

Ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee: biodiversità, funzioni ecosistemiche ed effetto dei cambiamenti climatici[§]

Diana M.P. Galassi^{1*}, Fabio Stoch¹, Barbara Fiasca¹,
Andrea Piermarocchi², Tiziana Di Lorenzo³

¹ Università degli Studi dell'Aquila, Dipartimento di Medicina Clinica, Sanità Pubblica, Scienze della Vita e dell'Ambiente, Via Vetoio, Coppito – 67100 L'Aquila

² Università degli Studi di Teramo, Facoltà di Giurisprudenza, Via R. Balzarini 1 – 64100 Teramo

³ Istituto per lo Studio degli Ecosistemi - ISE-CNR, Via Madonna del Piano, 10 – 50019 Sesto Fiorentino, Firenze

* Referente per la corrispondenza: dianamariapaola.galassi@univaq.it

Pervenuto l'8.2.2014; accettato il 19.3.2014

Riassunto

I GDE (*Groundwater Dependent Ecosystems*) sono ecosistemi la cui composizione in specie viventi e i cui processi ecologici sono condizionati più o meno direttamente dalle acque sotterranee e sono classificati sulla base del grado di dipendenza dalle acque sotterranee. Il presente contributo è finalizzato a fornire una descrizione di tali ecosistemi, con particolare riferimento ai GDE subsuperficiali (*Subsurface Groundwater Dependent Ecosystems* – SGDE) e a definire le minacce cui sono sottoposti per effetto dei cambiamenti climatici e di altri fattori sinergici che ne alterano la funzionalità. Nei SGDE manca la produttività primaria, stante l'assenza di luce, e le comunità sono composte da batteri, protisti e organismi animali (prevalentemente invertebrati). I cambiamenti climatici sono tra i fattori di maggior minaccia dell'integrità dei GDE. Il sovrasfruttamento della risorsa idrica sotterranea, le escavazioni in alveo, le pratiche agricole intensive con l'uso di fertilizzanti e pesticidi, lo scarico di reflui urbani e industriali, l'inquinamento da sostanze tossiche abusivamente interrate concorrono ad accrescere i rischi cui sono sottoposti i GDE.

Il concetto di adattamento ai cambiamenti climatici nei GDE contempla sia l'aspetto quantitativo e qualitativo della risorsa idrica sotterranea, sia la capacità di sostenere la biodiversità e i servizi ecosistemici che la stessa è in grado di offrire. Le misure di mitigazione dovrebbero considerare periodo, durata e quantità di acqua sotterranea emunta al fine di garantire, per gli acquiferi alluvionali, il contatto tra il corpo idrico superficiale e la falda ad esso sottesa e, per gli acquiferi carsici, il mantenimento della saturazione dei sistemi annessi capacitivi.

PAROLE CHIAVE: GDE / biodiversità / acque sotterranee / cambiamenti climatici / fattori sinergici

Groundwater Dependent Ecosystems (GDEs): biodiversity, ecosystem functioning and effects of climate change

The Groundwater Dependent Ecosystems (GDEs) are those ecosystems which depend on groundwater quality and quantity, and are commonly ranked on the basis of the degree of dependency on groundwater. This review is aimed at describing these ecosystems (with special emphasis on Subsurface Groundwater Dependent Ecosystems - SGDEs), and at assessing major threats of climate change and of synergistic factors which may alter the ecological functioning of these ecosystems. As primary productivity is missing in the SGDEs due to total darkness, communities are composed of bacteria, protists and animals (predominantly invertebrates). Climate change has detrimental effects on GDEs, along with groundwater withdrawal, excavations in the streambed, intensive agriculture with excessive use of fertilizers and pesticides, urban sewage, increasing pollution from illegal dumping of toxic substances. These activities determine loss of biodiversity and ecosystem services. Up to now the adaptation to climate change in GDEs has received poor attention, as groundwater quality and quantity need to be integrated with ecosystem ability to sustain groundwater biodiversity and related ecosystem services. Mitigation measures should consider period, duration and amount of groundwater exploited in order to ensure, for alluvial aquifers, the contact between the surface water body and the underlying aquifer, for karstic aquifers, the maintenance of water saturation of the annexed capacitive subsystems.

KEY WORDS: GDE / biodiversity / groundwater / climate change / synergistic factors

§ Insetto speciale *Stato attuale e tendenze evolutive negli ecosistemi di acque interne e di transizione in Italia*, a cura di Pierluigi Viaroli

INTRODUZIONE

L'acronimo GDE (*Groundwater Dependent Ecosystems*) indica ecosistemi la cui composizione in specie viventi e i cui processi ecologici sono condizionati più o meno direttamente dalle acque sotterranee (Armcanz/Anzecc, 1996). Hatton e Evans (1998) identificano 5 categorie di GDE in base al grado di dipendenza dalla quantità di acqua sotterranea: 1) ecosistemi completamente dipendenti, le cui comunità non sopravvivono anche cambiamenti anche lievi della quantità di acqua sotterranea; 2) ecosistemi altamente dipendenti, le cui comunità variano in composizione e struttura in risposta a cambiamenti moderati della quantità di riserva idrica sotterranea; 3) ecosistemi proporzionalmente dipendenti, le cui comunità subiscono cambiamenti proporzionali alle variazioni della quantità di acqua sotterranea, piuttosto che drammatici cambiamenti nel loro stato di salute, distribuzione e composizione; 4) ecosistemi opportunisticamente dipendenti, le cui comunità vivono in ambienti in cui l'acqua sotterranea svolge un ruolo significativo nei periodi siccitosi o alla fine della stagione secca; 5) ecosistemi non dipendenti, le cui comunità non dipendono in alcun modo diretto dalla disponibilità di acqua sotterranea (Hatton e Evans, 1998; Eamus e Froend, 2006; Eamus *et al.*, 2006; Bertrand *et al.*, 2012). Le prime due tipologie di GDE comprendono anche gli ecosistemi acquatici subsuperficiali, i cosiddetti SGDE (*Subsurface Groundwater Dependent Ecosystems*). Sono da considerarsi SGDE gli acquiferi saturi carsici, alluvionali e litoidi, l'ambiente carsico vadoso e l'epicarso, gli ambienti subsuperficiali di sorgente e del suolo (ambiente ipotelmorreico) e l'ambiente iporreico fluviale (FISRWG, 1998; Environment Agency, 2009) (Fig. 1).

Quest'ultimo rappresenta una zona tridimensionale di spessore e dimensione variabile, che convenzionalmente viene campionata a 50 cm in subalveo, costituita da sedimenti saturi di acqua sottostanti e laterali al letto fluviale (vedi Malard *et al.*, 2002 per le differenti tipologie di connessione fiume-falda).

I SGDE sono molto vulnerabili stante la stretta dipendenza dalla quantità e dalla qualità della risorsa idrica sotterranea (Commissione Europea, 2008), in particolare per ciò che attiene la componente biotica. Considerato che le specie sotterranee sono caratterizzate da notevole longevità e scarsa fecondità, se confrontate con le specie più prossime dal punto di vista filogenetico viventi in ambienti di superficie, le comunità sotterranee sono a bassa resilienza (Gibert *et al.*, 1994). Per questa ragione, un singolo evento di disturbo può determinare effetti irreversibili. Ad esempio, l'inquinamento di un acquifero o una significativa diminuzione della sua portata può indurre l'alterazione delle comunità acquatiche sotterranee sia in termini di ricchezza di specie che di abbondanza, in misura proporzionale alla sensibilità specie-specifica a uno o più fattori ambientali (Malard *et al.*, 1996, 1997; Iepure *et al.*, 2013). Le comunità sotterranee sono, inoltre, caratterizzate da bassa ridondanza funzionale, condizione che comporta, come conseguenza primaria, che la scomparsa di una sola specie può modificare la funzionalità dell'ecosistema e i servizi da esso svolti; tra tutti, il riciclo dei nutrienti e l'abbattimento del carico organico sia in un acquifero saturo, sia negli ambienti di interfaccia. Ne consegue che alcuni importanti processi di autodepurazione che hanno luogo nei SGDE, come ad esempio la denitrificazione, possono risultare gravemente, e talora irreversibilmente, compromessi.



Fig. 1. Esempi di GDE: a sinistra le sorgenti reolinnocrene del Fiume Pescara (Abruzzo), a destra il ruscello sotterraneo (SGDE) che scorre nelle grotte di Su Palu, in Sardegna (foto F. Stoch).

BIODIVERSITÀ E FUNZIONI ECOSISTEMICHE DEI GDE

Le acque sotterranee sono ecosistemi che ospitano un'elevata biodiversità di grande valore conservazionistico. Le comunità animali dei GDE sono costituite da una componente sotterranea (specie stigobie che compiono l'intero ciclo vitale in acque sotterranee) ed una superficiale (specie di superficie che penetrano, attivamente o passivamente, nelle acque sotterranee). Le specie stigobie (Fig. 2) costituiscono un gruppo *target* per la conservazione della biodiversità: di 17.000 specie animali d'acqua dolce europee (Fauna Europaea: www.faunaeur.org), circa il 15% è stigobia, con un tasso di endemismo di oltre il 90%. Tra gli stigobi più noti si annovera il proteo (*Proteus anguinus* Laurenti), anfibio presente in Italia solo in una ristretta area (circa 200 km²) del carso goriziano e triestino; ma la quasi totalità degli stigobi è costituita da invertebrati, come oligocheti, molluschi, crostacei e insetti (con una sola specie stigobia italiana, recentemente scoperta in Toscana). Tra questi, sono i crostacei il gruppo più ricco in specie e più abbondante in questi ambienti (Gibert *et al.*, 2009).

Il successo dei crostacei nella colonizzazione degli ambienti acquatici sotterranei è provato dal fatto che questo gruppo annovera interi ordini esclusivamente stigobi (come batinellacei e termosbenacei, copepodi gelielloidi). La stigofauna italiana è costituita, inoltre, da numerose specie di ostracodi, copepodi, isopodi, anfipodi, misidacei e decapodi che hanno areali di distribuzione estremamente ristretti. Questi invertebrati svolgono un ruolo cruciale nelle catene alimentari "troncate" (Gibert e Deharveng, 2002), cioè catene di detrito prive di produttori primari, attraverso l'ingestione della sostanza organica particolata e del

biofilm batterico. Molte specie acquatiche di superficie, tra cui gli stadi pre-imaginali di efemerotteri, plecoteri, tricoteri e ditteri, sono ospiti occasionali dei GDE, che fungono da rifugio dalla predazione (più intensa dell'ambiente bentonico superficiale) o da prolungati periodi di siccità o anche dalle piene imponenti dei corsi d'acqua. Nel periodo che trascorrono nei GDE, anche queste specie epigee intervengono nel riciclo dei nutrienti o entrano nelle catene alimentari sia come frammentatori della sostanza organica sia talvolta come predatori. Altre specie superficiali dipendono strettamente dall'apporto di acqua sotterranea, in virtù della costanza del regime termico e del grado di ossigenazione, per completare i loro cicli vitali: vari salmonidi endemici italiani, come la trota macrostigma (*Salmo macrostigma* Duméril) e quella marmorata (*Salmo trutta marmoratus* Cuvier), richiedono la circolazione di acqua sotterranea nelle zone di frega.

I servizi ecosistemici resi dai GDE possono quindi essere sintetizzati come segue:

1. alimentazione quantitativa – nei settori *upwelling* (di risalita di acque sotterranee) e *outwelling* (di apporto laterale delle stesse) – degli alvei fluviali;
2. stabilità termica e zona potenziale per il rifugio degli invertebrati bentonici di superficie e aree di riproduzione per alcuni pesci di interesse alieutico;
3. processi di autodepurazione, con particolare riferimento alla denitrificazione;
4. diluizione delle sostanze inquinanti, la cui efficacia è dipendente dalla quantità di acqua disponibile nei GDE;
5. conservazione della biodiversità più sensibile (ad esempio, fauna crenobionte, iporreobionte e stigobionte) in aree protette (e non), in funzione dell'integrità ecologica dei GDE.



Fig. 2. Esempi di crostacei stigobi: a sinistra un copepode (0,5 mm), al centro un ostracode (0,4 mm), a destra un anfipode (2,5 mm) (foto F. Stoch).

GRADO DI MINACCIA DI HABITAT E SPECIE: L'ASSETTO NORMATIVO

Esistono moltissime attività antropiche che stanno determinando, o hanno già determinato, gravi danni alla biodiversità dei GDE, compromettendone la funzionalità ecologica. Tra gli interventi che maggiormente danneggiano, talora irreversibilmente, questi ecosistemi si annoverano il sovrasfruttamento della risorsa idrica sotterranea, le regimazioni idraulico-forestali, le escavazioni in alveo, l'interramento delle risorgive e delle zone umide, le pratiche agricole intensive con l'uso di fertilizzanti e pesticidi, lo scarico di reflui urbani e industriali, il proliferare di inquinamento da sostanze tossiche abusivamente interrate. Queste interferenze alterano l'assetto ecologico degli acquiferi e degli ecosistemi superficiali che dipendono dalla quantità e qualità delle acque sotterranee, quali fiumi e torrenti, laghi e zone umide, causando ingenti perdite di biodiversità e annessi servizi ecosistemici e deteriorando, spesso irreversibilmente, la qualità della vita umana (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

L'interruzione del corridoio ecologico costituito dai rapporti acque sotterranee/acque superficiali e l'alterazione dei microhabitat, sia dal punto di vista chimico-fisico che fisiografico, si riflettono nell'estinzione delle specie più sensibili o in gravi minacce per molte specie sotterranee, causando ad esempio drammatiche cadute di abbondanza anche di specie nel passato ben rappresentate. Si possono verificare estinzioni o riduzioni della densità di popolazione sia delle specie stigobie, sia dei macroinvertebrati bentonici, dei pesci e delle piante che richiedono la presenza di falda affiorante.

A fronte di una tale situazione, l'art. 11 della Direttiva Quadro sulle Acque 2000/60/CE prescrive l'attuazione da parte degli Stati membri di una serie di "misure" che, a seguito di approfondite analisi economico-ambientali, garantiscano il raggiungimento degli obiettivi qualitativi di cui all'art. 4 e, più in generale, lo "stato ecologico" buono dei distretti idrogeografici di riferimento. Tuttavia si evidenzia come, pur nell'intento di impedire, limitare ed invertire le tendenze all'aumento delle emissioni inquinanti, ovvero proteggere, ripristinare ed impedire il deterioramento dei corpi idrici sotterranei, la norma sia priva di qualsiasi riferimento diretto ed inequivocabile agli obiettivi di qualità e conservazione dei GDE. Eppure il legislatore comunitario appare perfettamente consapevole della rilevanza ambientale di tali ecosistemi dipendenti, ove al ventesimo "considerando" della Direttiva 2000/60/CE esprime come: "Lo stato quantitativo di un corpo idrico sotterraneo può influire sulla qualità ecologica delle acque superficiali e sugli ecosistemi terrestri connessi a tale corpo idrico sotterraneo" oppure quando, analo-

gamente, all'undicesimo "considerando" della Direttiva sulle Acque Sotterranee 2006/118/CE recita: "Si dovrebbero stabilire criteri per individuare qualsiasi tendenza significativa e duratura all'aumento delle concentrazioni di inquinanti e per determinare il punto di partenza per l'inversione di tendenza, tenendo conto della probabilità di effetti negativi sugli ecosistemi acquatici associati o sugli ecosistemi terrestri che ne dipendono".

Si auspica che tale vuoto normativo, che si riflette di conseguenza anche a livello di legislazione nazionale, venga al più presto colmato (si veda Tomlinson *et al.*, 2007), anche alla luce del fatto che i cambiamenti climatici non vengono considerati, sebbene intervenano in maniera significativa nel ciclo idrologico, nei piani di gestione a scala di bacino con l'incremento della temperatura media dell'aria e alterazioni del regime pluviometrico (Wilby *et al.*, 2006).

Nonostante la loro importanza per la conservazione della biodiversità, solo alcuni GDE sono stati dichiarati habitat di interesse comunitario. Tra la fauna, solo il menzionato proteo è presente negli allegati II (come specie prioritaria) e IV della Direttiva Habitat (92/43/CEE). Purtroppo la biodiversità sotterranea è poco nota sia al legislatore che all'opinione pubblica; questa condizione è ignorata persino dai protocolli in uso per il monitoraggio biologico dei corpi idrici superficiali, come richiesto dalla 2000/60/CE (Tomlinson *et al.*, 2007; Hancock *et al.*, 2009; Tomlinson, 2011).

EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

I cambiamenti climatici sono tra i fattori di maggior impatto ambientale, ma le cui ripercussioni sui GDE sono ancora poco note. Essi hanno portato a gravi alterazioni del regime idrologico a varie scale spaziali (IPCC, 2007 a, b) e coinvolgono sia gli acquiferi, sia i corpi idrici superficiali che da essi dipendono, con drastica diminuzione delle portate nei lunghi periodi di siccità, cui si alternano periodi di intensa piovosità (Kløve *et al.*, 2011). Queste precipitazioni, piuttosto che rimpinguare la risorsa idrica sotterranea, erodono il suolo devegetato e determinano un intenso *runoff* e piene rovinose, che danneggiano gli habitat fluviali e le zone umide circostanti determinando la scomparsa dell'eterogeneità dei microhabitat e delle sequenze buche-raschi, nonché fenomeni di compattamento dei sedimenti fluviali. Il prodotto finale è l'alterazione della connettività verticale tra corpo idrico superficiale e falda sottostante, con conseguente perdita di biodiversità. Inoltre, una marcata diminuzione della risorsa idrica sotterranea, legata al cambiamento del ciclo idrologico indotto dai cambiamenti climatici, porta non solo ad una diminuzione della disponibilità idrica dell'acquifero ma, come conseguenza, anche ad un in-

cremento di concentrazione delle sostanze inquinanti nelle falde acquifere, con ripercussioni negative sulla qualità delle acque sia sotterranee sia superficiali ad esse connesse. Se gli acquiferi sono prossimi alla linea di costa, diventa sempre più frequente il verificarsi del fenomeno dell'intrusione salina, con conseguenze sulla delicata biodiversità stigobia delle acque dolci, dove solo le specie più tolleranti a variazioni consistenti di salinità riescono a sopravvivere (Di Lorenzo e Galassi, 2013). Vi è pertanto un'interazione notevole tra sovrassfruttamento della risorsa idrica sotterranea e cambiamenti climatici, con potenziamento degli effetti negativi già in atto (U.S. EPA, 2011). In chiave ecologica, Kløve *et al.* (2013) elencano le principali minacce sui GDE: 1) perdita di habitat; 2) perdita delle specie più sensibili a variazioni della temperatura (come la maggior parte delle specie crenobionti e stigobionti); 3) cambiamenti nella struttura e nella funzione dei GDE; 4) perdita dei servizi ecosistemici dei GDE.

In generale, si ritiene che la risorsa idrica sotterranea sia soggetta a un rischio minore, ma alcuni studi recenti rivelano che il cambiamento climatico ha già determinato cambiamenti nella portata degli acquiferi, cui si aggiunge anche una alterazione del regime termico (Gunawardhana e Kazama, 2012). In quest'ottica, non tutti gli acquiferi manifestano la stessa vulnerabilità. Acquiferi di piccole dimensioni sono più vulnerabili all'incremento di temperatura e a una diminuzione della portata; il livello dei nutrienti cambia con maggiore facilità e le risposte ecologiche vengono classificate come "catastrofiche" (Kløve *et al.*, 2013). Gli acquiferi più estesi oppongono mag-

giore inerzia ai cambiamenti climatici, e gli effetti del riscaldamento globale sono tamponati dalla maggiore quantità di acqua disponibile che riesce a mantenere la temperatura a valori confrontabili con quelli di 30-50 anni fa.

Scarsa informazione è disponibile sugli effetti dei cambiamenti climatici in ambiente iporreico (Fig. 3). La mancanza di una serie temporale robusta di dati chimico-fisici e biologici rende molto difficile misurare gli effetti dei cambiamenti climatici su tali GDE. Un significativo contributo emerge da un'analisi condotta sul bacino del fiume Rodano da Dehedin *et al.* (2013). Tale studio evidenzia che le comunità iporreiche hanno subito una drastica alterazione nella struttura e composizione in un periodo di 32 anni (1977-2010). La temperatura atmosferica ha mostrato un chiaro e significativo incremento da un valore medio annuale di 11,4°C a 14,4°C e, di riflesso, anche la temperatura media dell'acqua liberamente fluente in alveo ha subito un incremento da 10,5°C a 12,5°C, con l'intensificarsi dei periodi di secca totale. A scala di bacino, l'intensità dell'*upwelling* nell'alveo fluviale, come pure la connettività, si sono notevolmente ridotte. La risposta biologica è stata evidente: l'abbondanza totale degli invertebrati ha mostrato un netto decremento in ambiente iporreico, sia a -50 cm, sia a -100 cm in subalveo e la maggior parte degli stigobi sono scomparsi dall'iporreico subsuperficiale: è invece aumentata la diversità, con la netta dominanza degli stigobi sugli stigosseni, alle maggiori profondità in subalveo (-100 cm) dove le specie trovano una maggiore stabilità dei regimi idrico e termico.

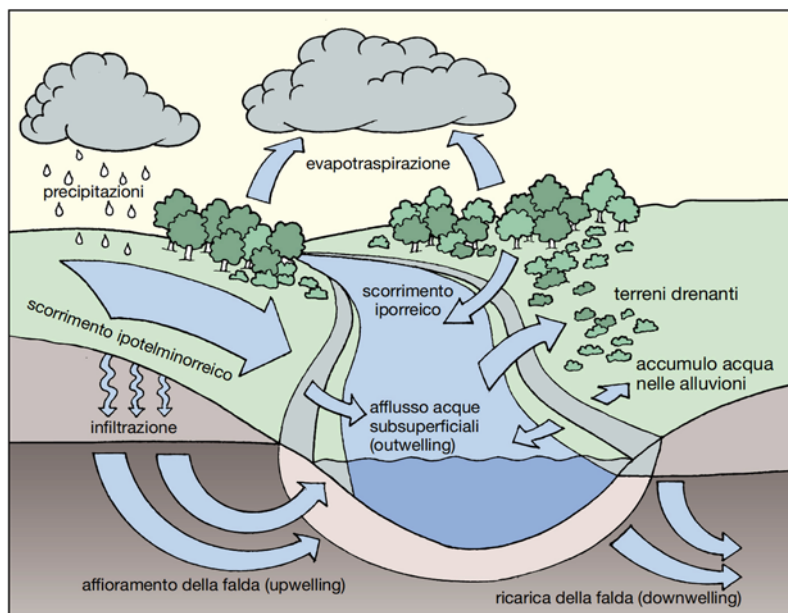


Fig. 3. Schema del rapporto tra fiume, falda e ambiente iporreico (da Stoch, 2008, modificato).

MISURE DI MITIGAZIONE E DI ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

L'adattamento agli effetti del cambiamento climatico nei GDE non ha sino ad oggi ricevuto idonea attenzione, aspetto conseguente alla scarsa conoscenza disponibile, alla difficile accessibilità agli ambienti sotterranei e, più in generale, all'assenza di efficaci politiche di gestione della risorsa idrica sotterranea. Le misure di adattamento e di mitigazione di tali effetti devono contemplare gli aspetti quali-quantitativi della risorsa idrica sotterranea, la capacità dei GDE di sostenere la biodiversità, sia sotterranea che superficiale, e i servizi ecosistemici che gli stessi sono in grado di offrire (Tomlinson, 2011). Le misure di mitigazione e di gestione che possono essere messe in atto sono numerose: a) implementazione di una idonea mappatura dei GDE a livello nazionale; b) individuazione di GDE "prioritari", ovvero più idonei a fungere da zone rifugiali, sia a scala evolutiva (serbatoi di relitti filogenetici e distribuzionali), che a scala ecologica (GDE che assicurino la sopravvivenza di specie-chiave ai fini del funzionamento dell'ecosistema); c) mantenimento della buona qualità chimica e della naturale classazione dei sedimenti fluviali di subalveo nel periodo di alveo asciutto, allo scopo di favorire la ricolonizzazione dei sedimenti fluviali nel periodo di alveo bagnato; d) valutazione della sensibilità al cambiamento climatico del biota e della persistenza di habitat-chiave che possano favorire la dispersione, la connettività e quindi la

ricolonizzazione; e) controllo dello sfruttamento degli acquiferi alluvionali e carsici (Clifton *et al.*, 2010).

Lo sfruttamento degli acquiferi a scopo agricolo e industriale agisce in concomitanza ai cambiamenti climatici nel determinare l'abbassamento del livello di falda e la conseguente perdita di connessione tra le acque superficiali e le acque sotterranee che le alimentano. Per gli acquiferi saturi, le misure di mitigazione e gestione dovrebbero pertanto essere focalizzate sulla preservazione della quantità della risorsa, al fine di garantire, per gli acquiferi alluvionali, il contatto tra il corpo idrico superficiale e la falda ad esso sottesa e, per gli acquiferi carsici, il mantenimento della saturazione idrica dei sistemi annessi capacitivi (Fig. 4).

Questi ultimi sono rappresentati dalla vasta rete di fratture che circondano il sistema conduttivo (le classiche condotte carsiche), con acque a bassa velocità di corrente, in cui si accumulano sostanza organica e sedimenti inorganici che vanno a costituire i microhabitat elettivi per la maggior parte delle specie stigobie. Il sistema annesso capacitivo ospita la gran parte della biodiversità sotterranea, al contrario del sistema conduttivo che pone di per sé limiti alla sopravvivenza delle specie, stante l'elevata velocità di corrente e l'assenza di habitat e microhabitat ove le specie possono trovare rifugio dal trasporto passivo nei periodi di piena dell'acquifero.

Ulteriori misure di mitigazione e gestione riguardano un controllo più efficace, da parte delle autorità com-

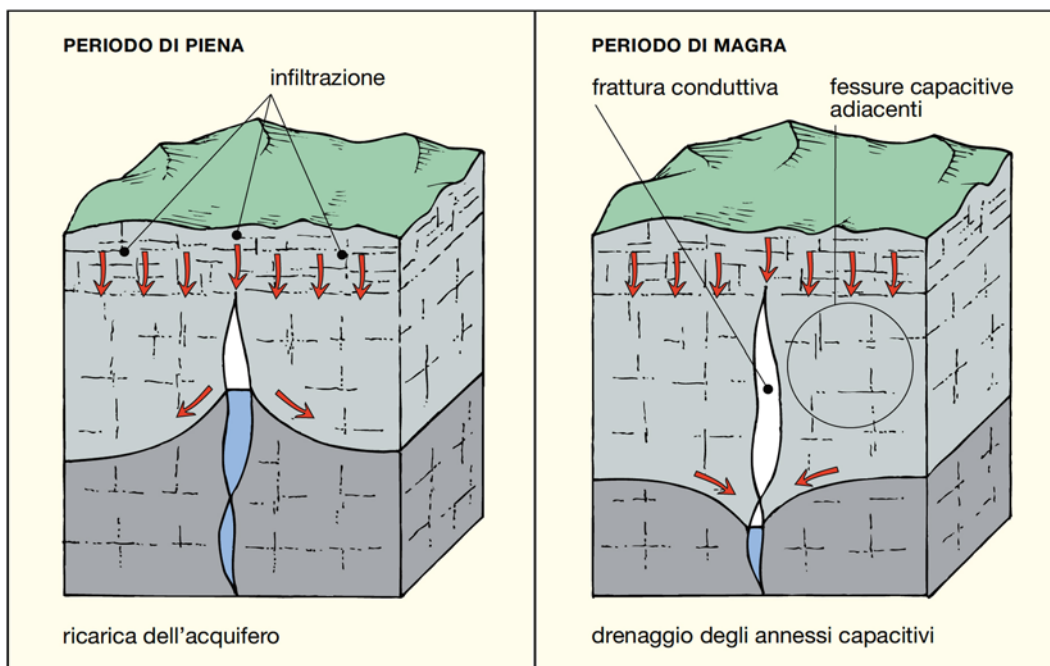


Fig. 4. Schema illustrante i rapporti, in piena e in magra, tra il sistema conduttivo e i sistemi annessi capacitivi. Sono questi ultimi che ospitano la maggiore biodiversità e svolgono numerosi servizi ecosistemici negli acquiferi carsici (da Stoch, 2008, modificato).

petenti, degli inquinanti che raggiungono gli acquiferi, sia quelli di origine agricola e urbana, sia quelli di origine industriale. Particolare attenzione va rivolta alle sostanze tossiche interrate in discariche, talora abusive. In questi ultimi casi, i processi di bonifica, troppo costosi, vengono raramente messi in atto, con perdita irreversibile della disponibilità di acqua sotterranea per ogni uso e la configurazione di una condizione di danno ambientale i cui effetti su tutti gli esseri viventi sono ben noti.

È, infine, evidente che occorre urgentemente cambiare la “visione” di quanto in generale si intende per sistemazione fluviale: gabbionate, cementificazioni, de-vegetazione spondale, frammentazione degli habitat acquatici alla scala di bacino, necessitano di una attenzione particolare nell’ambito della redazione dei Piani Stralcio di Difesa dalle Alluvioni (PSDA). Tali interventi, infatti, se non gestiti accuratamente, possono interrompere la continuità tra gli habitat acquatici,

compromettendo i processi di denitrificazione e abbattimento degli inquinanti di natura organica, alterando la classazione dei sedimenti fluviali e la connettività. Il miglioramento o il ripristino della connettività verticale (fiume-falda), trasversale (fiume-piana e fiume-zone umide ripariali e golenali) e longitudinale (dalla sorgente alla foce), renderebbero le comunità più resilienti, offrendo aree rifugiali nell’ambiente iporreico (Dole-Olivier, 2011) e mitigando gli effetti dei cambiamenti climatici su questa tipologia di GDE. Su alcuni di questi aspetti emergenti sta operando a livello nazionale e comunitario il progetto LIFE+ *AQUALIFE*, finanziato dall’Unione Europea.

Ringraziamenti

Il lavoro è parzialmente finanziato dal progetto LIFE12 BIO/IT/000231- *AQUALIFE - Development of an innovative and user-friendly indicator system for biodiversity in groundwater dependent ecosystems*.

BIBLIOGRAFIA

- Armcanz/Anzecc, 1996. *National Principles for the Provision of Water for Ecosystems, Occasional Paper SWR No 3*, Sustainable Land and Water Resource Management Committee, Subcommittee on Water Resources, Canberra.
- Bertrand G., Goldscheider N., Gobat J.-M., Hunkeler D., 2012. Review: From multi-scale conceptualization to a classification system for inland groundwater-dependent ecosystems. *Hydrogeology Journal*, **20**: 5-25.
- Clifton C., Evans R., Hayes S., Hirji R., Puz G., Pizarro C., 2010. Commonwealth of Australia, Canberra. Water and Climate Change: Impacts on groundwater resources and adaptation options. *Water Sector Board of the Sustainable Development Network of the World Bank Group*, **25**: 1-76.
- Commissione Europea, 2008. *Protezione delle acque sotterranee in Europa*. Luxembourg. Office for Official Publications of the European Communities, 35 pp. DOI 10.2779/86124.
- Dehedin A., Dole-Olivier M.-J., Piscart C., Mimoun D., Bornette G., Marmonier P., 2013. Long-term Changes and Drying Modality Affect Interstitial Assemblages of Alluvial Wetlands. *Wetlands*. DOI: 10.1007/s13157-013-0411-3
- Di Lorenzo T., Galassi D.M.P., 2013. Agricultural impact on Mediterranean alluvial aquifers: do groundwater communities respond? *Fundamental and Applied Limnology*, **182**: 271-282.
- Direttiva 92/43/CEE del Consiglio del 21 maggio 1992 relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali e della flora e della fauna selvatiche. *Gazzetta ufficiale n. L 206 del 22/07/1992*. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1992L0043:20070101:IT:PDF>
- Direttiva 2000/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2000, che istituisce un quadro per l’azione comunitaria in materia di acque. *Gazzetta ufficiale delle Comunità europee*, L 327, 22.12.2000. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:327:0001:0072:IT:PDF>
- Direttiva 2006/118/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 12 dicembre 2006 sulla protezione delle acque sotterranee dall’inquinamento e dal deterioramento. *Gazzetta ufficiale dell’Unione europea*, L 372, 27.12.2006. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:372:0019:0031:IT:PDF>
- Dole-Olivier M.-J., 2011. The hyporheic refuge hypothesis reconsidered: a review of hydrological aspects. *Marine & Freshwater Research*, **62**: 1281-1302.
- Eamus D., Froend R.H., 2006. Groundwater dependent ecosystems: the where, what and why of GDEs. *Australian Journal of Botany*, **54**: 91-96.
- Eamus D., Froend R., Loomes R., Murray B.R., Hose G.S., 2006. A functional methodology for determining the groundwater regime needed to maintain health of groundwater dependent ecosystems. *Australian Journal of Botany*, **54**: 97-114.
- Environment Agency, 2009. *The hyporheic handbook: a handbook on the groundwater-surface water interface and hyporheic zone for environment managers*. Science report SC050070, 265 pp. www.hyporheic.net/SCHO1009BRDX-e-e.pdf
- FISRWG - The Federal Interagency Stream Restoration Working Group, U.S., 1998. *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*. GPO Item no. 0120-A, 637 pp.

- Gibert J., Culver D.C., Dole-Olivier M.-J., Malard F., Christman M.C., Deharveng L., 2009. Assessing and conserving groundwater biodiversity: synthesis and perspectives. *Freshwater Biology*, **54**: 930-941.
- Gibert J., Deharveng L., 2002. Subterranean Ecosystems: A Truncated Functional Biodiversity. *BioScience*, **52**: 473-481. doi: [http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0473:SEATFB\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0473:SEATFB]2.0.CO;2)
- Gibert J., Stanford J.A., Dole-Olivier M.-J., Ward J.V., 1994. Basic attributes of groundwater ecosystems and prospects for research. In: Gibert J., Danielopol D.L., J.A. Stanford (eds.), *Groundwater Ecology*. Academic Press, Inc., San Diego: 7-40.
- Gunawardhana L.N., Kazama S., 2012. Statistical and numerical analyses of the influence of climate variability on aquifer water levels and groundwater temperatures: The impacts of climate change on aquifer thermal regimes. *Global and Planetary Change*, **86/87**: 66-78.
- Hancock P.J., Hunt R.J., Boulton A.J., 2009. Preface: hydrogeology, the interdisciplinary study of groundwater dependent ecosystems. *Hydrogeology Journal*, **17**: 1-3.
- Hatton T., Evans R., 1998. *Dependence of ecosystems on groundwater and its significance to Australia*. Canberra. CSIRO (Land and Water).
- Iepure S., Martinez-Hernandez V., Herrera S., Rasines-Ladero R., de Bustamante I., 2013. Response of microcrustacean communities from the surface-groundwater interface to water contamination in urban river system of the Jarama basin (central Spain). *Environmental Science and Pollution Research*. doi: <http://dx.10.1007/s11356-013-1529-9>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007a. Climate change 2007, impacts, adaptation and vulnerability. In: Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E. (eds.). *Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007b. *The physical science basis. Summary for policymakers contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Geneva.
- Kløve B., Ala-Aho P., Bertrand G., Gurdak J.J., Kupfersberger H., Kværner J., Muotka T., Mykrä H., Preda E., Rossi P., Uvo C.B., Velasco E., Pulido-Velázquez M., 2013. Climate Change Impacts on Groundwater and Dependent Ecosystems. *Journal of Hydrology*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037>
- Kløve B., Ala-aho P., Guillaume B., Boukalova Z., Ertürk A., Goldscheider N., Ilmonen J., Karakaya N., Kupfersberger H., Kvoerner J., Lundberg A., Mileusni M., Moszczynska A., Muotka T., Preda E., Rossi P., Siergieiev D., 'imek J., Wachniew P., Angheluta V., Widerlund A., 2011. Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends. *Environmental Science & Policy*, **14**: 770-781.
- Malard F., Plenet S., Gibert J., 1996. The use of invertebrates in ground water monitoring: a rising research field. *Ground Water Monitoring and Remediation*, **16**: 103-113.
- Malard F., Reygrobellet J.-L., Winiarsky T., 1997. Physico-chemical and biological dynamics of a sewage-polluted limestone aquifer. *Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie*, **82**: 507-524.
- Malard F., Tockner K., Dole-Olivier M.-J., Ward J.V., 2002. A landscape perspective of surface-subsurface hydrological exchanges in river corridors. *Freshwater Biology*, **47**: 621-640.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005. *Ecosystems and Human Well Being: Wetland and Water – Synthesis*. World Resources Institute, Washington, D.C.
- Stoch F. (ed.), 2008. *Le acque sotterranee*. Quaderni Habitat, Ministero dell'Ambiente, della Tutela del Territorio e del Mare e Museo Friulano di Storia Naturale, **20**: 1-158.
- Tomlinson M., 2011. *Ecological water requirements of groundwater ecosystems: a knowledge and policy review*. Waterlines Report, National Water Commission, Canberra.
- Tomlinson M., Boulton A.J., Hancock P.J., Cook P.G., 2007. Deliberate omission or unfortunate oversight: Should stygofaunal surveys be included in routine groundwater monitoring programs? *Hydrogeology Journal*, **15**: 1317-1320.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2011. *Aquatic ecosystems, water quality, and global change: challenges of conducting multi-stressor global change vulnerability assessments*. National Center for Environmental Assessment, Washington, DC; EPA/600/R-11/011F. Available from the National Technical Information Service, Springfield, VA, and online at <http://www.epa.gov/ncea>
- Wilby R.L. Orr H.G., Hedger M., Forrow D., Blackmore M., 2006. Risks posed by climate change to the delivery of Water Framework Directive objectives in the UK. *Environment International*, **32**: 1043-1055.