

Le acque sotterranee

Quaderni habitat

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
Museo Friulano di Storia Naturale - Comune di Udine

coordinatori scientifici

Alessandro Minelli · Sandro Ruffo · Fabio Stoch

comitato di redazione

Aldo Cosentino · Alessandro La Posta · Carlo Morandini · Giuseppe Muscio

"Le acque sotterranee · La biodiversità nascosta"

a cura di Fabio Stoch

testi di

Diana Maria Paola Galassi · Marco Petitta · Fabio Stoch

con la collaborazione di

Daniela Castaldo · Mauro Chiesi · Tiziana Di Lorenzo · Barbara Fiasca

illustrazioni di

Roberto Zanella

progetto grafico di

Furio Colman

foto di

Alberto Bianzan 19 · Marco Bodon 48 · Ezio Burri 14 · Andrea Chiavoni 9 · Adalberto D'Andrea, 6, 7, 8, 21, 69, 78, 79, 89, 94, 103 · Dario Ersetti 85 · Diana Maria Paola Galassi 35, 55, 58, 81, 96, 97, 108, 109, 125, 126, 131, 132, 133, 135, 136, 139, 140, 141, 147 · Fulvio Gasparo 40, 63, 68/1, 73 · Franco Gherlizza 86 · Salvatore Inguscio 60, 68/2, 76 · Enrico Lana 46, 61 · Luca Lapini 70 · Paolo Maddaleni, 12, 110, 143 · Bruno Maiolini 50 · Francesco Marsiglia 119 · Raniero Massoli Novelli 30, 123 · Lucia Mastroiello 25, 31, 36 · Michele Mendi 129 · Giuseppe Muscio 44, 138 · Ivano Niero 111 · Marco Petitta 10, 13, 23, 26, 27, 28, 33, 37, 117, 122 · Enrico Pezzoli 47 · Beatrice Sambugar 51 · Sandro Sedran 71 · Federico Savoia 107 · Pino Sfregola 105 · Fabio Stoch 41, 42, 43, 52, 53, 54, 57, 59, 64, 65, 67, 74, 75, 82, 83, 91, 92, 95, 101, 102, 113, 142 · Ignazio Zoda 11

©2008 Museo Friulano di Storia Naturale · Udine

*Vietata la riproduzione anche parziale dei testi e delle fotografie.
Tutti i diritti sono riservati.*

ISBN 88 88192 37 9

ISSN 1724-7209

In copertina: Acque sotterranee del complesso carsico dei Monti Bernadia (foto A. D'Andrea)

QUADERNI HABITAT

Le acque sotterranee

La biodiversità nascosta

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE
MUSEO FRIULANO DI STORIA NATURALE · COMUNE DI UDINE

Quaderni habitat



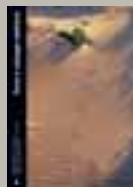
1
Grotte e
fenomeno
carsico



2
Risorgive
e fontanili



3
Le foreste
della Pianura
Padana



4
Dune e
spiagge
sabbiose



5
Torrenti
montani



6
La macchia
mediterranea



7
Coste marine
rocciose



8
Laghi costieri
e stagni
salmastri



9
Le torbiere
montane



10
Ambienti
nivali



11
Pozze, stagni
e paludi



12
I prati aridi



13
Ghiaioni e
rupi di
montagna



14
Laghetti
d'alta quota



15
Le faggete
appenniniche



16
Dominio
pelagico



17
Laghi
vulcanici



18
I boschi
montani di
conifere



19
Praterie a
fanerogame
marine



20
Le acque
sotterranee



21
Fiumi e
boschi ripari



22
Biocostruzioni
marine



23
Lagune,
estuari
e delta



24
Gli habitat
italiani

Indice

Introduzione	7
-------------------------------	---

Diana Maria Paola Galassi · Fabio Stoch

Idrogeologia	13
-------------------------------	----

Marco Petitta

Aspetti faunistici	41
-------------------------------------	----

Fabio Stoch

Aspetti ecologici	79
------------------------------------	----

Diana Maria Paola Galassi

Aspetti di conservazione e gestione	115
--	-----

Diana Maria Paola Galassi · Marco Petitta · Fabio Stoch

Proposte didattiche	139
--------------------------------------	-----

Diana Maria Paola Galassi

Bibliografia	149
-------------------------------	-----

Glossario	151
----------------------------	-----

Indice delle specie	153
--------------------------------------	-----



Introduzione

DIANA MARIA PAOLA GALASSI · FABIO STOCH

Affrontiamo in queste pagine un lungo viaggio alla scoperta di un mondo sconosciuto ai più. Un viaggio al di là della realtà, oltre la percezione che l'Uomo ha della vita sulla Terra.

Parafrasando il titolo di un noto film di Zemeckis del 2000: *What lies beneath?* (Le verità nascoste), intendiamo svelare una realtà sconosciuta. Le verità nascoste: quali verità? E perché nascoste?

Nonostante l'attenzione richiamata dalla Convenzione di Rio (1992) sulla progressiva e irrecuperabile perdita di biodiversità, quella degli habitat sotterranei è stata generalmente trascurata. Eppure le acque sotterranee ospitano quasi tutti i principali gruppi animali presenti nelle acque superficiali e un impressionante numero di specie "relict". Si tratta di elementi di grande interesse scientifico: interi gruppi tassonomici (generi, ordini o addirittura classi!), i cui parenti più prossimi si sono estinti in superficie, spazzati via da catastrofici eventi del passato.

Le comunità sotterranee sono perciò una delle più preziose eredità della Terra: sono i principali testimoni delle vicissitudini paleogeografiche e paleoclimatiche del nostro Paese e il loro studio permette di ricostruire la storia geologica dell'Italia, così come si fa con i fossili. Esse ci raccontano eventi remoti, come la deriva delle zolle continentali, la crisi di salinità che ha portato al disseccamento del Mediterraneo, le regressioni e le trasgressioni marine che si sono succedute nel corso delle ere geologiche, le imponenti glaciazioni del Quaternario.

Ognuno di questi eventi ha lasciato nelle acque sotterranee memoria biologica, attraverso la sopravvivenza dei relict, la cui distribuzione è spesso ristretta a uno o pochi acquiferi, talora a una singola vallata, o ancora a una sola



Un vecchio pozzo per acqua visto dall'interno

grotta: sono le specie endemiche, spesso soggette a un alto rischio di estinzione, se sottoposte a disturbo antropico. Purtroppo l'esistenza dell'ecosistema sotterraneo, di questa sorta di reliquiario che ospita veri e propri "fossili viventi", è stata a lungo ignorata sia dall'arena scientifica che da quella politica, con conseguenze a volte disastrose.

Ma le acque sotterranee non sono "solo" lo scrigno di una preziosa e unica biodiversità. Esse rappresentano la più importante risorsa idrica per l'Umanità. Se si escludono i ghiacciai, le acque sotterranee costituiscono oltre il 97% di tutte le acque dolci presenti sulla terra (il rimanente 3% include le acque superficiali come laghi, fiumi e zone umide). Tuttavia, quando si parla di acque dolci, è luogo comune dimenticare l'esistenza di questa vasta rete idrica sotterranea, forse solo perché semplicemente non si vede.

L'ambiente sotterraneo entra nell'immaginario collettivo come ambiente privo di vita, protetto perché isolato dall'ambiente superficiale e, per tale ragione, letto sotto una chiave interpretativa di natura esclusivamente geologica e chimico-fisica. È il concetto usato e abusato di *reservoir*, contenitore di acqua di alta qualità, destinata agli usi umani più esigenti tra cui emerge l'uso potabile, seguito dall'uso agricolo e da quello industriale. Se ne ignora dunque completamente il ruolo come ecosistema: e questo fatto non è privo di conseguenze. La funzionalità di un ecosistema, consentendo l'importante processo di autodepurazione, garantisce la sua qualità e quella degli ecosistemi adiacenti.



La falda freatica si cela sotto il letto alluvionale di un fiume

Per portare un esempio, un fiume che scorre su un letto ghiaioso è solo la punta di un iceberg: al di sotto di esso c'è un mondo sommerso, perfuso e diffuso, un "polmone idrico" che arriva sino alla falda freatica e rigenera l'ecosistema fluviale, intrattenendo con esso stretti rapporti idrologici e biologici. Non si tratta di ambienti idrici a "compartimenti stagni": acque sotterranee e superficiali sono tasselli di un enorme mosaico idrico e costituiscono un'unica, grande unità funzionale.

Il riconoscimento della dimensione ecologica delle acque sotterranee si riflette in un nuovo modo di intendere il monitoraggio dello stato di qualità delle acque. Come accade per le acque di superficie, gli organismi sotterranei sono delle "spie" delle condizioni ambientali, cioè dei bioindicatori. Trascorrendo l'intera esistenza nell'ambiente sotterraneo, essi possono segnalarci condizioni di inquinamento cronico e gradi di compromissione o di vulnerabilità che le indagini geologiche e chimico-fisiche da sole non sono in grado di fare. E le conseguenze di ordine pratico sono facilmente intuibili.

Solo negli ultimi decenni la ricerca scientifica ha fatto grandi passi avanti nella comprensione del misterioso "Pianeta Sotterraneo", un ecosistema in cui, alla stessa stregua di quanto avviene negli ambienti di superficie, esistono comunità animali diversificate; un ecosistema in cui avviene trasferimento e trasformazione di materia ed energia lungo le relativamente semplici catene alimentari che definiscono la struttura funzionale delle comunità sotterranee.



Le acque carsiche di percolazione: un ecosistema nascosto

Si tratta di un ecosistema a rischio, ove l'inquinamento, legato alle attività umane che si svolgono in superficie, ne sta gravemente alterando la qualità chimico-fisica e biologica.

Su questa problematica, ormai di estensione planetaria, si stratificano gli effetti dei cambiamenti climatici, che stanno portando a situazioni di penuria idrica non solo nei Paesi in Via di Sviluppo, ove il problema della scarsità idrica esiste da tempo, ma anche nei cosiddetti Paesi Industrializzati, ove è la gestione inadeguata ad apportare i danni più pesanti, fino al limite dell'irreversibilità del fenomeno.

Parole come *emergenza idrica* e *crisi idrica* sono ormai all'ordine del giorno e la desertificazione a scala globale e nazionale aggrava il problema. Ogni azione dell'uomo su una componente del ciclo dell'acqua influenza le altre componenti: ad esempio i prelievi dai pozzi determinano una diminuzione della portata delle sorgenti che drenano l'acquifero, mentre al contrario l'irrigazione, immettendo acqua nel sistema suolo-sottosuolo, ricarica gli acquiferi sottostanti.

Tutte queste alterazioni delle acque sotterranee indotte dall'Uomo si ripercuotono pesantemente sulla funzionalità del complesso ecosistema sotterraneo.

Un ecosistema che, in termini di biodiversità, dovrebbe essere tutelato con un rigore normativo assente nella legislazione nazionale ed internazionale: manca ancora, sia in Italia sia nell'intera Comunità Europea, un riconosci-



Le acque sotterranee riaffiorano a formare un'area umida (Posta Fibreno, Lazio)

mento del valore di conservazione dei suoi habitat e della sua fauna straordinaria.

Questo nuovo volume della serie "Quaderni Habitat", per la prima volta nel nostro Paese, si propone di colmare questo vuoto conoscitivo rivolgendosi al grande pubblico, portando all'attenzione di chi legge, e si spera anche di chi legifera, l'immenso patrimonio scientifico, culturale ed economico rappresentato dalle acque sotterranee. Nei capitoli che seguono, vengono toccati tutti i principali argomenti che concorrono a definire le acque sotterranee come uno dei più importanti ecosistemi del Pianeta. Si tratta di un viaggio avventuroso in un mondo dove regna l'oscurità, dove si muovono animali bizzarri, ciechi e diafani, un mondo vivo, che comunica con gli ambienti che siamo abituati a osservare in superficie, condizionandone la sopravvivenza.

Vi accompagneremo per mano alla scoperta dell'idrogeologia degli acquiferi, della fauna sotterranea, degli eventi storici che nel corso delle ere geologiche hanno modellato la struttura della biodiversità, dei fattori ecologici che governano il funzionamento di questo ecosistema. Arriveremo così, alla fine del nostro cammino, ad analizzare i fattori che minacciano la sopravvivenza degli abitanti del buio, ma anche la nostra stessa sopravvivenza, illustrando quanto poco abbiamo fatto sinora per proteggere le acque sotterranee e suggerendo quello che si può ancora fare. L'avventura sta per iniziare: buon viaggio!



La risorgiva carsica del Gorgazzo (Polcenigo, Friuli Venezia Giulia)



Idrogeologia

MARCO PETITTA

13

■ L'acqua nel sottosuolo

Il ciclo dell'acqua si svolge prevalentemente nell'atmosfera, negli oceani e sulla superficie terrestre, ma un'aliquota fondamentale entra in contatto con il sottosuolo, dando vita alla circolazione idrica sotterranea. Durante il suo movimento nel sottosuolo, l'acqua determina e subisce trasformazioni fisiche e chimiche, oltre a influenzare diversi processi biologici e ad interagire con le acque superficiali. La descrizione della componente sotterranea del ciclo idrologico può essere illustrata attraverso la schematizzazione dei principali processi che avvengono nei diversi ambienti sotterranei.

Le acque di precipitazione, al netto delle acque di evapotraspirazione che tornano direttamente all'atmosfera, raggiungono il terreno per poi scorrere in parte sulla sua superficie, alimentando il fenomeno noto come ruscellamento, mentre una componente si infiltra attraverso il suolo e il sottosuolo trasformandosi in acque sotterranee. Il differente destino delle acque è determinato principalmente dalla permeabilità del suolo e del sottostante substrato roccioso, pur essendo influenzato da parametri quali la pendenza dei versanti e l'intensità e durata delle piogge.

La permeabilità di una roccia esprime la sua capacità a farsi attraversare dall'acqua, libera di muoversi all'interno dei vuoti che compongono la roccia stessa. Infatti, ogni roccia o terreno (inteso come roccia non cementata) presenta dei vuoti, dovuti alle sue caratteristiche genetiche (pori) o a caratteri acquisiti dopo la sua formazione (fratture o cavità). La porosità di una roccia viene espressa dal rapporto tra il volume dei vuoti sul suo volume totale, in percentuale. Rocce molto porose (per esempio sabbie, ghiaie, tufi vulcanici,



Sorgenti carsiche (Abruzzo)

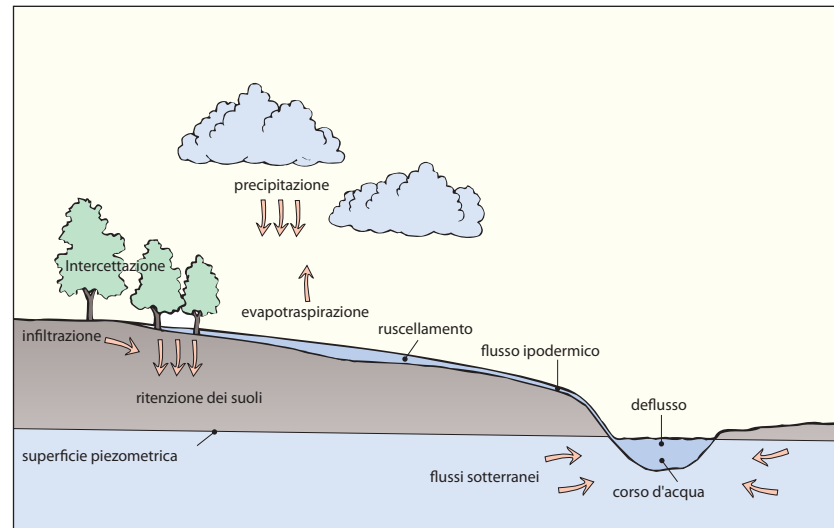
Acque sotterranee carsiche che alimentano un acquedotto (Prealpi Giulie, Friuli)

ma anche argille) possono avere porosità superiori al 30-40%, mentre rocce molto compatte (come graniti, basalti, marmi, calcari non fratturati) hanno porosità anche inferiori all'1%.

L'acqua che attraversa queste rocce utilizza i vuoti presenti, anche se non tutti i pori sono utili al suo passaggio. Infatti, alcuni dei vuoti, una volta occupati dall'acqua, non ne consentono più il movimento, trattenendola al loro interno. Questo fenomeno, chiamato ritenzione specifica, fa sì che la permeabilità, pur dipendendo dalla porosità di una roccia, sia sempre inferiore a quest'ultima. Allo stesso tempo, alcune rocce a porosità elevata possono presentare permeabilità bassa, in quanto molta acqua viene trattenuta per effetto della ritenzione specifica.

Queste differenze sono dovute a fenomeni chimico-fisici a scala microscopica, che bloccano parte dell'acqua che raggiunge le rocce al loro interno. Si possono distinguere quattro diverse componenti di acqua nel sottosuolo: l'acqua igroscopica che viene adsorbita sulla superficie del terreno; l'acqua pellicolare, rappresentata dalle molecole che aderiscono alla superficie dei granuli per effetto delle diverse cariche elettriche presenti sulle rispettive superfici; l'acqua capillare, che per il noto fenomeno fisico tende ad aderire lungo le pareti di pori di piccolissime dimensioni; l'acqua gravifica, l'unica in grado di muoversi liberamente nei vuoti della roccia, sotto effetto appunto della gravità.

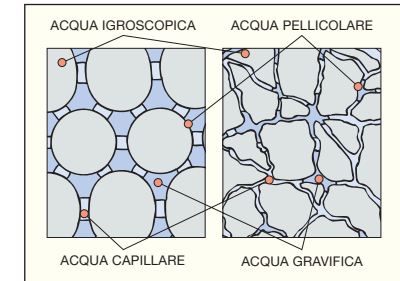
Diviene quindi comprensibile come la permeabilità di una roccia o terreno



Ciclo idrologico delle acque continentali e parametri che lo condizionano

sia sempre inferiore alla sua porosità, in quanto soltanto una parte dei suoi vuoti può essere occupata dall'acqua gravifica: i vuoti resi disponibili al passaggio dell'acqua rappresentano la componente della porosità efficace, espressa in percentuale, corrispondente alla permeabilità.

Il moto dell'acqua gravifica, avvenendo attraverso i pori, è difficoltoso e generalmente lento: si parla di filtrazione attraverso i vuoti disponibili nella



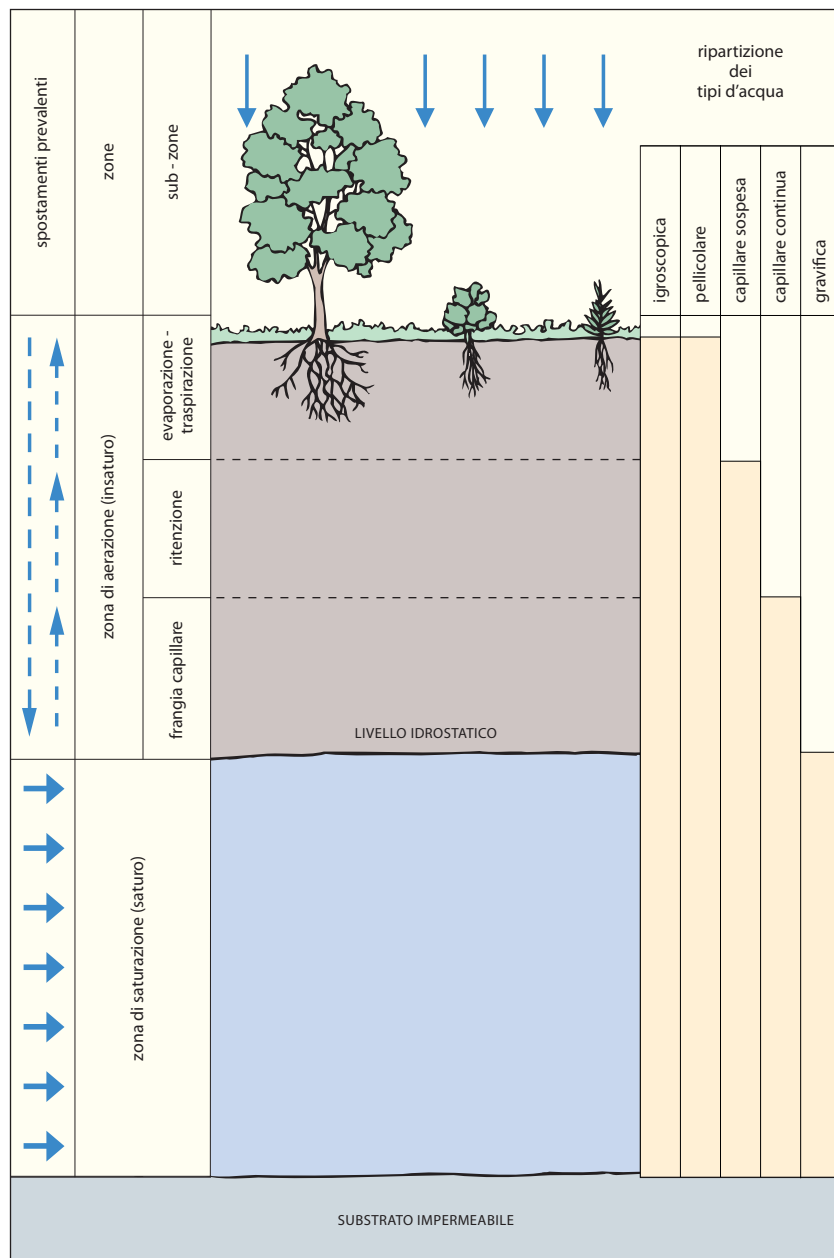
Tipologie delle acque sotterranee che permeano il terreno

roccia. Il moto dell'acqua attraverso i terreni viene genericamente ricondotto alla Legge di Darcy, secondo cui il volume d'acqua che passa nell'unità di tempo (portata) attraverso un terreno disposto in un cilindro di sezione A e lunghezza L , è proporzionale al gradiente idraulico i (dato dalla differenza di carico idraulico sulla lunghezza di percorso L) e ad un "coefficiente di conducibilità idraulica" k , funzione del tipo di terreno attraversato. In altre parole, l'acqua nel sottosuolo, muovendosi, è soggetta a perdite di carico idraulico, ovvero diminuisce la sua energia potenziale in funzione della distanza percorsa e della permeabilità della roccia. Ne consegue che rocce molto permeabili (con elevata porosità efficace) consentono il movimento e la trasmissione di notevoli quantitativi idrici con perdite di carico minime, conservando maggiore energia potenziale. Viceversa, il moto attraverso rocce poco o affatto permeabili (con bassa porosità efficace) avviene con notevole dispendio di energia, quindi con elevate perdite di carico.

I parametri k ed i sono legati tra loro da relazioni inverse, a parità di flusso: all'aumentare della conducibilità idraulica il gradiente tende a diminuire e viceversa. Il prodotto tra gli stessi due parametri determina la velocità del flusso idrico sotterraneo.

È opportuno precisare che la permeabilità e il coefficiente di conducibilità idraulica, pur essendo assimilabili, sono concetti distinti tra loro. La permeabilità è una caratteristica intrinseca della roccia, esprimendo la capacità a farsi attraversare da un qualsiasi liquido, mentre la conducibilità idraulica è riferita esclusivamente all'acqua, che non è sempre l'unico liquido presente nel sottosuolo (basti pensare al petrolio).

Nel suo movimento sotterraneo, l'acqua diviene soggetto attivo e passivo di reazioni chimiche fondamentali, gran parte delle quali avvengono a livello dei suoli, in presenza della componente aeriforme e di abbondante attività biologica. Escludendo la loro descrizione, in quanto si tratta di fenomeni notevolmente complessi e interagenti tra di loro, il principale processo di



Profilo verticale del sottosuolo in relazione alla presenza delle acque sotterranee

interazione acqua-roccia è rappresentato dalla lisciviazione, che consente alle acque sotterranee, durante il loro percorso, di portare in carico, prevalentemente sotto forma di ioni disciolti, componenti provenienti dalle rocce che vengono solubilizzate. Tale processo determina un arricchimento progressivo delle acque in ioni disciolti. In prima approssimazione, si può quindi immaginare che il grado di salinità delle acque sotterranee sia funzione del tempo e del percorso compiuto nel sottosuolo; tuttavia, tale semplificazione risulta spesso ingannevole, in quanto l'interazione con la matrice rocciosa può concentrarsi in momenti e luoghi precisi del percorso sotterraneo. Inoltre la soluzione acquosa può raggiungere condizioni di saturazione nei confronti di un determinato ione, non consentendone un arricchimento ulteriore, sia pure per percorsi più lunghi; anzi, talvolta è in grado di favorirne la precipitazione, come accade negli ambienti carsici (vedi scheda a pag. 18).

Una valutazione preliminare delle caratteristiche delle acque sotterranee, in assenza di analisi chimiche dettagliate, può essere eseguita tramite i principali parametri chimico-fisici, quali temperatura, pH, potenziale di ossido-riduzione, ossigeno disciolto e conducibilità elettrica specifica, quest'ultima funzione diretta del contenuto in sali disciolti (salinità). Questi parametri, essendo ognuno espressione di processi specifici, consentono di comprendere quale sia stato e potrà essere il comportamento dell'acqua nei confronti della matrice rocciosa e delle componenti biologiche presenti.

COMPLESSI IDROGEOLOGICI												
ghiaie											SABBIOSE	
sabbie pulite										FINI GROSSOLANE		
sabbie limose									FINI			
limi-loess							ARGILLOSI					
depositi glaciali				PREV. FINI			PREV. GROSSOLANI					
argille					LIMOSE							
piroclastiti						FINI	GROSSOLANE					
argilliti-marne						CALCAREE						
dolomie							FRATTURATE CARBONIFERE					
calcarei e marne							FRATTURATI		CARBONIFERI			
arenarie							FRATTURATE SEMI-CONSOLIDATE					
vulcaniti				COMPATTE			FRATTURATE		COLATE RECENTI			
rocce cristalline				COMPATTE		ALTERATE	FRATTURATE					

Tabella riassuntiva degli intervalli di conducibilità idraulica (k, in m/sec) per i diversi tipi di rocce

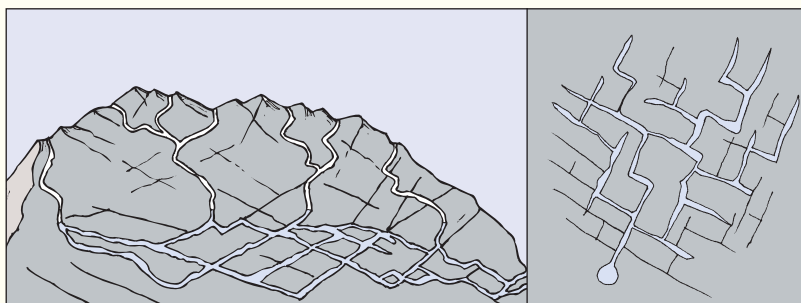
Tra gli acquiferi permeabili per fratturazione, quelli carbonatici sono soggetti al fenomeno del carsismo, che consta nella dissoluzione del carbonato di calcio (calcite) in presenza di acqua e anidride carbonica, che passa in soluzione sotto forma di bicarbonato di calcio, in funzione dei valori di temperatura e pH delle acque. Di conseguenza, i calcari, ma anche le dolomie, pur essendo rocce a bassa porosità efficace, quando soggette a intensa fratturazione, rendono possibile la dissoluzione della roccia e il conseguente aumento dei vuoti al suo interno, come accade frequentemente anche in Italia.

Le fratture tendono a divenire beanti e a consentire una più elevata infiltrazione nel sottosuolo. La circolazione in falda avviene all'interno della rete di fratture, che laddove da microscopiche divengono macroscopiche, aumentano notevolmente la permeabilità e tendono a concentrare il flusso, che aumenta di velocità. Si arriva fino a veri e propri condotti, di dimensioni metriche, in grado di far fluire enormi quantitativi idrici rapidamente nel sottosuolo.

Da un punto di vista geomorfologico, si distinguono un carsismo epigeo (superficiale), che modella le aspre forme calcaree in pianori e ampie depressioni, con lo sviluppo di doline in grado di fornire

infiltrazione concentrata verso il sottosuolo. Nell'acquifero, le cavità tendono a svilupparsi in senso verticale, condizionate dalle direzioni delle discontinuità, trasferendo rapidamente le acque di ricarica verso la falda, riducendo notevolmente il ruolo di filtro del mezzo non saturo sovrastante. Una volta arrivate in falda, le acque tendono a privilegiare l'ampliamento di cavità in senso orizzontale, formando veri e propri fiumi sotterranei che tornano a giorno attraverso le risorgenze (o risorgive). Tutto il ciclo idrogeologico subisce variazioni in termini quantitativi e qualitativi: le emergenze presentano regimi molto variabili, con picchi di portata correlabili direttamente agli eventi meteorici, visti i brevi tempi di percorrenza; le acque divengono "dure", aumentando notevolmente il contenuto in ioni calcio e subordinatamente magnesio, oltre che bicarbonato.

Tuttavia, sebbene il processo tenda prevalentemente alla dissoluzione, quando le condizioni di pressione, temperatura e presenza di anidride carbonica variano, lo stesso può invertirsi e portare alla precipitazione del carbonato di calcio, dando luogo alle note forme sotterranee (quali stalattiti e stalagmiti), nonché alla formazione dei travertini, rocce tipicamente collegate a sorgenti provenienti da acquiferi carsici, dove la precipitazione



Circolazione idrica sotterranea in un acquifero fratturato carsico (in pianta e in sezione)



Altipiano carsico del Monte Matajur (Friuli)

ne avviene in concomitanza con la venuta a giorno delle acque di falda. Inoltre, il contenuto in calcio e bicarbonati disciolti può portare le acque di falda alla saturazione della soluzione acquosa, impedendo il progressivo processo di dissoluzione e di fatto inibendo l'ampliamento delle cavità e delle fratture. In questi casi, si possono osservare acquiferi carbonatici fratturati molto permeabili nella zona insatura, per lo svilup-

po del carsismo epigeo e subverticale, con minimo sviluppo in zona saturata, dove la circolazione idrica sotterranea avviene soltanto per rete di fratture. In termini di risorsa, questa è la situazione ideale, in quanto determina altissima infiltrazione efficace, ma anche enorme accumulazione all'interno dell'acquifero ed erogazione della risorsa più lenta e meno impulsiva, come accade negli acquiferi appenninici.

La legge di Darcy rende conto soltanto del flusso sotterraneo in condizioni di completa saturazione, quando tutti i vuoti della roccia sono riempiti da acqua, nonché in condizioni di moto laminare, cioè a velocità limitata (generalmente non superiore ai centimetri al secondo). Quando i vuoti di una roccia non sono completamente riempiti dall'acqua, ma è presente anche aria, il sistema diviene trifasico (terreno, acqua, aria) e le modalità di movimento dell'acqua, pur essendo simili, risentono della presenza dell'aria, con parziale saturazione del terreno.

Questa condizione è comune nei suoli e nelle porzioni di sottosuolo più prossime alla superficie, dove le acque di infiltrazione non saturano totalmente il terreno e si muovono quasi esclusivamente in direzione verticale dall'alto verso il basso, per la legge di gravità. Nel loro percorso, mentre vengono parzialmente trattenute nel terreno costituendo l'acqua non gravifica, tenderanno a raggiungere la zona più profonda, dove si verifica la completa saturazione dei vuoti e quindi il movimento diviene prevalentemente orizzontale. Di conseguenza, in un profilo verticale che dalla superficie raggiunge il sottosuolo, si distinguono due zone principali dotate di caratteristiche idrogeologiche differenti: una superiore, soltanto parzialmente satura e con aria, dove il flusso idrico avviene in senso verticale, denominata zona vadosa o insatura; una inferiore più profonda, totalmente satura, dove valgono le condizioni di Darcy, denominata zona satura.

Nella zona insatura si possono distinguere almeno tre strati differenti: uno strato superficiale corrispondente al suolo, dove la componente organica è abbondante, con apparati radicali, ricca attività biologica e dove i fenomeni di infiltrazione sono influenzati anche dall'evapotraspirazione; un secondo strato sottostante il suolo, dove i processi sono principalmente chimico-fisici, in cui l'acqua di infiltrazione si muove verso il basso e i vuoti sono occupati dalle acque di ritenzione e pellicolari; infine, una terza zona più profonda, prossima alla zona satura sottostante, dove possono essere presenti fenomeni di capillarità, con flusso anche dal basso verso l'alto.

La circolazione idrica in questo contesto risulta influenzata da diversi parametri chimici, fisici e soprattutto biologici. In termini riassuntivi, tutta la zona insatura può essere considerata di transito per le acque di infiltrazione dirette verso la zona satura, motore del flusso idrico sotterraneo. In realtà, la zona insatura assume fondamentale importanza per l'interazione acqua-roccia e per le modifiche anche sostanziali cui viene sottoposta l'acqua, che, scambiando con la matrice rocciosa in presenza di aria, assume le caratteristiche chimico-fisiche che ne determineranno il destino idrogeochimico in zona satura.

La superficie che separa la zona insatura da quella satura prende il nome di superficie piezometrica, indicata spesso anche come superficie freatica, quale superficie satura direttamente connessa alla superficie da una zona vadosa per-

meabile. Il termine "piezometrico" vuole indicare il potenziale di pressione dell'acqua nel sottosuolo rispetto alla pressione atmosferica, con la quale si trova in equilibrio attraverso l'aria contenuta nella zona vadosa. La posizione della superficie piezometrica è variabile nel tempo, in funzione dell'arrivo delle acque di infiltrazione dalla sovrastante zona insatura; queste variazioni presentano in genere un ciclo annuale di ricarica ed esaurimento, connesso al ciclo idrologico di superficie, a meno di un ritardo dovuto al tempo di percorrenza delle acque nel mezzo non saturo, relazionabile alla sua permeabilità e spessore. Oltre alle oscillazioni annuali, la superficie piezometrica presenta una variabilità pluriennale, che rende conto delle differenze climatiche su lungo periodo.

L'andamento spaziale della superficie piezometrica viene descritto dalle curve isopieze, che uniscono punti ad uguale potenziale piezometrico; le risultanti isolinee consentono di identificare facilmente direzione e verso di scorrimento delle acque sotterranee nell'acquifero, nonché le aree di alimentazione o recapito e il valore del gradiente idraulico. Poiché il movimento dell'acqua sotterranea è strettamente legato alla permeabilità, l'identificazione di una zona insatura e di una zona satura sottostante non necessariamente implica disponibilità idrica sotterranea. In mezzi poco permeabili è comunque sempre riconoscibile un livello piezometrico, ma (ad esempio in argille e basalti non fratturati) l'acqua gravifica è poca e le velocità di flusso sono talmente basse da poterli considerare di fatto impermeabili. Viceversa, rocce più permeabili consentono il movimento ed il ricambio dell'acqua al di sotto della superficie piezometrica.

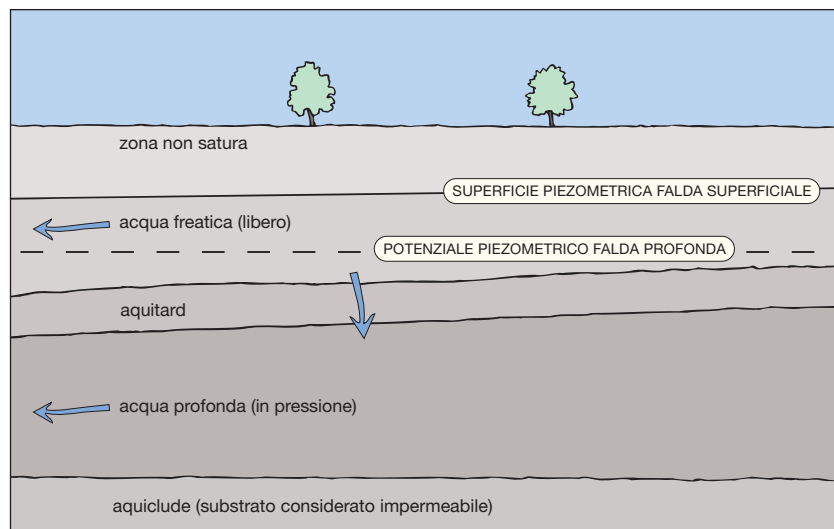


L'altipiano carsico del Monte Canin (Friuli)

■ Acquiferi, aquiclude e aquitard

Una classificazione delle rocce in funzione della loro permeabilità consente quindi di identificare acquiferi (rocce permeabili) e aquiclude (rocce a comportamento praticamente impermeabile). Nei primi il ricambio e il movimento dell'acqua in zona satura avviene in tempi ridotti (giorni-mesi-anni) e il flusso idrico è ingente in funzione dell'elevata permeabilità. Nei secondi, l'acqua si muove in tempi molto più lunghi (decenni, secoli, millenni), con maggiore difficoltà e in quantità ridotte, tanto da poterli considerare ostacoli insormontabili alla circolazione idrica sotterranea. In natura la gamma delle conducibilità idrauliche risulta estremamente ampia passando da valori del metro al secondo fino a meno di 10^{-12} m/s. La gradualità della permeabilità in diversi mezzi consente di identificare famiglie di rocce a permeabilità intermedia (aquitard o acquitardi), che, pur consentendo un modesto deflusso idrico sotterraneo, si presentano come ostacoli alla circolazione.

Il concetto di permeabilità è quindi relativo: infatti, per delimitare i corpi idrici sotterranei è fondamentale verificare il contrasto di permeabilità tra le diverse rocce presenti nel sottosuolo. Gli acquiferi sono generalmente limitati lateralmente e inferiormente da rocce a minore permeabilità, siano essi aquitard o aquiclude. In ambedue i casi, l'acquifero risulta ben definito nella sua estensione spaziale. Gli scambi idrici degli acquiferi con gli aquiclude confinanti sono praticamente nulli, ma anche quelli con gli aquitard sono talmente ridotti



Acquiferi (livelli permeabili), aquitard (livelli che ostacolano la circolazione idrica sotterranea) e aquiclude (livelli a bassa permeabilità in grado di impedire il flusso sotterraneo)

da poter essere considerati trascurabili, anche se non garantiscono la tenuta idraulica a lungo termine. Gli stessi aquitard, in virtù della loro permeabilità relativa, possono comportarsi quali recettori di acque sotterranee se posti a contatto con rocce a più bassa permeabilità, sebbene il flusso e il volume idrico immagazzinato siano ridotti. Si identificano quindi quali rocce permeabili, oltre agli acquiferi veri e propri, anche quelle a ridotta permeabilità che siano a contatto con aquiclude.

Se la porosità efficace e quindi la permeabilità sono dovute a pori della roccia, l'acquifero prende il nome di acquifero poroso, distinto dall'acquifero fratturato, dove invece la permeabilità è data dall'insieme della fratturazione cui è stata sottoposta la roccia per effetto della tettonica successiva alla sua formazione.

Negli acquiferi (come per gli aquiclude e gli aquitard) si comprende l'insieme delle rocce omogenee a permeabilità confrontabile, includendo la zona insatura e quella satura sottostante. La superficie piezometrica identifica la porzione di acquifero in cui il flusso idrico sotterraneo avviene in zona satura, che prende il nome di falda acquifera o più semplicemente falda.

Le diverse successioni verticali o laterali di rocce a diversa permeabilità, oltre a identificare i diversi corpi idrici sotterranei, consente di classificarli insieme alle falde in essi contenuti. In particolare, in caso di alternanza verticale di acquiferi, aquitard e aquiclude, si identificano per ogni acquifero distinte superfici piezometriche, la cui posizione consente di classificare le diverse falde. Nella falda libera il livello piezometrico divide l'acquifero in una zona satura e una insatura sovrastante; viceversa, nella falda in pressione (o confinata, o imprigionata) l'acquifero è sormontato da un aquiclude e il potenziale piezometrico (l'equivalente della superficie piezometrica) risulta superiore al tetto dell'acquifero stesso, confinando l'acqua in pressione al suo interno. Nel caso particolare di un aquiclude posto in superficie, la sottostante falda in pressione può assumere potenziali piezometrici superiori a quelli della superficie topografica, identificando in tal caso un acquifero e una falda artesia, che determina deflusso spontaneo tramite perforazioni che raggiungano il sottostante acquifero.

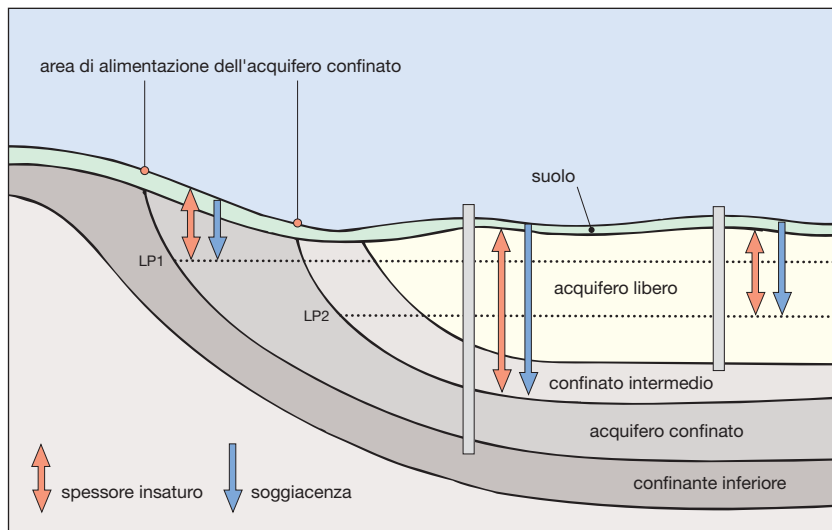


Pozzo artesia

■ Le sorgenti

Le aree dove le acque sotterranee emergono per scorrere poi sulla superficie terrestre sono definite sorgenti. La portata di una sorgente è il volume di acqua erogato nell'unità di tempo (usualmente espressa in litri - o m^3 - al secondo). Questo parametro varia nel tempo e dipende dalla permeabilità dell'acquifero che alimenta l'emergenza, ma anche dalla posizione della superficie piezometrica. Infatti, quando nell'acquifero il livello piezometrico è più alto, vengono erogate portate più elevate; in periodi siccitosi invece l'abbassamento della superficie piezometrica determina una riduzione progressiva della portata della sorgente. Di fatto, la portata erogata dalle sorgenti rappresenta l'entità della risorsa idrica sotterranea naturalmente rinnovabile, ovvero corrisponde alla quantità di acqua meteorica che attraverso l'infiltrazione ha raggiunto la falda.

La localizzazione di una sorgente è rappresentata dal punto di incontro della superficie topografica con la superficie piezometrica, ma quasi sempre coincide anche con un limite di permeabilità, ovvero con il contatto tra un acquifero e un mezzo a minore permeabilità. Se quest'ultimo è un acquiclude, il limite di permeabilità sarà a flusso nullo e le acque sotterranee emergeranno dalla sorgente; se invece il contatto è con un aquitard, una porzione delle acque di falda può filtrare attraverso il mezzo a minore permeabilità, limitando la portata della sorgente.



Falda libera e falda in pressione in un acquifero multifalda

L'area sorgiva può essere caratterizzata da un bacino idrico di dimensioni molto variabili, generalmente con presenza di un emissario: si va dal piccolo rigagnolo montano ad aree umide di notevole estensione, caratterizzate generalmente dalla presenza di numerose polle sorgive, in parte anche di subalveo. Anche la portata è variabile: si va da sorgenti di portata inferiore al litro al secondo (come i classici fontanili di montagna) a quelle con portate dell'ordine della decina di metri cubi al secondo (10.000 litri al secondo).

La variazione della portata di una sorgente nel tempo, generalmente su base ciclica annuale, è detta regime della sorgente. Lo studio del regime consente di acquisire importanti informazioni sulle caratteristiche dell'acquifero che alimenta la sorgente (permeabilità, estensione, capacità di immagazzinamento), ma anche sull'entità e modalità di ricarica da parte delle acque meteoriche. Infatti, la portata media annua di una sorgente equivale all'entità dell'infiltrazione efficace moltiplicata per l'area di alimentazione. Ciò consente, note la portata di una sorgente e la sua appartenenza ad un acquifero, di calcolare la sua ricarica media oppure, conoscendo il valore di infiltrazione efficace, di determinare l'estensione della sua area di alimentazione.

Le sorgenti vengono generalmente classificate in base al loro regime, alle loro caratteristiche chimico-fisiche e alle loro modalità genetiche. Si distinguono sorgenti temporanee o stagionali (attive soltanto in alcuni periodi dell'anno), sorgenti intermittenti (tra cui alcune sorgenti carsiche) e sorgenti perenni, cioè sempre attive. Tra queste ultime è opportuno distinguere tra



Acque sorgive unite ad acque superficiali in ambienti umidi (Terme Varroniane, Cassino, Lazio)



Sorgente emergente dai ruderi della Chiesa di San Vittorino (Rieti, Lazio)



Sorgente solfurea mineralizzata

sorgenti a regime variabile, cioè soggette a forti oscillazioni della portata durante l'anno, e sorgenti a regime regolare, ovvero quelle in cui la portata non varia oltre il 50% rispetto al valore medio.

Dal punto di vista chimico-fisico, le sorgenti si distinguono per temperatura e contenuto in sali disciolti. Le acque sorgive normali hanno temperature corrispondenti a quelle dell'area di alimentazione, generalmente comprese tra 4-5°C e 16-18°C, con valori tipici di 10-12°C; la loro salinità totale è in genere inferiore a 1-1,5 g/l. In questi casi, le acque sotterranee assumono temperatura e salinità in funzione del loro movimento nell'acquifero. Nei casi in cui si determina un'alterazione naturale della temperatura o della salinità, dovuta alla risalita di fluidi profondi dalla crosta terrestre, le sorgenti vengono classificate come termali o minerali.

Si distinguono acque ipertermali (temperatura >50°C), mesotermali (tra 35° e 50°C) e ipotermali (20-35°C); in funzione della salinità si hanno acque minerali (contenuto in sali superiore a 1,5 g/l), acque salmastre (mineralizzazione superiore a 5 g/l), fino a salamoie o acque marine, quando i sali superano i 20-30 g/l. Per acque a bassa salinità, si distingue tra acque oligominerali (contenuto inferiore a 250 mg/l), medio-minerali (tra 250 e 500 mg/l), minerali (tra 500 e 1500 mg/l), per poi passare alle acque ricche in sali minerali (oltre i 1500 mg/l).

Una classificazione più schiettamente idrogeologica delle sorgenti tiene conto delle modalità di emergenza delle acque sotterranee. Nelle sorgenti per limite di permeabilità, definito o indefinito, si distingue un livello impermeabile alla base dell'acquifero, che impedisce l'ulteriore movimento dell'acqua verso il basso. Le sorgenti per soglia di permeabilità presentano un acquifero limitato lateralmente che si estende in profondità, quindi in grado di immagazzinare ingenti quantitativi idrici e di sopportare periodi siccitosi. Le sorgenti per affioramento della piezometrica sono invece caratterizzate dal contatto della superficie topografica con quella piezometrica con conseguente emergenza di acqua. Le più frequenti tra queste sono le sorgenti subalvee fluviali o lacustri (dette anche sorgenti lineari, perchè si estendono lungo un tratto del corso d'acqua).

In alcuni casi le sorgenti subalvee si possono osservare, oltre che in fiumi e laghi, anche lungo le coste, con sversamento direttamente in mare. Ciò avviene quando un acquifero non incontra limiti di permeabilità e si trova a contatto diretto con le acque marine; l'osservazione e la valutazione della portata di queste sorgenti non è agevole, ma è facilitata dalla differenza di temperatura e salinità tra acque dolci sotterranee e quelle salate marine.



Altopiano carsico sede di infiltrazione concentrata che ricarica gli acquiferi sotterranei (Abruzzo)

■ Rapporti tra acque sotterranee e acque superficiali

Le acque sotterranee e quelle superficiali non si limitano al rapporto di ricarica delle falde attraverso le acque di infiltrazione meteoriche. Gli acquiferi più prossimi alla superficie possono entrare direttamente in contatto con i corpi idrici superficiali, rappresentati da fiumi e laghi, naturali e artificiali, generando i rapporti fiume/falda.

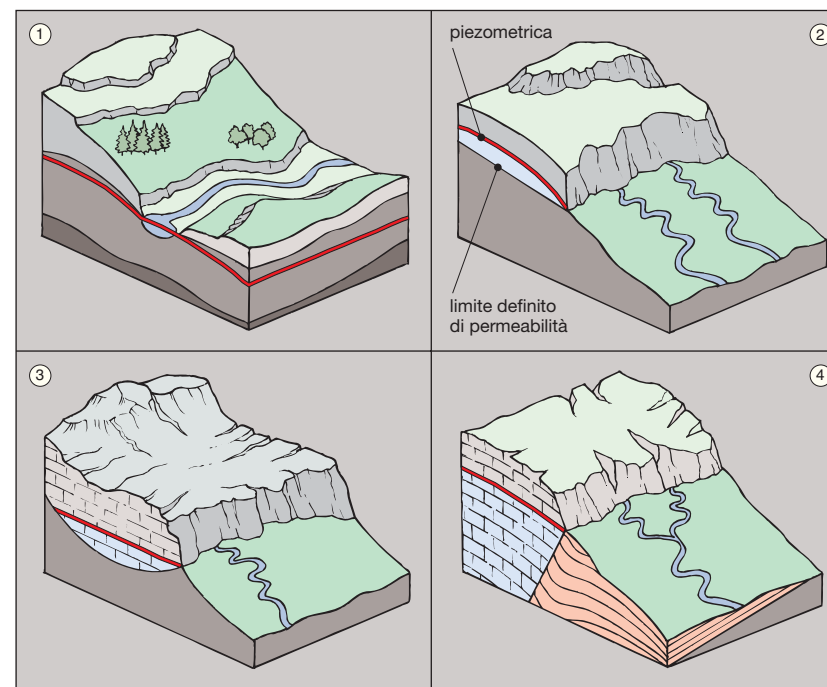
I corsi d'acqua, per erosione verticale, possono venire a contatto con la superficie piezometrica di un sottostante acquifero, intercettandolo. Si tratta del fenomeno delle sorgenti lineari, ovvero di venute dirette in alveo lungo un tratto fluviale (*outwelling*), che contribuiscono ad aumentare la portata fluviale in assenza di immissari. In questo caso, queste sorgenti per affioramento della superficie piezometrica rilasciano acqua sotterranea nel fiume, dove la superficie piezometrica si trovi a quote superiori a quella fluviale. Gli scambi avvengono direttamente tra il substrato acquifero e il corso d'acqua in assenza di depositi in alveo (ad esempio nelle gole montane), ma più spesso tramite il filtro dei depositi a permeabilità variabile costituenti il letto fluviale e il materasso alluvionale.

Viceversa, quando il livello idrico fluviale è superiore al livello piezometrico della falda adiacente, si innesca un flusso inverso dal fiume verso la falda, che viene, quindi, ricaricata dalle acque superficiali, determinando

da un lato un afflusso supplementare alla falda, e dall'altro favorendo l'immissione diretta di acque di scarsa qualità, in assenza del filtro della zona insatura.

Poiché il livello piezometrico presenta variazioni spaziali (funzione del gradiente idraulico) e soprattutto temporali (oscillazioni piezometriche), il rapporto tra una falda e un fiume non è univocamente definito. La superficie piezometrica tende a posizionarsi in equilibrio con la superficie libera dell'acqua, determinando tratti fluviali in cui è la falda ad alimentare il fiume (*upwelling*), alternati a tratti in cui è il fiume ad alimentare la falda (*downwelling*). Le oscillazioni temporali della superficie freatica e quelle del livello fluviale possono inoltre causare inversioni locali e provvisorie del rapporto fiume-falda, nello stesso tratto fluviale, nelle diverse stagioni.

I rapporti fiume-falda possono essere ricostruiti tramite un esame dell'andamento delle isopieze: le curve presentano concavità verso il basso dove la falda alimenta il fiume e viceversa risultano divergenti dal corso d'acqua dove è quest'ultimo ad alimentare l'acquifero.



Classificazione idrogeologica delle sorgenti: 1. per affioramento della piezometrica (lineari, con incremento di portata nell'alveo fluviale); 2. per limite di permeabilità, con acquiferi privi di riserve situate in profondità; 3.-4. per soglia di permeabilità, con serbatoio profondo in grado di immagazzinare riserve idriche



Sorgente per faglia (limite di permeabilità, Tempera, L'Aquila, Abruzzo)

Le medesime considerazioni valgono per i rapporti tra le falde e i laghi, con possibilità di drenaggio nel bacino e di perdite verso il sottosuolo. In questo caso, la presenza di sedimenti a bassa permeabilità sul fondo lacustre, dovuti alla sedimentazione in acque a scarsa mobilità, ostacola la comunicazione con la falda e riduce la possibilità di perdite. Al contempo, le maggiori oscillazioni cui sono soggetti i laghi causano variazione di portata e anche eventuale inversione dei rapporti a carattere stagionale.

L'interazione tra acque superficiali e sotterranee avviene dove la superficie piezometrica è molto vicina a quella topografica e quindi le zone costiere rappresentano le aree dove necessariamente i due ambienti vengono a contatto.

Dove sono presenti acquiferi o aquitard, frequenti per la presenza di sedimenti marini, fluviali o di aree umide costiere, la superficie piezometrica ha un potenziale imposto dal livello del mare stesso, corrispondente alla isopiezia 0, e si verifica un'intensa interazione tra acque superficiali e sotterranee.

I corsi d'acqua, infatti, si presentano come drenanti o, più spesso, come perdenti nei confronti della falda; allo stesso tempo le oscillazioni del livello marino dovute alle maree influenzano il livello piezometrico di tutte le aree costiere. In questa situazione, le acque dolci e quelle salate hanno un rapporto basato sulla differenza di densità.

Nel sottosuolo le acque dolci contenute nell'acquifero presentano un gradiente idraulico naturale con livelli piezometrici decrescenti fino alla linea di costa.

A causa della differenza di densità delle acque marine (in media 35 g/l contro i valori medi inferiori a 1 g/l delle acque dolci), si crea uno spessore di acque dolci sotterranee a quote inferiori al livello del mare, che per la loro minore densità tendono a "galleggiare" su quelle marine. L'interfaccia di passaggio tra acque dolci e salate si posiziona a profondità di circa 35 volte il potenziale piezometrico assunto dalla falda freatica.

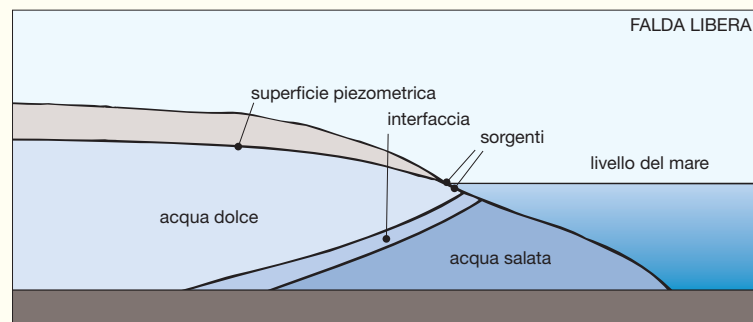
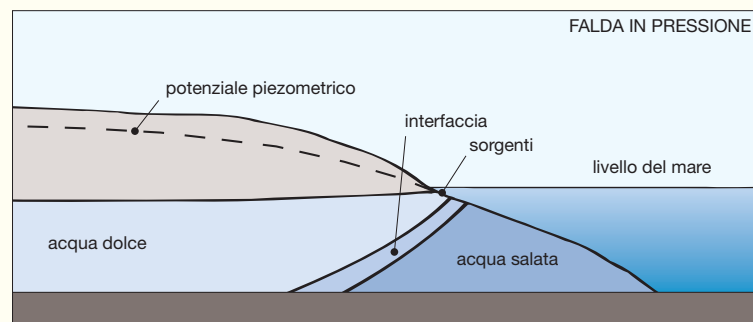
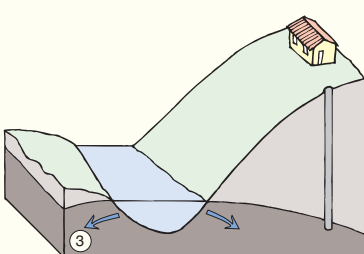
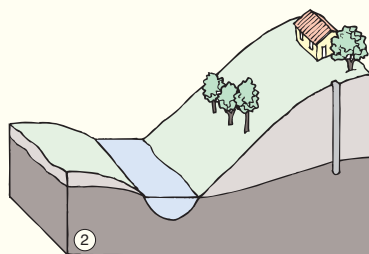
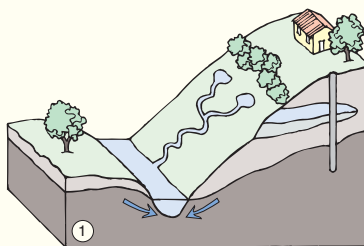
La transizione da acque dolci a salate non è netta, ma prevede una fascia più o meno ampia di miscelazione (dipendente dalle temperature delle acque, dal loro pH e da altri parametri), attraverso la quale si passa, con gradualità, da



Sorgente lineare del Fiume Potenza (Marche)

Sopra: rapporti fiume-falda
 1. la falda alimenta il fiume
 2. sostanziale equilibrio tra fiume e falda
 (in funzione delle stagioni)
 3. il fiume alimenta la falda

Sotto: rapporti tra acque sotterranee dolci
 e acque marine che saturano le rocce
 in prossimità della costa



acque dolci a acque salmastre e poi schiettamente marine, sempre a profondità imposte dal potenziale piezometrico sul livello del mare.

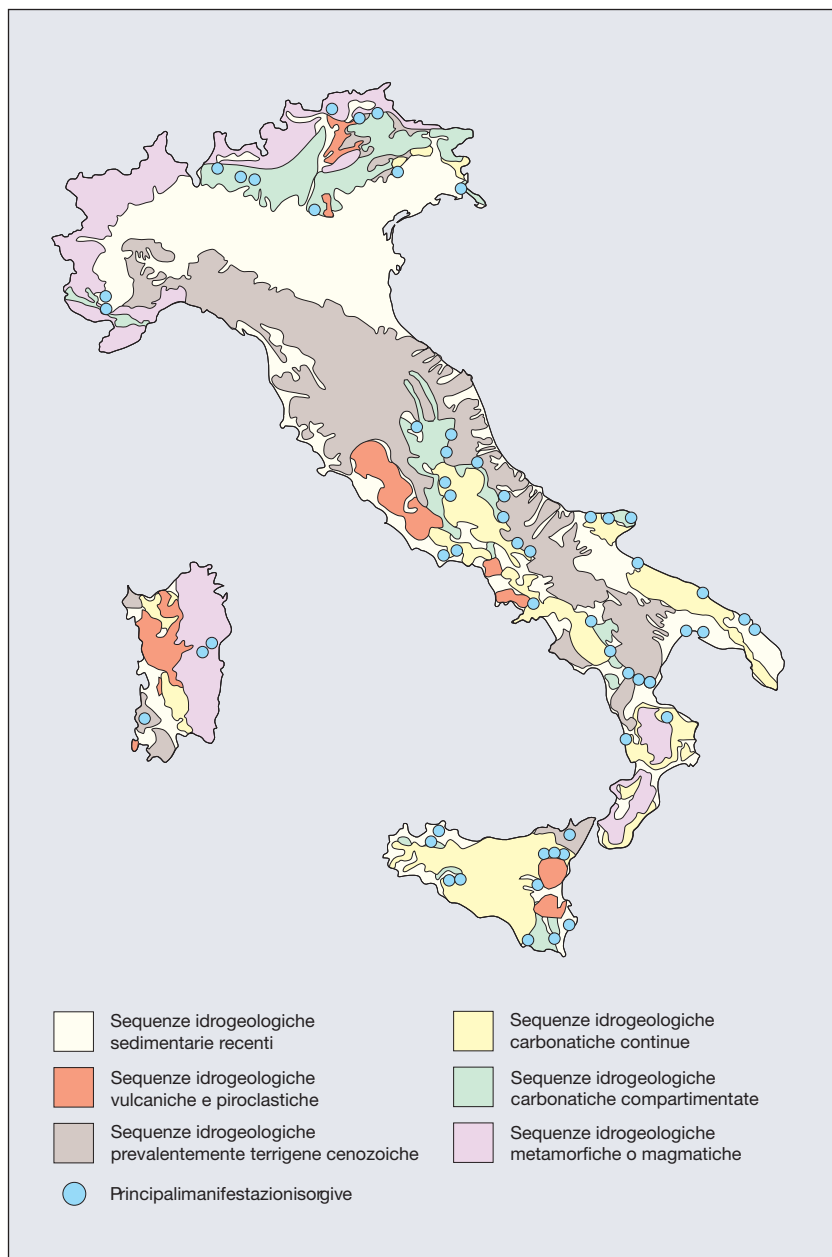
Tale effetto di confinamento delle acque marine in profondità nella falda può venire sciaguratamente messo in pericolo dalle attività di emungimento incontrollato che, riducendo lo spessore della falda di acqua dolce per abbattimento della superficie piezometrica, causano la risalita delle acque salmastre e salate, finanche in superficie, in corrispondenza delle depressioni piezometriche indotte. Tale fenomeno determina la cosiddetta intrusione salina delle falde costiere. Le conseguenze sono da considerarsi estremamente negative, sia per l'utilizzazione delle acque, sia per le variazioni indotte nell'habitat sotterraneo.

■ Idrogeologia regionale

L'estrema variabilità geologica e geomorfologica del territorio italiano determina un altrettanto vario assetto idrogeologico. In funzione della diversa permeabilità delle rocce, sono presenti diversi tipi di acquiferi, di aquitard e di acquiclude. In generale, i principali acquiferi, in termini di estensione e di disponibilità idrica sotterranea, sono rappresentati dagli acquiferi carbonatici fratturati e dagli acquiferi alluvionali e costieri. Molto produttivi sono anche gli acquiferi vulcanici, la cui permeabilità risulta variabile in funzione delle diverse litologie che li costituiscono (tufi, ignimbriti, colate laviche).



Sorgente per soglia di permeabilità (Capo Pescara, Popoli, Abruzzo)



Schema idrogeologico semplificato dell'Italia

Le rocce silicoclastiche (molasse, flysch, arenarie e marne) si comportano da acquiclude nei confronti degli acquiferi carbonatici e alluvionali, ma di per sé possono essere considerati degli aquitard, contenenti risorse idriche non trascurabili.

Le rocce a minore permeabilità, considerabili acquiclude, sono rappresentate dalle rocce metamorfiche, quelle intrusive ed effusive non fratturate, quali graniti e basalti rispettivamente, e dai sedimenti a grana molto fine quali argille e argilliti, sia da sole che associate all'interno di corpi sedimentari alluvionali e costieri.

L'identificazione delle diverse litologie sul territorio italiano e i loro contatti nelle diverse aree consentono di elaborare una mappa idrogeologica molto semplificata. L'arco alpino non è particolarmente ricco di acque sotterranee, soprattutto nel settore occidentale e centrale, dove affiorano prevalentemente rocce del substrato metamorfico e intrusivo a bassa permeabilità.

In questo settore le risorse idriche sotterranee sono concentrate nelle zone di alterazione e nelle abbondanti fasce detritiche affioranti, prevalentemente, alla base dei versanti, che costituiscono acquiferi locali di una certa rilevanza.

Nel settore alpino orientale, dalle Prealpi lombarde alle Dolomiti fino alla regione del Carso, divengono prevalenti gli acquiferi carbonatici fratturati, che per loro natura hanno una notevole potenzialità idrica. Tuttavia, l'abbondante frazione dolomitica ne limita la permeabilità riducendone la capacità di immagazzinamento. Anche in questi settori, importanti acquiferi sono rappresentati dai depositi detritici. Nel settore veneto-friulano-giuliano, la permeabilità diviene elevatissima per effetto dell'importante presenza del carsismo. Questi acquiferi, in cui sono abbondantissime le cavità sia in zona insatura che satura, determinano una ingente infiltrazione accompagnata da un rapido deflusso idrico sotterraneo in condotti e cavità, tipico degli acquiferi carsici.

La Pianura Padana, compreso il fondovalle dell'Adige, rappresenta il maggiore dominio acquifero dell'Italia settentrionale, sia ai suoi margini dove sono abbondanti gli acquiferi alluvionali dei suoi tributari e gli acquiferi loca-



Sorgente Igropetrica (Monti della Laga, Abruzzo)

li pedemontani, che alimentano le sorgenti della nota linea delle risorgive, sia al suo centro, dove si osserva la sovrapposizione di livelli acquiferi con livelli aquitard e aquiclude, dando vita ad almeno quattro livelli acquiferi sovrapposti, i più profondi dei quali sono in pressione. Soprattutto nel settore terminale, il Po presenta una intensa relazione tra le sue acque superficiali e quelle della falda freatica, fino alla costa.

L'Appennino settentrionale ligure-tosco-emiliano non ha importanti acquiferi e la circolazione idrica sotterranea risulta abbastanza frammentata nei sedimenti silicoclastici che lo costituiscono. Le sorgenti sono numerose, di portata limitata (qualche litro o decina di litri al secondo in media) e riconducibili ad alternanze di acquiferi e aquitard con livelli a bassa permeabilità.

L'Appennino centrale, sia quello umbro-marchigiano che quello laziale-campiano-abruzzese, presenta la maggiore concentrazione di risorse idriche sotterranee, ubicate negli estesi acquiferi carbonatici, in cui il carsismo è ben sviluppato soprattutto in zona di ricarica, mentre la presenza di sedimenti alluvionali recenti alla base dei rilievi ha ostacolato lo sviluppo del carsismo in profondità e determina la concentrazione del flusso sotterraneo in un numero limitato di sorgenti basali caratterizzate da elevate portate (superiori al metro cubo al secondo) e dotate di regime stabile.

Le aree alluvionali dei corsi d'acqua appenninici non ricevono soltanto le risorse erogate dalle sorgenti già citate, ma nei loro fondovalle si sviluppa



Sorgente del fiume Gari a Cassino (Lazio)

un'elaborata interazione tra fiumi e falde, talvolta sovrapposte come nel caso del Po.

Sul versante tirrenico dell'Italia centrale sono abbondanti gli acquiferi vulcanici, presenti comunque anche al Nord (Colli Euganei) e al Sud (Pollino, Etna). Questi acquiferi hanno una notevole potenzialità, influenzata dall'elevata permeabilità e infiltrazione di specifiche litologie, alternate ad altre assai meno permeabili che localmente determinano la separazione della circolazione idrica sotterranea superficiale e profonda.

La Puglia è sede di un importante acquifero carbonatico carsico e buona parte delle sue risorse idriche sotterranee finisce direttamente a mare, quindi a contatto diretto con le acque marine, dando luogo a fenomeni di intrusione laddove l'attività antropica ha intercettato il flusso idrico sotterraneo.

Basilicata e Calabria, la prima per abbondanza di argille e la seconda per gli estesi aquiclude metamorfici e intrusivi, sono abbastanza povere di acqua sotterranea, ad eccezione di alcune piane e zone costiere.

Anche la Sardegna, essendo prevalentemente occupata da rocce intrusive a bassa permeabilità, possiede limitate risorse idriche sotterranee, pur presentando importanti aree carsiche. In Sicilia, infine, si alternano imponenti acquiferi carbonatici e vulcanici con aree occupate prevalentemente da sedimenti argillosi a bassa permeabilità, o da evaporiti, senza trascurare gli acquiferi di fondovalle e delle aree costiere.



La sorgente Vetoio, ai margini di un'area urbanizzata (L'Aquila, Abruzzo)

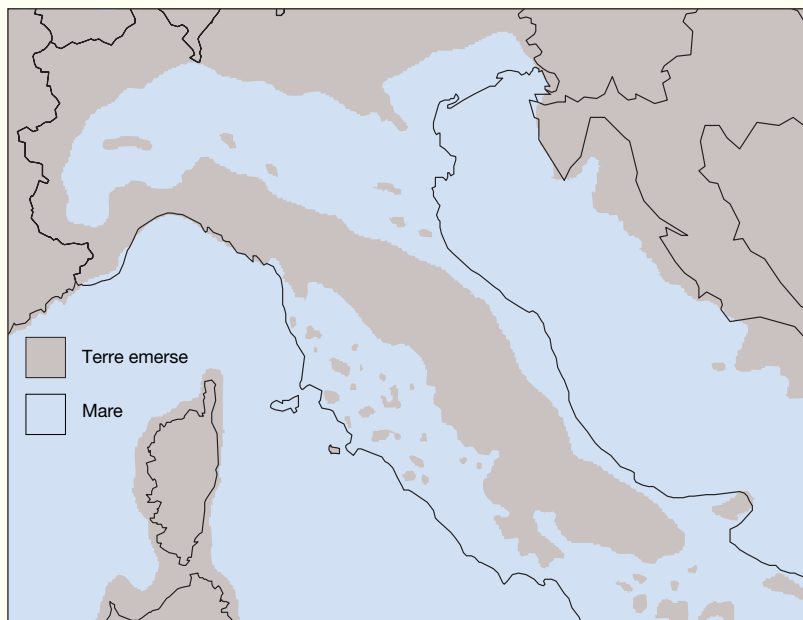
L'assetto idrogeologico italiano è strettamente dipendente dalla sua storia geologica e tettonica. In modo molto sintetico e quindi incompleto, è opportuno ricordare le principali tappe dell'evoluzione paleogeografica, soprattutto in termini di rapporti tra terre emerse e sommerse.

Il territorio italiano è geologicamente molto giovane, essendo stato soggetto a sedimentazione marina per gran parte delle ere geologiche, praticamente per tutto il Paleozoico, il Mesozoico e gran parte del Cenozoico. Ad esclusione della Sardegna, dell'arco alpino esterno e di quello calabrese, il resto d'Italia resta sotto il livello marino fino alla parte finale del Cenozoico, quando, durante il Miocene (fra i 23 e i 5 milioni di anni fa), le spinte orogenetiche hanno portato

alla formazione delle Alpi e degli Appennini. Peraltro l'orogenesi alpina aveva dato i primi segni di sé già alla fine del Mesozoico.

In questo periodo sono già emerse buona parte della catena alpina e del Carso, la Sardegna e parte della Toscana. Il mare si trasforma gradualmente in golfi e bracci di più modeste dimensioni, cui si alternano i primi rilievi appenninici, con archi allungati in senso meridiano ed estesi blocchi disarticolati.

Verso la fine del Miocene (Tortoniano-Messiniano) si va completando la chiusura del mare corrispondente all'attuale Mediterraneo e si registra una crisi di salinità, per la chiusura dello stretto di Gibilterra, con conseguente evaporazione e salinizzazione del mare chiuso relitto.



L'Italia centro-settentrionale durante il Miocene

In questo periodo, la scomparsa delle acque marine determina la completa emersione del territorio, con conseguenze rilevanti sia per la formazione dei bacini idrografici, simili agli attuali, sia per le migrazioni faunistiche.

Nel successivo Pliocene, l'orogenesi concentra i suoi effetti sull'Appennino, riducendo il bacino adriatico con l'emersione delle coste marchigiano-abruzzesi e il riempimento del bacino padano da parte di detriti e alluvioni. Al contempo, si creano per tettonica distensiva i bacini intramontani appenninici, dove vanno a concentrarsi i depositi detritici, alluvionali e lacustri provenienti dallo smantellamento della catena emersa.

L'Era Quaternaria si apre, circa due milioni di anni fa, con il Pleistocene,

durante il quale si completa l'emersione del territorio, che assume la forma odierna.

Caratteristiche di questo periodo sono le glaciazioni, che proseguono fino all'attuale Olocene (gli ultimi diecimila anni della storia geologica del nostro pianeta).

Le oscillazioni climatiche determinano l'alternanza di periodi freddi e secchi con periodi interglaciali caldi e umidi, determinando le oscillazioni eustatiche del livello marino, che causano continuo arretramento e avanzamento delle linee di costa, variazioni del livello di base dei corsi d'acqua, nonché dei limiti degli acquiferi e quindi della posizione delle sorgenti, con diretta influenza anche sull'evoluzione del reticolo carsico.



L'Italia centro-settentrionale durante l'acme glaciale würmiano