

La componente biologica nella valutazione delle acque sorgive: considerazioni sulla validità di questo indicatore dopo 25 anni di sperimentazione in Liguria

Marco Bodon^{1*}, Silvio Gaiter², Sara Costa³

¹ ARPAL, Direzione Scientifica, Via Bombrini 8 – 16149 Genova.

² ARPAL, Dipartimento di Genova, U.O. Territorio, Settore Ciclo delle Acque, Via Bombrini 8 – 16149 Genova.

³ OLPA, Via Malta 2/8 – 16121 Genova.

* Referente per la corrispondenza: marco.bodon@arpal.gov.it

Pervenuto il 24.2.2017; accettato il 15.5.2017

RIASSUNTO

Il macrobenthos delle acque superficiali correnti è noto essere un buon indicatore biologico per la valutazione dello stato di qualità ambientale; anche gli organismi bentonici di acque sorgive e sotterranee sono stati talvolta oggetto di indagini, non solo per rilevare il grado di compromissione delle acque, ma anche per altri aspetti idrogeologici o ambientali. In questi casi, però, le metodiche proposte sono generalmente complesse, in quanto basate su determinazioni tassonomiche approfondite. Fino ad ora dal punto di vista applicativo pochissimi indici biologici sono stati suggeriti per le acque sorgive o sotterranee; un metodo semplificato è stato proposto e applicato in Liguria, a partire dal 1990, per valutare il grado di compromissione delle acque sorgive, trarre informazioni sull'origine delle acque, e permettere una indicazione sulla vulnerabilità dell'ultimo tratto della falda e sulla violabilità del manufatto di captazione. Il metodo si basa sulla raccolta di macrobenthos e di sedimenti nelle sorgenti naturali o captate, all'esterno o all'interno delle opere di presa, con determinazione della componente biologica a livello di famiglia o genere o gruppo ecologico per il macrobenthos e con determinazione delle principali componenti biologiche che si depositano nel sedimento (thanatocenosi). Le valutazioni dedotte dall'esame della comunità campionata nei diversi microhabitat sorgivi fino ad oggi sono state piuttosto empiriche. Con il progredire delle indagini e il notevole numero dei campionamenti effettuati dal 1990 al 2015 (1138 campionamenti su 830 stazioni) è stato possibile implementare l'elaborazione dei dati e verificare le ipotesi enunciate in premessa. I risultati hanno portato alla formulazione di alcuni indici che, sebbene non esaustivi per tutti gli aspetti proposti, possono essere applicati per ricavare un giudizio più oggettivo. Questi indici presentano comunque alcune limitazioni sull'applicabilità e dovranno ancora essere sperimentati in altre realtà territoriali.

PAROLE CHIAVE: macrobenthos / sorgenti / captazioni / indicatori biologici / indici biologici

The biological component in the evaluation of spring waters: remarks about the validity of this indicator after 25 years of studies in Liguria

Macrobenthos of surface flowing waters is known to be a good biological indicator for the evaluation of the environmental quality. Also the benthic organisms living in springs and groundwaters have sometimes been investigated not only to evaluate the degradation level of water, but also to understand hydrogeological and environmental aspects. In these cases, however, the proposed methods are generally complex, because they are based on in-depth taxonomic determinations. Up to now, just few biological indexes have been proposed for springs and groundwaters from an applicative point of view. A simplified method has been proposed and applied in Liguria since 1990, to evaluate the degradation of spring waters, to retrieve information about the origin of waters and to have some information about both the vulnerability of the last part of the aquifer and the violability of the water intake plant. This method is based on macrobenthos and sediment sampling in different springs, both natural and captured, inside and outside water intake plants, with the identification of the biological components to family, genus or ecological group level for macrobenthos and of the principal biological components deposited into the sediment (thanatocoenosis). The evaluation deduced by the examination of the sampled communities in the different spring microhabitats has been rather empirical so far. With the progress of the investigations and the remarkable number of samples carried on between 1990 and 2015 (1138 samples on 830 sampling sites), it has been possible to implement the data elaboration and to verify the hypotheses stated above. Results have led to formulate some indexes which can be applied to obtain a more objective judgment, even if they are not comprehensive of every proposed aspect. However these indexes present some limitations on their applicability and they will have to be experimented into other geographical areas.

KEY WORDS: macroinvertebrates / natural springs / spring captures / biological indicators / biological indexes.

INTRODUZIONE

Il macrobenthos, noto per essere un buon indicatore per le acque superficiali interne, è una delle componenti biologiche attualmente al centro delle metodiche utilizzate per la valutazione dello stato di qualità ambientale (Dir. 2000/60/CE; D.Lgs. 152/06; D.M. 260/2010), in quanto costituito da comunità ricche e ben diversificate anche a livello di taxa di ordine superiore. Nelle sorgenti e soprattutto nelle acque sotterranee, invece, questa comunità è più povera; quindi, anche se gli organismi macrobentonici hanno il vantaggio di essere facili da campionare e da determinare a livello di genere/famiglia, non è così semplice ricavarne informazioni utili. Le comunità delle acque sotterranee e sorgive sono ancora poco studiate dal punto di vista applicativo, nonostante il potenziale interesse che rivestono come indicatori ambientali, in grado di valutare aspetti rilevanti quali l'origine delle acque, il loro livello di compromissione e il grado di isolamento della falda dal terreno superficiale o della captazione dall'ambiente esterno circostante. Le metodiche attualmente in uso per la classificazione delle acque sotterranee o sorgive si basano esclusivamente sui parametri fisico-chimici, eventualmente supportati dai parametri microbiologici. Ciò deriva sicuramente dalla complessità della comunità che colonizza questi ambienti, legata ai molteplici microhabitat e alle diverse caratteristiche delle sorgenti. Tali comunità sono caratterizzate da una bassa α -biodiversità e una alta β -biodiversità, in quanto, sebbene un buon numero di taxa colonizzi un'area geografica più o meno estesa, a livello locale sono presenti solitamente pochi taxa per ogni sorgente (Gibert *et al.*, 2009; Stoch e Galassi, 2010). Quasi tutti i metodi di valutazione richiedono, oltre ad un notevole sforzo di campionamento, anche determinazioni tassonomiche approfondite (a livello di specie) sia sul macrobenthos che sul meiobenthos, come, ad es. sui Copepodi (Di Lorenzo *et al.*, 2003a, 2003b), necessitando quindi l'intervento di specialisti.

Le sorgenti italiane sono, nel complesso, ancora poco studiate; solo negli ultimi tempi sono state approfondite le conoscenze, anche se limitate ad alcune aree geografiche (ad es., per il Trentino-Alto Adige Sambugar *et al.*, 2006; Cantonati *et al.*, 2007). Nonostante questi studi, dal punto di vista applicativo, pochissimi indici biologici sono stati suggeriti per le acque sorgive o sotterranee. Le captazioni modificano drasticamente l'ambiente naturale con la frequente distruzione del tratto epigeo; l'ambiente creato da una captazione diventa quindi paragonabile, a seconda delle caratteristiche, all'ultimo tratto della falda ipogea o al primo tratto dell'eucrenal. L'habitat sorgivo assume così una connotazione di habitat sotterraneo tanto più evidente quanto più la sorgente è isolata dall'ambiente esterno e la falda è protetta. Gli organismi della falda sotterranea hanno così la possibilità di ricolonizzare la scaturigine, mentre la

fauna delle acque superficiali tende a rarefarsi e persino a scomparire più la scaturigine diventa buia e isolata.

Un'accurata lettura della biocenosi a macroinvertebrati e della tanatocenosi (resti animali e vegetali), in base all'esperienza finora maturata, può permettere di ricavare informazioni utili sul livello di inquinamento, sull'origine delle acque, sul grado di protezione della falda nell'ultimo tratto di scorrimento e di isolamento del manufatto dall'ambiente esterno (Bodon e Gaiter, 1989; Baldini e Gaiter, 1990; Bodon e Gaiter, 1995; Gaiter e Baldini, 1995; Feletti e Gaiter, 1996; Gaiter e Feletti, 1999; Gaiter *et al.*, 2004; Grazioli, 2006).

La biocenosi può essere utilizzata come indicatore di:

- livello di inquinamento della falda, tramite la presenza/assenza/abbondanza di taxa sensibili e tolleranti; i taxa stigobi sono generalmente considerati organismi molto sensibili all'inquinamento o alterazione ambientale;
- origine delle acque, tramite la presenza/assenza/abbondanza di taxa di acque superficiali, crenobi e stigobi; nelle acque superficiali prevalgono gli insetti, mentre in acque sorgive o sotterranee prevalgono crostacei e molluschi crenobi o stigobi;
- violabilità della captazione dall'esterno, tramite la presenza/assenza/abbondanza di taxa epigei o sotterranei.

La tanatocenosi può essere utilizzata come indicatore di:

- vulnerabilità della falda nell'ultimo tratto di scorrimento, tramite la presenza/assenza/abbondanza di resti che indicano apporto dagli strati superficiali del terreno, come detrito di radici e nicchi di molluschi endogei;
- violabilità della captazione dall'esterno, tramite la presenza/assenza/abbondanza di resti che indicano apporti dall'esterno come il detrito fogliare, resti di artropodi terrestri e nicchi di molluschi epigei.

L'obiettivo di questo studio sulle sorgenti e captazioni è capire se è possibile trarre informazioni su inquinamento, origine delle acque e grado di isolamento mediante lo studio di queste componenti, senza ricorrere a determinazioni approfondite e se è possibile tradurre le osservazioni empiriche effettuate in 25 anni di sperimentazione in Liguria mediante un algoritmo che dia un giudizio sintetico per gli aspetti relativi a questa problematica.

MATERIALI E METODI

I rilievi oggetto del presente studio sono stati realizzati dal PMP dell'ASL 3 Genovese e successivamente dall'ARPAL del Dipartimento di Genova negli anni 1990-2015, tramite campionamenti effettuati in varie tipologie di sorgenti e acque sotterranee, principalmente nelle scaturigini captate per uso potabile, mediante la metodica riportata in Bodon e Gaiter (1995) e Gaiter *et al.* (2004). I rilievi biologici sono stati accompagnati

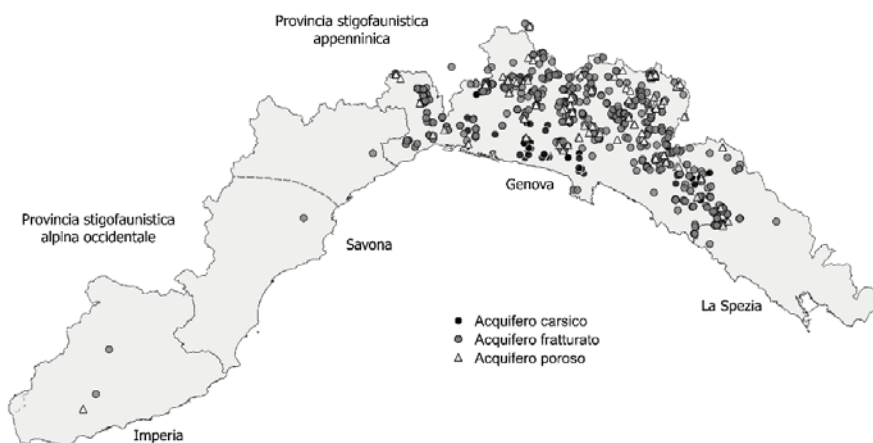


Fig. 1. Distribuzione delle stazioni campionate (sorgenti o emergenze assimilabili) in Liguria, con il tipo di acquifero relativo.

dalla raccolta dei dati ambientali (topografici, sull'area di salvaguardia, geologici, sui centri di pressione), dalle caratteristiche della captazione e del manufatto, dai parametri idrologici e dalle analisi fisico-chimiche e batteriologiche.

Sono state esaminate 830 stazioni, distribuite soprattutto in Liguria orientale nelle province di Genova e nell'alta Val di Vara in provincia di La Spezia, prevalentemente in acquiferi permeabili per fratturazione (71,5 %), secondariamente in acquiferi permeabili per porosità (19 %) e carsici (9,5 %) (Fig. 1).

Sulle stazioni sono stati effettuati 684 campionamenti fisico-chimici con ricerca dei principali parametri e 742 campionamenti batteriologici. Il numero complessivo di campionamenti biologici, effettuati sia in siti differenti di una stessa emergenza che in date diverse, ammonta a 1138. I campionamenti biologici, coadiuvati dal rilievo di parametri ambientali in situ (tipo di substrato, velocità della corrente, composizione della frazione organica,

grado di luminosità, volume del sedimento ecc.), sono finalizzati all'esame della componente macrobentonica e della tanatocenosi.

Il macrobenthos è stato campionato sia tramite raccolta diretta a vista che tramite l'ausilio di un retino immanicato, raccogliendo il sedimento dello strato superficiale. La classificazione degli organismi è stata effettuata sino al livello di Unità Sistematiche IBE (Fig. 2), con approfondimenti a livello di gruppi di specie per taxa facilmente identificabili dall'habitus e con significato ecologico differente; ad esempio *Alzoniella* stigobionte è facilmente distinguibile da *Alzoniella* crenobionte per l'assenza di occhi, carattere individuabile anche senza estrarre l'animale dalla conchiglia e *Proasellus* stigobionte si distingue da *Proasellus* di acqua superficiale per l'assenza di occhi e di pigmento (Fig. 3).

L'analisi sulla tanatocenosi è stata effettuata tramite il campionamento di circa 100-200 mL di sedimento, successivamente setacciato al fine di individuare e determinare le principali frazioni organiche di origine

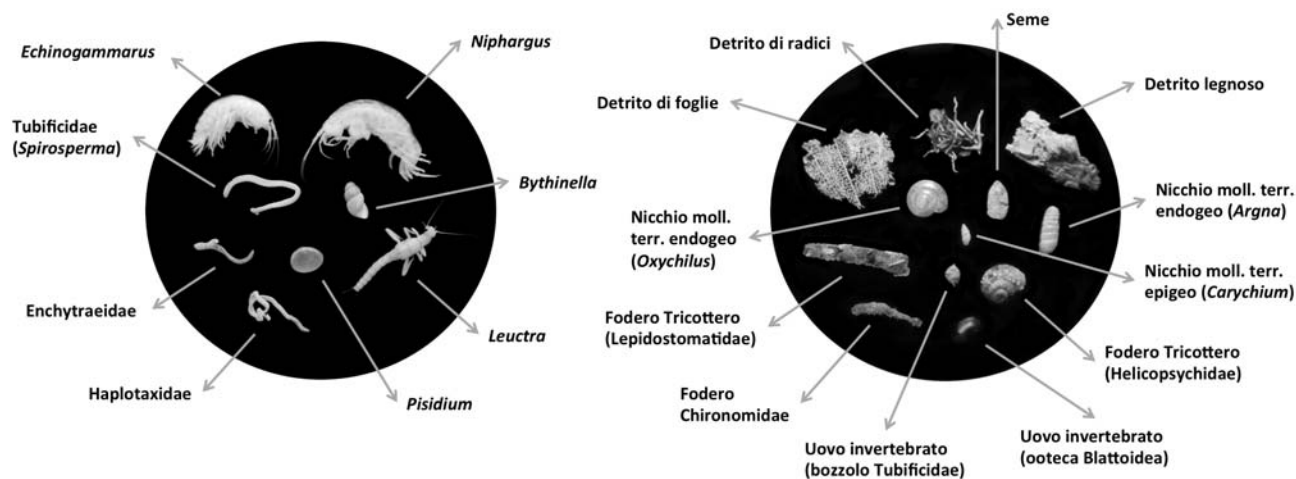


Fig. 2. Esempio di alcuni organismi della biocenosi (a sinistra) e di alcune componenti della tanatocenosi (a destra) presenti nelle sorgenti campionate.



Fig. 3. Esempio di organismi congenerici ma appartenenti a categorie ecologiche differenti, facilmente distinguibili dall'habitus: *Alzoniella crenobia* (A), *Alzoniella stigobia* (B), *Proasellus* di acque superficiali (C), *Proasellus stigobio* (D).

vegetale o animale (Fig. 2).

Per entrambe le componenti, biocenosi e tanatocenosi, viene riportato un giudizio di abbondanza. Per il macrobenthos il giudizio è espresso in numero di esemplari raccolti e in classi di frequenza in base al numero, all'intensità di campionamento e al volume di substrato raccolto, mentre per le componenti difficilmente numerabili (detrito vegetale o animale decomposto) è stata eseguita solo una stima in classi di frequenza. Tutti i dati sono infine archiviati in un data base relazionale.

Al fine di verificare l'ipotesi che esista una relazione tra la biocenosi e la tanatocenosi e gli aspetti oggetto di indagine, questi ultimi sono stati quantificati attribuendoli ad opportune classi di range ottenute dalla somma dei singoli punteggi per i seguenti parametri.

- *Parametri per il livello di inquinamento:*
 - pressioni calcolate in base al punteggio ottenuto dalla somma di punteggi parziali dei fattori antropici che gravitano nell'area di alimentazione delle sorgenti;
 - classe di qualità calcolata in base ai parametri fisico-chimici (D.Lgs. 152/99);
 - classe di qualità calcolata in base ai parametri batteriologici.
- *Parametri per l'origine delle acque:*
 - punteggio calcolato in base alle diverse situazioni campionate: sorgenti distanti dall'alveo di rivi attivi, sorgenti prossime all'alveo, sorgenti nell'alveo, captazioni miste (sorgenti e rivi), rivi sorgivi.
- *Parametri per la vulnerabilità dell'acquifero nell'ultimo tratto di scorrimento:*
 - punteggio calcolato in base al tipo di acquifero (poroso, fratturato, carsico), alterazione del substrato (roccia compatta o alterata) e litologia.
- *Parametri per la violabilità della captazione, ossia per il grado di protezione dall'ambiente esterno:*
 - punteggio calcolato in base al grado di protezione del manufatto, tipo di captazione della scaturigine, tipo di sito campionato e livello di luminosità.

Per capire quali possano essere i parametri ambientali che condizionano di più il popolamento macrobentonico e quali taxa sono legati a determinati parametri e risultano buoni indicatori, è stata applicata l'analisi canonica di corrispondenza (CCA), utilizzando il software Multi Variate Statistical Package (MVPS, versione 3.1).

Stabilita l'esistenza di una relazione significativa tra la biocenosi/tanatocenosi e il punteggio dei diversi parametri (violabilità, vulnerabilità, origine delle acque) è stato elaborato un indice utilizzando la metrica di un indice saprobico (Morpurgo, 1996).

L'indice viene quindi calcolato con la seguente formula:

$$I = \frac{\sum S \cdot G \cdot A}{\sum G \cdot A} \quad (\text{range } 1-5)$$

dove A rappresenta un valore semiquantitativo in base alla frequenza di ciascun taxon/resto (range 1-4); S il coefficiente di sensibilità di ciascun taxon/resto che rappresenta la classe di maggiore frequenza; G il coefficiente di peso di ciascun taxon/resto che descrive l'andamento della distribuzione, calcolato in base alla deviazione standard ottenuta dalla ripartizione in 5 classi. Valori bassi di S attestano organismi o resti di origine sotterranea o di ambiente più protetto, mentre valori alti di G sono relativi a migliori indicatori.

Successivamente si è proceduto a verificare la correlazione tra il punteggio e il valore dell'indice tramite una linea di tendenza (in genere polinomiale di secondo ordine) e il valore di R^2 . Affinché la correlazione venisse più significativa possibile sono state verificate le diverse condizioni e stabilite le seguenti soglie:

- il numero di taxa per ciascun rilievo deve essere maggiori di due;
- l'intensità di campionamento deve essere sufficiente o rilevante;
- la frequenza viene espressa utilizzando la progressione aritmetica;
- la scala dei pesi G viene espressa utilizzando la progressione geometrica.

I punteggi ottenuti sono stati suddivisi ripartendo i valori in cinque classi e per ogni classe di punteggio sono stati calcolati mediana, 25° e 75° percentile del relativo valore dell'indice. Infine, ad ogni intervallo del valore dell'indice tra le diverse classi è stata attribuita la relativa classe di qualità e il giudizio sintetico.

RISULTATI

Applicando la CCA sul macrobenthos e sui parametri quantificabili, compresi i punteggi sugli aspetti oggetto dell'indagine, risulta che circa la metà della varianza totale (54 %) è spiegata dai primi tre assi. Dal grafico ottenuto si evince l'importanza di più parametri che, agendo in direzioni diverse, condizionano il popolamento (Fig. 4).

Il punteggio di violabilità assume una discreta significatività sul primo asse, anche se molti altri fattori incidono, primo tra tutti la quota che è inversamente correlata con la temperatura. Il punteggio di violabilità diminuisce al diminuire della quota, poiché a quote inferiori generalmente aumenta la presenza di taxa stigobionti, probabilmente anche in relazione alle maggiori dimensioni del reticolo sotterraneo (Webb *et al.*, 1998).

Le classificazioni in base all'inquinamento risultano

scarsamente correlate ad eccezione della classificazione batteriologica che assume un certo significato sul secondo asse. Quest'ultima è direttamente correlata con la frazione organica e inversamente con la velocità della corrente. Al diminuire della velocità della corrente corrisponde un aumento della frazione organica che di conseguenza porta all'aumento della componente batterica. Comunque i rilievi effettuati presentano situazioni di alterazione antropica irrilevante o molto debole, che si collocano nelle migliori classi di qualità, per cui non è possibile elaborare un indicatore di alterazione. A questo scopo sarebbe necessario disporre di un maggior numero di situazioni con un certo livello di compromissione. Il punteggio di origine delle acque assume invece una certa significatività solo sul terzo asse, probabilmente perché i rivi campionati sono pochi e le classi di origine piuttosto ipotetiche. All'aumentare del punteggio di origine delle acque (acque superficiali) diminuiscono i valori di conducibilità e calcio che condizionano la presenza di alcuni organismi tipici di acque sotterranee, come crostacei e molluschi.

Alla luce dei risultati di questa analisi, nonostante la maggior parte dei taxa si distribuisca verso il centro del grafico, e quindi siano poco correlati con i diversi parametri, ve ne sono taluni localizzati in direzione di alcuni di essi, che quindi possono essere utilizzati come buoni indicatori. Ad esempio i più significativi sono: *Proasellus* anoftalmo e *Avenionia*, posizionati in alto a destra nel primo grafico, indicano la presenza di sorgenti

poco violabili; *Leuctra*, *Nemoura*, *Baetis*, e altri insetti, posizionati in alto a sinistra nei due grafici, indicano acque violabili e di origine superficiale; Lumbriculidae, Tubificidae e Naididae, posizionati in basso a destra nel primo grafico, indicano acque compromesse da un certo arricchimento organico e un maggiore livello batterico.

È necessario tenere presente che la comunità varia anche in relazione a fattori non quantificabili che possono essere biogeografici (nonostante l'area di studio limitata, alcuni organismi crenobionti e stigobionti presentano una distribuzione molto ristretta), litologici, tipo di acquifero, tipo di sorgente, ambiente campionato etc. Ad esempio, occorre porre particolare attenzione agli organismi vicarianti che, anche in un territorio ristretto come la Liguria, possono essere distribuiti in aree diverse. Ad esempio tra i Molluschi crenobionti *Graziana alpestris* (Frauenfeld, 1863) nelle Alpi Liguri vicaria *Alzoniella braccoensis* Bodon & Cianfanelli, 2004, presente nell'Appennino ligure ma con distribuzione assai ristretta; tra i molluschi stigobionti *Alzoniella* in Liguria centro-occidentale vicaria *Avenionia* in Liguria orientale. Esistono quindi anche aree non colonizzate da questi organismi (Fig. 5).

Per avere un'idea del peso che assumono i fattori non quantificabili e di come questi incidano sulla distribuzione delle comunità, è stata calcolata la differenza tra la frequenza in % nelle diverse classi rapportata a un singolo taxa mediante la somma del valore assoluto del logaritmo tra la % di presenza nelle classi / il numero

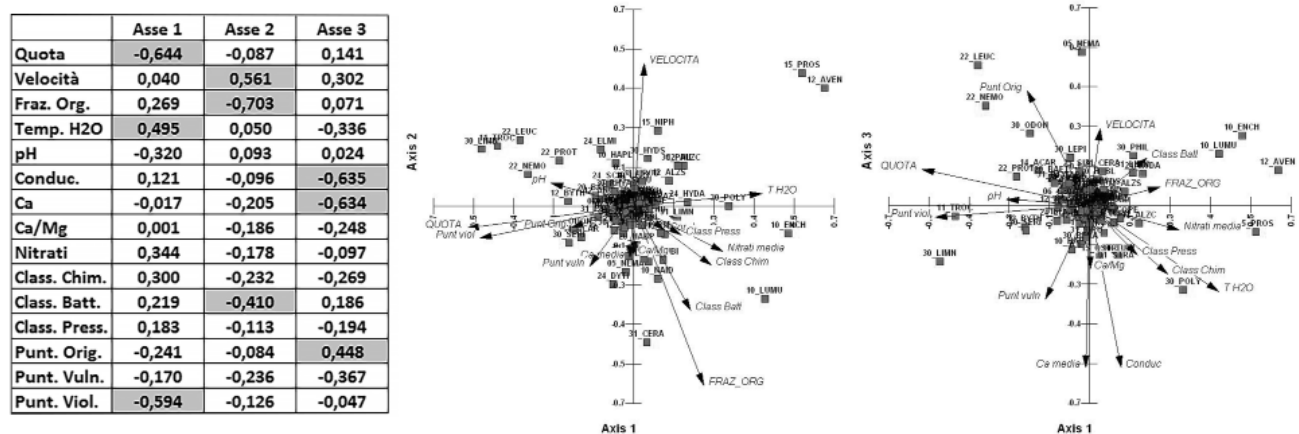


Fig. 4. Risultati dell'analisi CCA sui primi tre assi, valori dei parametri considerati (a sinistra) e grafici con la posizione dei taxa e dei parametri sui primi due assi (al centro) e sul primo e terzo asse (a destra).

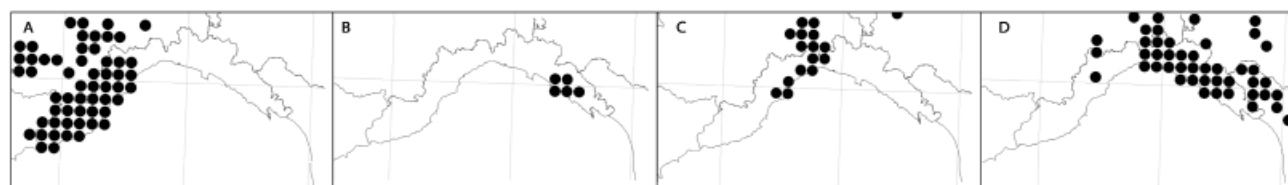


Fig. 5. Distribuzione di alcuni molluschi crenobionti (A-B) e stigobionti (C-D) in Liguria e nelle regioni limitrofe: *Graziana alpestris* (A), *Alzoniella braccoensis* (B), *Alzoniella* spp. (C), *Avenionia* spp. (D).

di taxa (range che varia da 0 a 13). Si riportano i valori risultanti da questa elaborazione, anche se questi sono solo indicativi poiché tendono ad aumentare nelle classi dove il numero di dati è più basso (Tab. I).

I parametri ambientali che più condizionano il popolamento in ordine di importanza sono risultati la distribuzione geografica (analizzata raggruppando le stazioni in bacini idrografici), la tipologia di sorgente e il sito campionato. In particolare le diversità più rile-

vanti tra le percentuali di presenza nelle diverse classi risultano essere, per i bacini geografici, tra i tirrenici di ponente alpino (dalla provincia di Imperia a Savona) e quelli di ponente (da Savona fino a Genova esclusa), tra i padani di ponente (compresi tra l'Orba e il Lemme) e lo Scrivia, e, tra i versanti adiacenti, tra i padani di ponente e i tirrenici di ponente. Per quanto riguarda la tipologia di sorgente, si ha la maggiore differenza tra quelle con assenza di ambiente esterno e le sorgenti

Tab. I. Differenza nella percentuale di frequenza dei taxa (media per taxa) tra le diverse classi considerate per i rispettivi parametri.

PARAMETRI AMBIENTALI	Min	Max	Classe di differenza max
Bacini adiacenti padani (Ponente-Levante)	0,79	2,78	Bac. Ponente - Bac. Scrivia
Bacini adiacenti tirrenici (Ponente-Levante)	1,47	5,34	Bac. Ponente alpino - Bac. Ponente
Bacini corrispondenti Padani-Tirrenici	0,77	2,28	Bac. Padani e Tirrenici di ponente
Acquifero: Carsico-Fratturato-Poroso	0,50	1,17	Carsico - fratturato
Tipologia sorgente: reocrena, eleocrena, assenza esterno	0,80	2,60	Assenza ambiente esterno - eleocrena
Portata	0,55	0,80	Tra classi estreme
Velocità corrente	0,44	0,74	Tra classi estreme
Quota	0,51	1,11	Tra classi estreme
Temperatura	0,77	1,26	Tra classi estreme
pH	0,50	0,8	Tra classi estreme
Rapporto Ca/Mg	0,49	1,57	Tra le serpentiniti e le litologie carbonatiche
Nitrati	0,48	1,69	Tra classi estreme
Velocità corrente	0,43	0,76	Tra classi estreme
Frazione organica	0,61	1,75	Tra classi estreme
Sito campionato: SC, SV, VA, VS, PA, SE	0,77	3,34	Tra scaturigine con vasca e permeazioni adiacenti

INDICATORI			
Inquinamento fisico-chimico		0,77	Tra le sole prime 2 classi
Inquinamento batteriologico	0,57	0,82	Tra classi estreme
Inquinamento pressioni	0,86	1,84	Tra classi estreme
Origine acque	0,96	4,04	Tra acque miste e rivi
Vulnerabilità	0,47	0,87	Tra classi estreme
Violabilità	0,72	1,30	Tra classi estreme

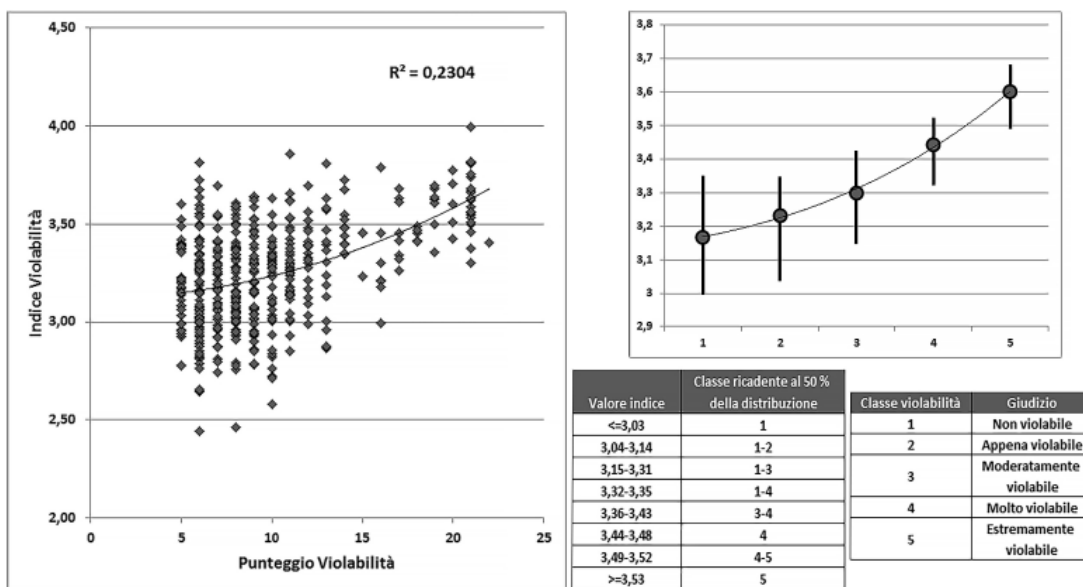


Fig. 6. Correlazione tra il punteggio di violabilità e l'indice di violabilità sul macrobenthos (a sinistra), valore mediano e intervalli (25° e 75° percentile) dei valori dell'indice per ciascuna classe di punteggio (a destra in alto) e giudizio relativo in relazione ai valori dell'indice (a destra in basso).

Tab. II. Organismi buoni indicatori per le tematiche considerate in base ai coefficienti di sensibilità (valori di S bassi in relazione all'origine sotterranea, vulnerabilità o violabilità bassa, in chiaro; valori alti in relazione a origine superficiale, vulnerabilità o violabilità alta, in scuro) e di peso (peso G alto per buoni indicatori).

Indicatori	S	G	S	G	S	G
	origine	origine	vulnerabilità	vulnerabilità	violabilità	violabilità
	S: 1-2,5; 4-5	G 4-5	S: 1-2,5; 3,5-5	G 4-5	S: 1-2,5; 4-5	G 3-4-5
BIOCENOSI						
<i>Alzoniella</i> (crenobionte)	1,42	5				
<i>Avenionia</i>	2,21	4			2,33	3
Polycentropodidae	2,16	4			2,42	3
<i>Proasellus</i> (stigobionte)	2,20	4				
Haplotaxidae	2,37	4				
<i>Baetis</i>	4,56	5			4,34	4
<i>Ecdyonurus</i>	4,71	5				
<i>Protonemura</i>					4,31	4
Dytiscidae	4,18	4				
Limoniidae	4,03	4				
Dixidae	4,61	4				
Ptychopteridae	4,14	4				
Lepidostomatidae					4,14	3
TANATOCENOSI						
Alge					3,65	4
Muschi					3,51	3
Nicchi <i>Toffolettia</i>			4,44	4		
Nicchi <i>Alzoniella</i> (crenobionte)			1,76	5		
Nicchi <i>Avenionia</i>					2,45	3
Nicchi <i>Galba</i>					3,60	4
Nicchi <i>Argna</i>			4,26	5		
Nicchi <i>Discus</i>			2,29	4		
Nicchi <i>Retinella</i>			2,30	5		
Nicchi <i>Oxychilus</i>					2,46	4
Foderi Chiromomidi					3,74	3
Foderi Tricotteri			2,34	4		
Foderi Limnephilidae					3,67	3
Foderi Odontoceridae			2,44	4		
Detrito animale			2,31	4		

Acque sotterranee
Acque superficiali

Falda protetta
Falda vulnerabile

Sorgenti non violabili
Sorgenti violabili

eleocrene; per i siti campionati tra quelli rappresentati da vasche a valle della captazione e le permeazioni adiacenti, esterne all'opera di presa.

Nella costruzione dell'indice, ad esempio, per quanto riguarda la relazione tra l'indice di violabilità della biocenosi e il punteggio di violabilità, la correlazione (R^2) e i coefficienti dell'equazione sono risultati sempre ampiamente significativi (p -value = 0,000), anche se le classi dell'indice presentano una notevole escursione nei rispettivi valori, per cui le indicazioni ottenibili non sono sempre precise, soprattutto nelle classi intermedie (Fig. 6).

Anche se per alcuni aspetti non è possibile ricavare un indice affidabile, sulla base del punteggio di sensibilità S e del peso G, è possibile individuare alcuni organismi/resti che sono comunque buoni indicatori per gli aspetti trattati (Tab. II).

Per quanto riguarda la biocenosi, gli indicatori di origine delle acque sono stati individuati selezionando i

taxa aventi un coefficiente di sensibilità compreso tra 1 e 2,5 per gli organismi di acque sotterranee e tra 4 e 5 per gli organismi di acque superficiali e un peso G compreso tra 4 e 5, mentre gli indicatori di violabilità della captazione sono stati individuati selezionando i taxa aventi un coefficiente di sensibilità compreso tra 1 e 2,5 per le captazioni non violabili e tra 3,5 e 5 per le captazioni violabili e un peso G compreso tra 3 e 5. Da questa analisi risulta che soprattutto gli insetti sono buoni indicatori sia di acque di origine superficiale che di sorgenti violabili. Analogamente è stata analizzata la tanatocenosi per individuare indicatori di vulnerabilità della falda e violabilità della captazione. Per quanto riguarda la vulnerabilità della falda sono stati individuati i taxa aventi un coefficiente di sensibilità compreso tra 1 e 2,5 per le captazioni non vulnerabili e tra 3,5 e 5 per quelle vulnerabili e un peso G compreso tra 4 e 5. Da questa analisi si può vedere come i nicchi di molluschi

endogei, ad es. *Argna*, siano ottimi indicatori di falde vulnerabili. Infine, per quanto riguarda la violabilità della captazione in base alla tanatocenosi sono stati individuati i taxa aventi un coefficiente di sensibilità compreso tra 1 e 2,5 per le captazioni non violabili e tra 3,5 e 5 per le captazioni violabili e un peso G compreso tra 3 e 5. Da questa analisi si nota come i resti di vegetali, ad esempio alghe e muschi e i foderi di insetti, sono buoni indicatori di captazioni violabili mentre i nicchi di molluschi stigobi o endogei (*Avenionia* e *Oxychilus*) sono buoni indicatori di captazioni più protette.

CONCLUSIONI

La biocenosi/tanatocenosi delle sorgenti presenta comunità diversificate e variabili che dipendono da molteplici parametri ambientali e antropici e che si relazionano con difficoltà agli aspetti oggetto dell'indagine. Nonostante la complessità di questo ambiente peculiare è stato possibile elaborare i seguenti indici ed indicatori:

- origine delle acque, valutata in base ai taxa macrobentonici che sono risultati i migliori indicatori;
- vulnerabilità della falda nell'ultimo tratto di scorrimento, valutata in base all'indice di vulnerabilità riferito alle componenti della tanatocenosi;

BIBLIOGRAFIA

Baldini I., Gaiter S., 1990. Possibili metodologie di valutazione della "vulnerabilità" delle acque sorgive e proposte preliminari per la formulazione di "gradienti di rischio igienico". *Rivista Italiana d'Igiene*, **50** (5-6): 232-246.

Bodon M., Gaiter S., 1989. Considerazioni sul popolamento macrobentonico delle acque sorgive. *Biologia Ambientale*, **3** (2): 5-12.

Bodon M., Gaiter S., 1995. Nuovi criteri di valutazione, basati sulla componente biologica, per le captazioni di acque destinate al consumo umano. *Biologia Ambientale*, **9** (1): 5-17.

Cantonati M., Bertuzzi E., Spitale D., 2007. The spring habitat: biota and sampling methods. *Monografie del Museo Tridentino di Scienze Naturali*, **4**: 1-350.

Di Lorenzo T., De Laurentiis P., Galassi D.M.P., 2003a. L'Indice di Protezione Naturale (IPN): nuovo metodo per la valutazione della vulnerabilità di sorgenti carsiche captate per uso potabile. *Biologia Ambientale*, **17** (2): 19-29.

Di Lorenzo T., De Laurentiis P., Galassi D.M.P., 2003b. L'inferenza biologica nella valutazione del grado di protezione naturale di sorgenti carsiche. *Thalassia Salentina*, **26**, suppl.: 241-248.

Feletti M., Gaiter S., 1996. Appunti sulle comunità biologiche delle acque sotterranee. *Biologia Ambientale*, **10** (4): 5-20.

Gaiter S., Baldini I., 1995. Metodi investigativi e analitici atti a valutare lo stato di protezione e i rischi igienici di piccoli acquedotti approvvigionati da acquiferi montani nell'Appennino ligure: impostazione e criteri operativi. Atti del 2° Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee: metodologie, tecnologie e obiettivi. Nonantola (MO), 17-19/5/1995; *Quaderni di Geologia Applicata*, Pitagora Ed., **3**: 369-383.

- violabilità della captazione, valutata in base all'indice di violabilità riferito ai taxa della biocenosi.

I dati in questo momento disponibili hanno permesso di individuare sia buoni taxa indicatori per gli aspetti trattati, sia di calcolare gli indici di vulnerabilità della falda e di violabilità della captazione. Questi ultimi danno un giudizio abbastanza affidabile se il valore che si ottiene si colloca verso gli estremi della scala (1-5), mentre rimane incerto se il valore si attesta verso il centro del range.

Il presente lavoro, che rappresenta una novità nel panorama degli studi sulle acque sotterranee, sarà implementato con ulteriori approfondimenti al fine di migliorare l'affidabilità di questi indici, affinché possano essere utilizzati dai tecnici ambientali per l'applicazione di strumenti standard di analisi per questi ecosistemi, ancora poco conosciuti ma di estrema importanza per la buona qualità ambientale e la salute umana.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano tutti gli operatori che hanno partecipato ai campionamenti nelle sorgenti liguri e, in particolare, Daniela Rocca, Valentina Grazioli, Rosanna Bruzzone, Elena Rizzi, Serena Amabene, Giorgio Gariglio, e Fabio Stoch per i suggerimenti relativi all'analisi statistica multivariata.

Gaiter S., Feletti M., 1999. Nuovi indicatori di acque di falda: i metazoi. In: Volterra L., Aulicino F.A., *Acque di falda: stato dell'arte delle conoscenze in Italia*. Rapporti ISTISAN 99/32: 15-28.

Gaiter S., Bodon M., Rocca D., 2004. Applicazione della metodica di indagine biologica, basata sulla fauna bentonica e sulla componente organica del sedimento, in acque di sorgente ed emergenze assimilabili. *Biologia Ambientale*, **18** (2): 31-47.

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.

Grazioli V., 2006. *Comunità macrobentoniche delle sorgenti dell'Appennino Ligure - Influenza dei parametri ambientali sulla struttura dei popolamenti*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Genova, Corso di laurea in Scienze dei Sistemi Naturali, a.a. 2004-2005, 131 pp.

Morpurgo M., 1996. Descrizione sintetica del saprobienindex. *Biologia Ambientale*, **10** (2-3): 16-29.

Sambugar B., Dessì G., Sapelza A., Stenici A., Thaler B., Veneri A., 2006. *Fauna sorgentizia in Alto Adige*. Provincia Autonoma di Bolzano, 372 pp.

Stoch F., Galassi D.M.P., 2010. Stygobiotic crustacean species richness: a question of numbers, a matter of scale. *Hydrobiologia*, **653**: 217-234.

Webb D.W., Wetzel M.J., Reed P.C., Phillippe L.R., Young T.C., 1998. The macroinvertebrate biodiversity, water quality, and hydrogeology of ten karst springs in the Salem Plateau Section of Illinois, USA. In: Botosaneanu L. (Ed.), *Studies in crenobiology. The biology of springs and springbrooks*: 39-48.