle intensità di corrente del campione, catturate dai singoli collettori ha la forma di un picco in seguito alla separazione cromatografica.

Nello step successivo, l'apertura di una valvola consente la misura della composizione isotopica di una CO_2 di riferimento prelevata da una bombola ($CO_2=99.98\%$). La valvola rimane aperta per 10 secondi ed in questo caso si ha un picco più largo rispetto a quello del campione. La misura isotopica viene eseguita confrontando l'intensità di un picco del campione con quella del picco del gas di riferimento. Il valore in unità delta del campione “raw data” (dato grezzo) viene quindi ottenuto dal confronto tra il rapporto $^{18}O/^{16}O$ del campione e quello del gas di riferimento. Per ottenere i valori di composizione isotopica rispetto allo standard internazionale è necessario operare la calibrazione dello strumento che, a differenza degli spettrometri statici, viene eseguita in ogni sessione di misura.

Il tempo complessivo per le tre operazioni (prelievo, purificazione e misura) per ciascun campione è inferiore a 2 minuti. Il tempo di misura per ogni batch completo (220 misure) è quindi di circa 8 ore.

La accuratezza e la riproducibilità delle misure sono migliori di 0.1 $\delta\%$.

Lo spettrometro utilizzato per le misure di composizione isotopica dell'ossigeno presenta alcune differenze rispetto a quello precedentemente descritto per le misure di

composizione isotopica di idrogeno. Questo strumento appartiene alla categoria degli spettrometri di massa meglio conosciuti come “*continuous flow*” in quanto un gas “carrier” trasporta nella sorgente il gas da misurare. Lo spettrometro AP 2003 utilizza l’elio 5.6 (99.996 % Vol.) come gas carrier. La presenza di He nella sorgente comporta valori di vuoto di poco inferiori ($10^{-6} \div 10^{-7}$ torr) rispetto a quello “*dual inlet*”. Nonostante il principio di separazione sia sostanzialmente identico, in questo tipo di spettrometri, manca la “*changeover valve*” che consente di misurare alternativamente per diversi cicli il campione ed il gas di riferimento.

Calibrazioni e correzioni

I dati grezzi ottenuti devono essere calibrati rispetto ad uno standard internazionale. Per tale scopo si fa uso degli standards di laboratorio. In pratica, all’interno del “batch” si preparano, allo stesso modo dei campioni da misurare, almeno 3 acque a composizione isotopica nota (standards interni). Gli standard per la calibrazione vengono preparati in doppio e vengono posizionati sia all’inizio del “batch” che al termine. I campioni vengono calibrati per interpolazione lineare. Ciò implica che tutti i campioni devono avere una composizione isotopica compresa nel range di valori degli standards di laboratorio usati.

La retta di calibrazione deriva dalla regressione lineare tra i valori misurati e i valori noti degli standard interni. Il parametro statistico R^2 che si ottiene tende ad 1 quanto migliori sono state le condizioni di misura. In genere si considerano valide le calibrazioni il cui valore di R^2 è maggiore di 0.9995.

Il coefficiente angolare e l’intercetta della retta ottenuta consentono di trasformare il dato grezzo ($\delta^{18}\text{O}_{\text{rd}}$) dei campioni misurati in dato calibrato rispetto agli standards internazionali attraverso la relazione seguente:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{vs V-SMOW}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{rd}} * m + q$$

dove m e q sono rispettivamente il coefficiente angolare e l’intercetta della retta di regressione.

Uno dei problemi che si può verificare in un sistema automatico di preparazione e misura riguarda il cosiddetto “effetto di deriva”. Ciò può essere originato da due fattori:

- variazione di temperatura durante l’equilibrio
- deriva strumentale.

Per ovviare a questo problema, quando presente, si utilizza la correzione del “drift”. Tale tipo di correzione si ottiene calcolando la variazione delle misure di un campione che viene collocato all’inizio di ogni colonna del “batch” e infine all’ultimo alloggio. Per questo campione non è indispensabile conoscere la sua composizione isotopica. Anche in questo caso si effettua una regressione lineare tra i dati grezzi ed il numero progressivo del campione.

Possono verificarsi due casi:

- il valore del *drift* si mantiene costante entro l’errore di misura ($1\sigma = 0.1 \delta \text{‰}$).
- Il valore misurato mostra una tendenza a positivizzarsi o negativizzarsi col procedere delle misure.

Nel I° caso, nessuna correzione deve essere applicata. Ciò indica che durante la fase di equilibrio non si sono verificati sbalzi significativi della temperatura ambientale tali da modificare la composizione isotopica dei campioni.

Nel II° caso, è invece evidente una tendenza dei valori del “drift” ben correlata con il numero di analisi. Ciò è probabilmente indotto da una possibile deriva strumentale o da mutate condizioni della temperatura di equilibrio.

In quest’ultima ipotesi, è necessario applicare ai valori di composizione isotopica ottenuti una ulteriore correzione. Il coefficiente angolare della retta di regressione lineare della serie di valori “drift”-numero di analisi, che è generalmente compreso tra 0.0025 e 0.0035, indica di quanto le misure effettuate si positivizzano o si negativizzano in funzione del numero di analisi. Tale correzione consiste nel sottrarre al valore misurato, un fattore correttivo che dipende dalla posizione relativa del campione nel “batch”.

Controllo di qualità delle analisi

Il sistema di automazione per la preparazione e la misura della composizione isotopica dell’ossigeno dell’acqua non può prescindere da un accurato controllo della qualità delle misure effettuate. Per tale motivo, vengono collocati all’interno del “batch” alcuni campioni a composizione isotopica nota, i quali, a differenza degli standards interni, non rientrano nella calibrazione. Il posizionamento di questi campioni di controllo è tale che essi vengono a coprire sistematicamente l’intero “batch”. Per questi campioni viene semplicemente confrontato il valore misurato con quello noto. Una differenza tra questi due valori inferiore al limite di riproducibilità

(0.1 δ ‰) implica che sia la calibrazione che la eventuale correzione del “drift” sono applicate correttamente.

Determinazione del rapporto isotopico D/H nelle acque

Preparazione e misura

La determinazione dei rapporti di abbondanza isotopica D/H nei campioni di acqua è stata effettuata utilizzando una procedura analitica semplice ed innovativa basata su una reazione di conversione ad alta temperatura (TC/EA High Temperature Conversion/Elemental Analyzer).

La conversione ad alta temperatura, ovvero “pirolisi” è una metodologia da tempo ben nota, ma solamente di recente applicata nel campo delle determinazioni isotopiche di sostanze solide e liquide. Il processo è molto rapido ed avviene in ambiente riducente e ad una temperatura compresa fra i 1300 ed i 1450°C. Nel caso della determinazione del rapporto H/D in un campione d’acqua, l’idrogeno contenuto nella molecola di acqua è convertito in idrogeno gassoso mentre l’ossigeno combinandosi con grafite vetrosa, forma monossido di carbonio. Questo fa sì che il TC/EA può essere utilizzato per la simultanea determinazione dei rapporti isotopici dell’ossigeno e dell’idrogeno nei campioni di acqua.

Per questo tipo di applicazione il TC/EA è stato dotato di un autocampionatore per liquidi capace di contenere fino a 98 posti ed equipaggiato con una siringa ad alta precisione da 1.2 μ l. Questo dispositivo consente:

- il prelievo rapido e preciso di un volume fisso di acqua (0.8 μ l);
- la pulizia della siringa in soluzioni di lavaggio o mediante “avvinamento” nello stesso campione;
- l’iniezione del campione nel reattore.

Il reattore è costituito da un tubo in carbonio vetroso (“*glassy carbon*”), inserito in un tubo in ceramica, parzialmente riempito da trucioli di “*glassy carbon*” e posto ad una temperatura di 1450°C. Una volta che l’acqua è iniettata nel reattore, avviene la conversione che porta alla produzione di idrogeno gassoso e monossido di carbonio. Un flusso di gas carrier (He 5.6) attraversa il reattore assicurando così che i gas prodotti possano fluire dentro una colonna separatrice. La colonna, una 5Å Packed Molecular Sieve, è mantenuta ad una temperatura costante di 95°C. A questo punto il

gas da analizzare che fuoriesce dalla colonna viene trasferito allo spettrometro di massa per mezzo di tubi capillari (i.d. 0.08 mm) che evitano il frazionamento isotopico del gas durante il trasporto.

Un'interfaccia (ThermoFinnigan ConFlo II/III) consente di introdurre allo spettrometro di massa sia il campione che il gas di riferimento (reference gas) mediante delle pulsazioni. Per le analisi isotopiche dell'idrogeno è stato usato come reference un H₂ puro (6.0), titolato isotopicamente ($\delta D = -280\text{‰}$ vs SMOW) e prelevato da una bombola connessa all'interfaccia attraverso una tubatura in pressione.

Una analisi isotopica dell'idrogeno dell'acqua con il sistema di preparazione-analisi TC/EA richiede all'incirca 3 minuti.

Alcuni dei vantaggi del TC/EA possono essere quindi così riassunti:

- Rapidità analitica per l'utilizzo di autocampionatori e sistema di connessione *on-line* periferica-spettrometro;
- Piccole quantità di campione (0.8 μ l);
- Determinazione contemporanea dei rapporti isotopici dell'ossigeno e dell'idrogeno in acqua sullo stesso campione.

Caratteristiche strumentali dello spettrometro di massa

Le misure isotopiche sono state effettuate con uno spettrometro di massa Finnigan Delta Plus XP del Laboratorio di Geochimica Isotopica della Sezione di Palermo dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Il principio di funzionamento dello spettrometro di massa si basa sulla misura del rapporto massa/carica degli ioni.

Lo spettrometro è composto da un “*tubo*” costantemente mantenuto in condizione di alto vuoto (10^{-8} torr) alle estremità del quale sono localizzate la “*sorgente*” da una parte, ed i “*collettori*” dall'altra.

Il vuoto viene raggiunto utilizzando un sistema di pompaggio che consiste in un pre-vuoto (*fore vacuum*) effettuato da una pompa rotativa EDWARDS e in un alto vuoto (*high vacuum*) che viene ottenuto tramite due pompe turbomolecolari PFEIFFER.

Il gas che deve essere misurato viene introdotto nella camera di ionizzazione, dove viene ionizzato, a seguito di successive collisioni con gli elettroni emessi dalla “*sorgente*”, un filamento di tungsteno incandescente (*ion source*). Gli ioni così

generati vengono accelerati e focalizzati, da un opportuno campo elettrico nel tubo (2.0÷3.0 KV). Il fascio di ioni (*ion beam*) attraversa un campo magnetico che agisce normalmente alla direzione del moto delle particelle. Per effetto del campo magnetico, gli ioni vengono deviati seguendo traiettorie con differente raggio di curvatura in funzione proprio del rapporto massa/carica secondo la relazione:

$$r = \frac{144}{H} \left(\frac{mV}{n} \right)^{1/2}$$

dove r è il raggio di curvatura, H è l'intensità del campo magnetico, m è la massa, V è la differenza di potenziale.

Pertanto, dal campo magnetico emergono fasci ionici separati, ciascuno dei quali corrisponde ad un determinato rapporto massa/carica. A questo punto i fasci ionici sono indirizzati verso i collettori (*Faraday Caps*), una serie di fotomoltiplicatori che provvedono ad amplificare e convertire il fascio ionico in segnale di corrente espresso in volt. Il fattore moltiplicativo per ciascuno dei collettori è funzione delle abbondanze relative delle masse isotopiche. La corrente generata è, a sua volta, funzione dell'abbondanza delle masse; quindi sulla base dei rapporti di intensità di corrente misurata su ciascun collettore, si ricavano i rapporti di abbondanza isotopica. Nel caso dell'idrogeno dal rapporto massa 3/massa2 si ricava il rapporto D/H.

La composizione isotopica dell'idrogeno delle acque viene di solito espressa in unità delta (δ) rispetto ad uno standard internazionale (V-SMOW, Vienna-Standard Mean Ocean Water che rappresenta la composizione media delle acque oceaniche mondiali). A partire dai rapporti D/H misurati, il valore “*delta*” si calcola come segue:

$$\delta = ((R_{\text{camp}} - R_{\text{std}}) / R_{\text{std}}) \times 1000$$

Il δ rappresenta quindi la differenza in millesimi del rapporto isotopico del campione rispetto allo stesso rapporto nello standard. δD esprime la composizione isotopica dell'idrogeno.

Lo spettrometro di massa utilizzato per le misure isotopiche dell'idrogeno è di tipo “*continuous flow*” che indica che le misura avvengono sotto flusso costante di elio (99.9996%Vol.). Ciò consente l'uso di periferiche (sistemi di equilibrazionepirolizzatori, gas cromatografi, analizzatori elementari, etc,) che necessitano di un gas carrier per il loro funzionamento.

Calibrazioni e correzioni

Come descritto precedentemente, i dati grezzi ottenuti devono essere calibrati rispetto ad uno standard internazionale di riferimento. Poichè questi sono disponibili soltanto in quantità limitate, è comune procedura fare uso degli standards di laboratorio. Si tratta di campioni di acque che sono stati ripetutamente calibrati rispetto agli standard internazionali.

In pratica, all'interno di ciascun set analitico si inseriscono, allo stesso modo dei campioni da misurare, almeno 3 acque a composizione isotopica nota (standards interni).

Per ciascun set analitico, si costruisce una retta di calibrazione ottenuta dalla regressione lineare tra i valori misurati e i valori noti degli standard interni. Il parametro statistico R^2 che si ottiene tende ad 1 quanto migliori sono state le condizioni di misura. In genere si considerano valide le calibrazioni il cui valore di R^2 è maggiore di 0.9995.

Il coefficiente angolare e l'intercetta della retta ottenuta consentono di trasformare il dato grezzo (δD_{rd}) dei campioni misurati in dato calibrato rispetto agli standards internazionali attraverso la relazione seguente:

$$\delta D_{vs\ V-SMOW} = \delta D_{rd} * m + q$$

dove m e q sono rispettivamente il coefficiente angolare e l'intercetta della retta di regressione. Questo genere di procedura è valida soltanto se i campioni vengono calibrati per interpolazione lineare. Ciò implica che tutti i campioni devono avere una composizione isotopica compresa nel range di valori degli standards di laboratorio usati.

Controllo di qualità delle analisi

Il sistema di automazione per la preparazione e la misura della composizione isotopica dell'idrogeno dell'acqua non può prescindere da un accurato controllo della qualità delle misure effettuate. Per tale motivo, vengono collocati all'interno del set di analisi alcuni campioni a composizione isotopica nota, i quali, a differenza degli standards interni, non vengono inclusi nella calibrazione. Il posizionamento di questi campioni di controllo è tale che essi vengono a coprire sistematicamente l'intero set di analisi. In genere si esegue una misura dei campioni di controllo ogni 7-8 campioni. Per queste misure viene semplicemente confrontato il valore ottenuto con quello noto.

Una differenza tra questi due valori inferiore al limite di riproducibilità ($\pm 1 \delta \text{ ‰}$) implica che la “curva di calibrazione” è correttamente applicata e che le condizioni strumentali sono ottimali.

Per ciascun campione vengono fatte cinque introduzioni. Ai risultati ottenuti vengono applicati test statistici per l’eliminazione di eventuali valori non rappresentativi della misura, i cosiddetti “outliers”. Il valore di composizione isotopica ottenuto è accettabile se la differenza massima tra le misure ritenute valide è inferiore a ± 1 unità Δ . In caso contrario il campione va preparato nuovamente.

Il riferimento bibliografico per l’effettuazione di queste analisi è stata la pubblicazione “Metodi Analitici per le Acque” edito da APAT/IRSA-CNR, 29/2003, e “U.S. EPA Method 200.8 for the Analysis of Drinking Waters and Wastewaters”.

Bibliografia

- Anzà, S., Dongarrà, G., Giammanco, S., Gottini, V. Hauser, S., Valenza, M., 1989. *Geochimica dei fluidi dell'Etna*. Miner. Petrogr. Acta 32, 231-251.
- Brusca, L., Aiuppa, A., D'Alessandro, W., Parello, F., Allard, P., Michel, A., 2001. *geochemical mapping of magmatic gas- water-rock interactions in the aquifer of Mount Etna volcano*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 108 (1-4), 201-220.
- D'Alessandro, W., Federico, C., Aiuppa, A., Longo, M., Parello, F. Allard, P., Jean-Baptiste, P., 2001. *Groundwater circulation at Mt. Etna: evidences from ^{18}O , ^2H and ^3H contents*. Proc. 10th Intern. Symp. On Water-Rock Interaction, Villasimius, Italy, 10-15 June 2001, (Cidu R. editor), Swets & Zeitlinger, Lisse, 485-488.
- D'Alessandro, W., Federico, C., Longo, M., Parello, F., 2004. *Oxygen isotope composition of natural waters in the Mt. Etna area*. J. Hydrol. 296, 282-299.
- Hauser, S., Dongarrà, G., Favara, R., Longinelli, A., 1980. *Composizione isotopica delle piogge in Sicilia. Riferimenti di base per studi idrogeologici e relazioni con altre aree mediterranee*. Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrografia 36 (2), 671-680.
- Favara, R., 2004. Progetto di ricerca G.N.V.: Studio multidisciplinare per la definizione del budget di massa e di energia nei vulcani attivi italiani - Task UR 8: *Caratterizzazione isotopica delle precipitazioni meteoriche finalizzato alla modellizzazione di acquiferi connessi ad apparati vulcanici - Rapporto Finale*
- Ogniben, L., 1966 *Lineamenti idrogeologici dell'Etna*. Rivista Mineraria Siciliana 100-102, 151-174.
- Craig, H., 1961a. *Isotopic variations in meteoric waters*. Science Vol. 133, p. 1702-1708.
- Fancelli R., Monteleone S., Nuti S., Pipitone G., Rini S., Taffi L., 1991. *Nuove conoscenze idrogeologiche e geotermiche nella Sicilia occidentale*. Geologia ed idrogeologia, BARI, 26.
- Favara R., Grassa F., Inguaggiato S., D'Amore F. (1998) *Geochemical and hydrogeological characterization of thermal springs in Western Sicily, Italy*. J. Volcanol. Geoth. Res. Vol 84, p. 125-141.

Gat J.R. and Dansgaard, W., 1972. *Stable isotope survey of the freshwater occurrences in Israel and the Jordan Rift Valley*. J. Hydrol. Vol. 16, p. 177-211.

Hauser S., Dongarra G., Favara R., Longinelli A., 1980. *Composizione isotopica delle piogge in Sicilia*. Riferimenti di base per studi idrogeologici e relazione con altre aree mediterranee. Rend. Soc. Ital. Min. e Petr. Vol. 36, 2, p. 671–680.

Liotta M., Favara R., Valenza M., 2004. *Isotopic composition of precipitation in the central Mediterranean: origin marks and local effects*. 32th International Geological Congress, Florence Italy August 20-28, 2004.

Bartolomei C., Celico P., Pecoraro A., 1983. *Schema idrologico della Sicilia nord-occidentale*. Boll. Soc. Geol. It., 102, 329-354.

Abate B., Incandela A., Renda P., 1990. *Elementi strutturali dei rilievi del Monte Erice e Rocca di Giglio (Sicilia Occidentale)*. Rend. Soc. Geol. It., Vol.13, p. 99-102.