

Lo svaso della diga di Mollaro (Provincia di Trento): stima dell'impatto con l'approccio exergetico

Maurizio Siligardi

Libero Professionista. Via Solteri, 43/3 – 38121 Trento; e-mail: m.siligardi@gmail.com

Pervenuto il 22.1.2021; accettato il 1.3.2022

Riassunto

La stima dell'impatto ambientale su un corso d'acqua si basa prevalentemente sulla quantificazione dello stress subito dall'ecosistema fluviale. Il presente lavoro, prendendo in esame gli effetti derivanti dallo svaso della diga di Mollaro (TN), si prefigge di indicare un metodo alternativo per valutarne l'incidenza: poiché i metodi ufficiali utilizzati per valutare la qualità di un ambiente acquatico risultano spesso deboli e inadeguati per lo scopo indicato, si è optato per la verifica del mantenimento della somiglianza e per la definizione della diversità della comunità macrobentonica attraverso indici specifici e, soprattutto, si è cercato di verificare il processo di perdita e riacquisto dell'energia di tale comunità, o meglio, di quantificare il suo contenuto di exergia. Tale approccio, con tutti i limiti imposti da una applicazione prototipale, si è mostrato efficace per stimare il livello di stress dell'ecosistema e la sua capacità di ripresa nel tempo.

PAROLE CHIAVE: stima stress da svaso / exergia del benthos / stima del disturbo ambiente fluviale

The emptying of the Mollaro dam (Province of Trento): estimate of the impact with exergetic approach

The assessment of the environmental impact on a stream is mainly based on quantifying the stress in the river ecosystem. The present work, considering the effects deriving from the outflow of water for the emptying operations of the dam of Mollaro (TN), aims to indicate an alternative method to evaluate its incidence: since the official methods used to evaluate the quality of an aquatic environment are often weak and inadequate for the purpose indicated, we have opted for the verification of similarity and diversity of the macrobenthic community through specific indices and, above all, we have tried to verify the process of loss and recovery of the energy of macrobenthic community, or rather, of quantify its exergy content. This approach, with all the limits imposed by a prototype application, has resulted to be efficient to evaluate the stress level of the ecosystem and its resilience over time.

KEY WORDS: estimating an stress dam discharges / exergy of benthos / evaluation of impact on rivers

INTRODUZIONE

Lo svaso delle dighe, sebbene sia regolamentato da apposita normativa, solleva, per ogni caso a sé stante, problematiche relative all'inevitabile impatto sugli ecosistemi fluviali. È risaputo da tempo (Cordone e Kelley, 1961; Hogg e Norris, 1991; Hynes, 1970) che l'eccesso di sedimenti sospesi provoca soprattutto cambio della morfologia di fondo con scomparsa di habitat (Espa *et al.*, 2016) nonché perdita di ricchezza in taxa e biodiversità sulla comunità dei macroinvertebrati (Wood e Armitage, 1997; Doretto *et al.*, 2018; Doretto *et al.*, 2021; Crosa *et al.*, 2010). In genere l'approccio seguito si avvale delle metodologie dispo-

nibili basate sullo studio delle comunità acquatiche, come IBE (Ghetti, 1997), STAR-ICM (Buffagni, 2008) o NISECI (ISPRA, 2017), che non sempre consentono di effettuare valutazioni inoppugnabili per difficoltà intrinseche nei metodi stessi. Ogni ecosistema fornisce all'uomo diversi Servizi Ecosistemici (S.E.). Tra i vari ecosistemi, il fiume è quello che svolge più funzioni di servizio in quanto è un collettore di bacino che risente delle problematiche di un vasto territorio.

Tra i tanti S.E. inerenti la complessità dell'ecosistema fiume ricordiamo, in questo contesto, la capacità di un tratto di rielaborare la sostanza organica e di

trasformarla in energia biochimica utilizzabile come lavoro (movimento), riproduzione, sostanza di riserva e calore. Queste attività consumano energia aumentando l'entropia del sistema e per questo motivo c'è bisogno di continuo rifornimento dall'esterno (CPOM, FPOM, DOM ed energia solare per gli autotrofi). Questo processo di rielaborazione è conosciuto come *spiralling*, ovvero la semplificazione dei passaggi di una molecola di nutriente dal comparto biota al comparto acqua e di nuovo nel comparto biota in un ambiente dinamico, dove la corrente incide sulla forma ciclica della rielaborazione configurandola come, appunto, una spirale (Allan e Castillo, 2007).

L'exergia di un sistema è la misura dello scostamento dall'equilibrio termodinamico con l'ambiente e rappresenta la massima capacità di energia per svolgere un lavoro utile, mentre il sistema procede verso l'equilibrio con l'irreversibilità dell'entropia a spese dell'exergia.

Di per sé, l'exergia totale di un ecosistema è una misura della variazione nel contenuto di entropia dall'equilibrio allo stato attuale (Steinborn, 2000; Kanoglu, 2008). Lo sviluppo e il mantenimento della condizione degli ecosistemi lontana dall'equilibrio sono dovuti allo stoccaggio costante di energia libera in strutture organiche complesse, bio-sintetizzate da semplici composti inorganici. Di conseguenza, l'exergia totale di un ecosistema riflette effettivamente l'accumulo di biomassa nel sistema, indipendentemente dalla distribuzione della materia biogenica tra i componenti dell'ecosistema. La misura di exergia in ecologia prevede anche un fattore per stimare la "complessità" del sistema (Silow, 2004).

L'exergia relativa alla biomassa totale o exergia strutturale (stEx) misura la possibilità dell'ecosistema di accettare e utilizzare flussi esterni di energia. L'exergia strutturale rimane a livello costante quando i composti alloctoni possono essere metabolizzati dalle dinamiche ecosistemiche, ma quando la sostanza aggiunta non è ciclizzabile, tossica o in concentrazioni troppo elevate, l'exergia strutturale diminuisce, evidenziando l'inadeguatezza dell'ecosistema di adattarsi a tale situazione e, di conseguenza, l'irreversibilità dei mutamenti delle dinamiche funzionali nell'ecosistema, con perdita di efficacia resiliente (Silow, 1997, 1998, 2006).

Tale processo è attivato dal contenuto di energia interna e perciò dall'ammontare della exergia presente e disponibile: maggiore sarà l'exergia, più efficiente sarà il sistema nella sua funzione di resilienza intesa come possibilità di assorbire eventuali stress limitati nel tempo e nello spazio, quindi sarà maggiore il Servizio Ecosistemico prodotto.

Nel presente lavoro si tenta di far emergere eventuali stress a carico delle comunità macrobentoniche non evidenziabili con i metodi ufficiali della normativa, con lo scopo di verificare l'effettiva validità degli strumenti di valutazione usati, nonché individuarne altri più idonei.

MATERIALI E METODI

Area di studio

Il presente lavoro prende in esame gli effetti dello svaso della diga di Mollaro, posta sul fiume Noce (Prov. di Trento), mediante uno svuotamento graduale dell'invaso che è durato dal 11 marzo al 24 marzo 2019. Il fiume Noce, affluente dell'Adige, è interessato da varie opere di sbarramento per la produzione idroelettrica (Fig. 1).

Lo svaso è stato effettuato per la sostituzione delle paratoie di scarico dettata da motivi di sicurezza. La diga di Mollaro dà origine a un bacino di circa 2,3 mln di m³ alimentato a regime giornaliero, oltre che dalle acque del Noce, dallo scarico della centrale di Taio.

A seguito dello svaso, provocato con l'apertura delle paratoie di fondo, sono state immerse ingenti quantità di fanghi, che hanno interessato un lungo tratto del fiume Noce che possiamo dividere in due sub-tratti: il primo va dalla diga di Mollaro allo sbarramento della Rocchetta, il secondo è posto a valle dello sbarramento della Rocchetta. L'area di studio comprende il tratto del Noce che scorre nella Piana Rotaliana, dallo sbarramento della Rocchetta alla località La Rupe (Fig. 2).

Lo sbarramento della Rocchetta non può essere considerato come una diga in quanto è stato realizzato per evitare che la stretta gola agisse come imbuto in pressione causando danni alla piana Rotaliana. Lo stesso manufatto è dotato di un inghiottitoio di superficie per il deflusso normale dell'acqua e una turbina verticale a lato per uno sfruttamento idroelettrico per poi svasare nell'alveo ai piedi dello sbarramento. Quindi eventuali torbide passano direttamente a valle dello sbarramento creando impatto all'ecosistema.

L'area di studio comprende due tratti oggetto del monitoraggio biologico sugli effetti dello svaso. Il primo (N3) compreso tra lo sbarramento della Rocchetta e il ponte delle Fusine (a monte dello scarico della centrale idroelettrica), il secondo (N4) a valle dello scarico fino a loc. La Rupe. Nei due tratti sono state fatte campagne di indagine *ante operam*, il 23 febbraio 2019, e *post operam*, il 30 marzo, 11 maggio e 30 luglio, cioè 35, 70 e 147 giorni dopo lo svaso.

Trattamento dei dati

I dati utilizzati, tratti dalla relazione Dolomiti Edison Energy (novembre 2019), si basano sullo studio della comunità di macrobenthos (Metodo IBE; Ghetti, 1997) e sull'analisi della consistenza della comunità ittica intesa come specie, numerosità, peso e lunghezza dei diversi individui ittici raccolti con elettrostorditore.

La relazione sintetica del lavoro mette in luce che non sono stati rilevati elementi sufficienti per valutare lo stress ambientale, sia sulla comunità bentonica che ittica.

Per quanto riguarda il macrobenthos, emerge che la qualità biologica non sembra subire stress e i giudizi

sono di ambiente non inquinato (I classe di Qualità) anche dopo lo svaso. Ciononostante, si è voluto verificare se lo studio dell'exergia del sistema fosse in grado di evidenziare impatti non rilevati dall'IBE, utilizzando i dati grezzi per ottenere informazioni più adeguate.

L'approccio utilizzato si basa su indici di diversità e similarità suggeriti dalla statistica e, soprattutto, sulla stima della energia contenuta e necessaria alla comunità di macroinvertebrati attraverso la misura dell'exergia interna quale elemento di giudizio dello stress e del recupero. A tale scopo si è scelto l'uso del valore dell'exergia della comunità secondo le indicazioni di Jørgensen (2000).

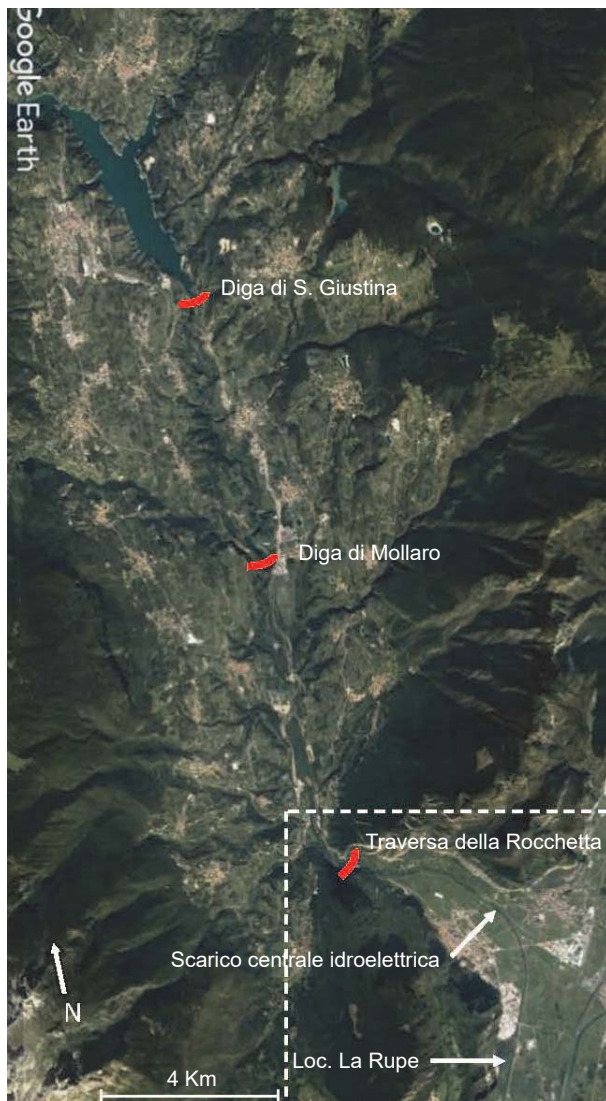


Fig. 1. Il fiume Noce nel tratto che attraversa la Val di Non. Sono visibili la diga di Santa Giustina (182 mln m³) da cui origina un invaso a bacino giornaliero, la diga di Mollaro, e lo sbarramento della Rocchetta. La linea tratteggiata delimita l'area di studio (foto da Google Earth, modificata).

In primo luogo sono stati applicati indici di similarità e di diversità per evidenziare differenze statisticamente significative tra la comunità bentonica rilevata *ante operam* e le tre situazioni *post operam*. In questo caso sono stati applicati quattro diversi indici, ovvero:

1) indice di similarità di **Sorensen** (Sorensen, 1948): misura la somiglianza tra due comunità rilevate e si basa su dati di presenza e assenza. Viene definito come il rapporto tra il numero di taxa condivisi in due siti e il numero di specie presente in ciascun sito.

$$S = \frac{2a}{2a + b + c}$$

dove :

a = numero di taxa comuni alle due comunità

b = numero di taxa presenti nella prima lista faunistica ma assenti nella seconda

c = numero di taxa presenti nella seconda lista faunistica ma assenti nella prima

Il risultato varia dal minimo di 0 (max diversità) a 1 (max similarità)

2) Indice di similarità di **Jaccard** (Jaccard, 1901): è simile al precedente ma non considera le co-assenze e si calcola come segue (valgono le stesse definizioni dell'indice sopraesposto):

$$J = \frac{a}{a + b + c}$$

3) Indice **Q di Yule** (Yule, 1900): è un indice di associazione per tabelle 2x2 basato su coefficienti bidirezionali o prodotto incrociato. Si risolve applicando il seguente algoritmo:

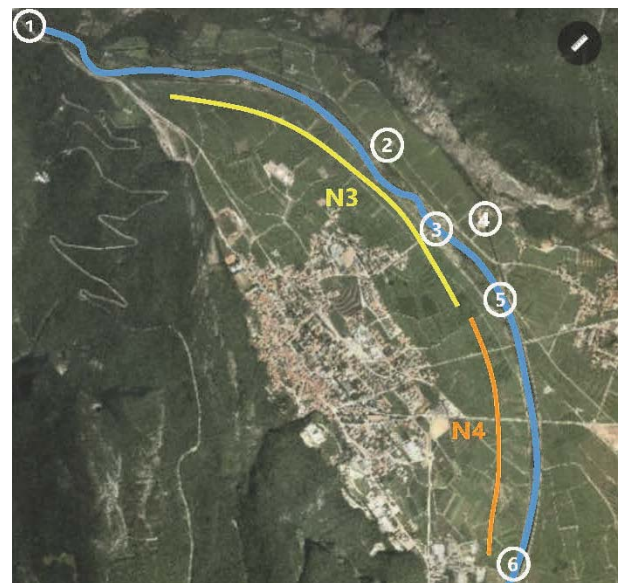


Fig. 2. Area di studio: i tratti su cui è stata svolta l'indagine sono identificati con le sigle N3 e N4 (spiegazioni nel testo). 1: chiusura della Rocchetta. 2: maso Oliva. 3: ponte delle Fusine. 4: centrale alimentata dal bacino di Mollaro. 5: scarico della centrale nel Noce. 6: località La Rupe.

$$Q = \frac{ad - bc}{ad + bc}$$

Dove per **a, b, c**, valgono le suddette definizioni mentre il parametro **d** riguarda i taxa mancanti in una ipotetica lista faunistica del luogo.

Il risultato varia da -1 (min associazione) a +1 (max associazione).

4) Indice **r(phi)**: molto usato in psicomtria (Ercolani *et al.*, 2001) misura la correlazione tra due variabili di tipo categoriale che abbiano solo due modalità di risposta (es. assente/presente) in una tabella 2x2 del tipo:

	V (vero)	F (falso)	tot
V (vero)	Fvv	Ffv	p
F (falso)	Fvf	Fff	q
	P'	q'	N

e poi applicando il seguente algoritmo:

$$r(phi) = \frac{(Fvv * Fff) - (Fvf * Ffv)}{\sqrt{p * p' * q * q'}}$$

La presenza di differenze statisticamente significative è stata verificata utilizzando la tabella del χ^2 .

Si è proceduto nell'analisi dei rapporti tra taxa di macroinvertebrati in funzione del loro ruolo trofico (RT) e dei loro rapporti, come riportato in tabella I.

Per completare l'analisi ci si è affidati alla ricerca e valutazione della exergia (Silow, 2004) dell'ecosistema acquatico del fiume Noce nei tratti a valle dello sbarramento della Rocchetta (N3), a valle

dell'immissione di acqua da parte della centrale di Mezzocorona (N4).

L'exergia misura l'energia libera di un sistema con i contributi di tutte le componenti inclusa l'energia degli organismi.

La misura per l'exergia in ecologia include anche un fattore per valutare la "complessità" delle specie ecologiche. Exergia è misurata kj/g ed è esprimibile come segue (Jørgensen, 1995).

$$Ex = \sum_{n=1}^N Ci \beta i$$

Dove:

Ci = concentrazione della biomassa all'i-esimo componente

βi = fattore che esprime l'exergia posseduta dall'i-esimo componente in base alla sua energia chimica e informazione contenuta nel DNA.

I coefficienti β per i diversi gruppi trofici dei macroinvertebrati sono (Jørgensen, 2002):

raccoglitori (R) = 30

tritutori (T) = 32,5

filtratori (F) = 35

predatori (P) = 47

raschiatori (S) = 35

Tali valori sono unità di detrito equivalente rispetto al valore base β del detrito che è considerato pari a uno (Fonseca, 2000).

Accanto alla exergia totale, definita anche eco-exergia, è utile conoscere anche la *Exergia strutturale o speciale* intesa come Ex divisa per la biomassa, ovvero:

Tab. I. Nella tabella sono riportati i diversi rapporti tra Ruoli Trofici (RT) e il loro significato in termini di valori ecosistemici e funzionali di un corso d'acqua, oltre ai limiti di normalità o discrepanza (Merrit *et al.*, 2007). F= filtratori; R= raccoglitori; S= raschiatori; T= tritutori; P= predatori.

Parametri ecosistemici	Ruoli trofici	limiti	valutazioni
auto/etero	$\frac{S}{(T + R + F)}$	>0,75	Sistema autotrofo – Sistema eterotrofo dipende dall'apporto di sostanza organica alloctona
CPOM/FPOM	$\frac{T}{(R + F)}$	>0,25	Normale associazione tra tritutori collegati con il sistema ripario estivo. Tratto con tritutori estivi: specie favorite dal basso tempo di demolizione delle foglie
TFPOM/BFPOM	$\frac{F}{(T + R)}$	>0,50	Alto carico di FPOM – trasporto di FPOM in sospensione arricchito da inusuale particolato. La presenza di Philopotamidae indica presenza di FPOM molto fine.
Stabilità alveo	$\frac{(S + F)}{(T + R)}$	>0,50	Substrato stabile. Alta stabilità del fondo con numerosi habitat per il benthos
Controllo top down	$\frac{P}{(T + R + F + S)}$	0,10-0,20	Tipica situazione preda/predatore

Tab. II. Rappresentazione delle presenze-assenze di vari taxa di macroinvertebrati. Si riporta anche l'indicazione del ruolo trofico di ogni taxa. I valori delle presenze sono riferiti ai due punti N3 e N4 e, per ciascuno, ai 4 campionamenti (1 *ante* e 2, 3 e 4 *post operam*).

			N31	N32	N33	N34	N41	N42	N43	N44	ideale
PLECOPTERA	<i>Amphinemura</i>	T	0	0	0	0	0	1	0	1	1
	<i>Brachyptera</i>	S	1	1	0	0	0	0	0	1	1
	<i>Leuctra</i>	T	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	<i>Protonemoura</i>	T	0	0	0	1	0	0	0	0	1
EPHEMEROPTERA	<i>Baetis</i>	R	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	<i>Ecdyonurus</i>	S	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	<i>Epeorus</i>	S	1	0	1	0	0	0	0	0	1
	<i>Ephemerella</i>	R	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	<i>Paraleptophlebia</i>	R	1	1	0	0	0	0	0	0	1
	<i>Rhithrogena</i>	R	1	1	1	0	1	1	0	0	1
TRICHOPTERA	Glossosomatidae	S	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Goeridae	S	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Hydropsychidae	F	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	Limnephilidae	T	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Odontoceridae	T	0	0	1	0	0	0	0	0	1
	Polycentropodidae	F	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Rhyacophilidae	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Sericostomatidae	T	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	COLEOPTERA	Dytiscidae (larve)	P	1	1	1	1	1	0	0	1
	Elminthidae	R	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DIPTERA	Athericidae	P	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	Chironomidae (larve)	R	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Empididae	P	1	0	1	1	1	0	0	0	1
	Ephydriidae	R	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	Limoniidae	P	1	1	1	1	0	0	0	0	1
	Psycodidae	R	0	1	0	0	0	1	0	1	1
	Simuliidae (larve)	F	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Tipulidae	T	0	0	0	0	1	0	0	0	1
OLIGOCHAETA	Lumbricidae	R	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Lumbriculidae	R	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Naididae	R	0	0	1	0	0	0	1	0	1
		Tubificidae	R	0	0	0	0	0	1	1	1
HIRUDINEA	<i>Dina</i>	P	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	<i>Glossiphonia</i>	P	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	<i>Helobdella</i>	P	0	0	0	0	1	0	0	0	1
CRUSTACEA	Asellidae	T	1	1	0	0	1	1	1	1	1
	Gammaridae	T	1	1	1	0	1	1	1	1	1
TURBELLARIA	<i>Dugesia</i>	P	0	0	0	0	1	1	1	1	1
	<i>Polycelis</i>	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1
BIVALVA	<i>Pisidium</i>	F	0	1	0	1	0	0	0	1	1
GASTEROPODA	<i>Ancylus</i>	S	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	<i>Lymnaea</i>	S	0	0	1	1	0	0	1	1	1
	<i>Physa</i>		0	0	0	1	0	0	0	1	1

$$stEx = \frac{\sum_{n=1}^N Ci \beta i}{\sum_{n=1}^N Ci}$$

Dimensionalmente la Ex espressa in UDE può a sua volta essere trasformata in kj/g moltiplicandola per 18,7 (Jørgensen *et al.*, 2004).

RISULTATI E DISCUSSIONE

Verifica e valutazione dello stress ecosistemico

I dati delle liste faunistiche del rapporto sul monitoraggio *ante e post operam* fornito dalla Dolomiti-Edison sono stati aggregati in un'unica tabella riportandovi solo la presenza o assenza dei taxa, rispettivamente indicate

con i numeri 1 e 0 (Tab. II).

Nella tabella sono evidenziati anche i ruoli trofici dei taxa, oltre alla distinzione dei due punti di campionamento (N3, N4) e all'ordine temporale delle campagne di campionamento (N31, N32N44).

Tralasciando l'analisi IBE che è stata applicata correttamente e che non evidenzia differenze tra prima e dopo l'evento di svaso, sono stati applicati gli indici di similarità, differenza e associazione descritti nel paragrafo precedente. I risultati per i punti N3 e N4 sono riassunti rispettivamente nelle tabelle IIIa e IIIb.

Con qualunque indice di similarità, differenza o associazione utilizzato si ottengono dei valori che non evidenziano diversità tra le strutture della comunità di

Tab. IIIa. Applicazione dei diversi indici di similarità e associazione per la stazione N3. Le caselle indicate dall'incrocio delle "x" indica che i taxa sono presenti in entrambi i campioni, le caselle indicate dall'incrocio di "x" e "0" indicano che il numero dei taxa sono presenti solo in uno ("x") dei campioni, mentre quelle indicate dall'incrocio di due "0" indicano assenza di taxa in entrambi i campioni.

<p>N31/N32</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">24</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: right;">27</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">30</td><td style="text-align: right;">33</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">27</td><td style="text-align: center;">33</td><td style="text-align: right;">60</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,798 Q (Yule) 0,975 Jaccard 0,800 Sorensen 0,889</p>		x	0		x	24	3	27	0	3	30	33		27	33	60	<p>N31/N33</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">23</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: right;">28</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: center;">33</td><td style="text-align: right;">38</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">28</td><td style="text-align: center;">38</td><td style="text-align: right;">66</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,690 Q (Yule) 0,936 Jaccard 0,697 Sorensen 0,821</p>		x	0		x	23	5	28	0	5	33	38		28	38	66	<p>N31/N34</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">20</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: right;">25</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">8</td><td style="text-align: center;">33</td><td style="text-align: right;">41</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">28</td><td style="text-align: center;">38</td><td style="text-align: right;">66</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,594 Q (Yule) 0,886 Jaccard 0,606 Sorensen 0,755</p>		x	0		x	20	5	25	0	8	33	41		28	38	66
	x	0																																																
x	24	3	27																																															
0	3	30	33																																															
	27	33	60																																															
	x	0																																																
x	23	5	28																																															
0	5	33	38																																															
	28	38	66																																															
	x	0																																																
x	20	5	25																																															
0	8	33	41																																															
	28	38	66																																															
<p>N32/N33</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">21</td><td style="text-align: center;">7</td><td style="text-align: right;">28</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">6</td><td style="text-align: center;">34</td><td style="text-align: right;">40</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">27</td><td style="text-align: center;">41</td><td style="text-align: right;">68</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,604 Q (Yule) 0,889 Jaccard 0,618 Sorensen 0,764</p>		x	0		x	21	7	28	0	6	34	40		27	41	68	<p>N32/N34</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">20</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: right;">25</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">7</td><td style="text-align: center;">32</td><td style="text-align: right;">39</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">27</td><td style="text-align: center;">37</td><td style="text-align: right;">64</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,613 Q (Yule) 0,896 Jaccard 0,625 Sorensen 0,769</p>		x	0		x	20	5	25	0	7	32	39		27	37	64	<p>N33/N34</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">22</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: right;">31</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">32</td><td style="text-align: right;">33</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">23</td><td style="text-align: center;">41</td><td style="text-align: right;">64</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,708 Q (Yule) 0,975 Jaccard 0,688 Sorensen 0,815</p>		x	0		x	22	9	31	0	1	32	33		23	41	64
	x	0																																																
x	21	7	28																																															
0	6	34	40																																															
	27	41	68																																															
	x	0																																																
x	20	5	25																																															
0	7	32	39																																															
	27	37	64																																															
	x	0																																																
x	22	9	31																																															
0	1	32	33																																															
	23	41	64																																															

Tab. IIIb. Applicazione dei diversi indici di similarità e associazione per la stazione N4.

<p>N41/N42</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">19</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: right;">24</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">4</td><td style="text-align: center;">28</td><td style="text-align: right;">32</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">23</td><td style="text-align: center;">33</td><td style="text-align: right;">56</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,671 Q (Yule) 0,928 Jaccard 0,679 Sorensen 0,809</p>		x	0		x	19	5	24	0	4	28	32		23	33	56	<p>N41/N43</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">17</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: right;">22</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">6</td><td style="text-align: center;">28</td><td style="text-align: right;">34</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">23</td><td style="text-align: center;">33</td><td style="text-align: right;">56</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,592 Q (Yule) 0,881 Jaccard 0,607 Sorensen 0,756</p>		x	0		x	17	5	22	0	6	28	34		23	33	56	<p>N41/N44</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">18</td><td style="text-align: center;">7</td><td style="text-align: right;">25</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">4</td><td style="text-align: center;">29</td><td style="text-align: right;">33</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">22</td><td style="text-align: center;">36</td><td style="text-align: right;">58</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,611 Q (Yule) 0,898 Jaccard 0,621 Sorensen 0,766</p>		x	0		x	18	7	25	0	4	29	33		22	36	58
	x	0																																																
x	19	5	24																																															
0	4	28	32																																															
	23	33	56																																															
	x	0																																																
x	17	5	22																																															
0	6	28	34																																															
	23	33	56																																															
	x	0																																																
x	18	7	25																																															
0	4	29	33																																															
	22	36	58																																															
<p>N42/N43</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">20</td><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: right;">22</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">4</td><td style="text-align: center;">26</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">24</td><td style="text-align: center;">28</td><td style="text-align: right;">52</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,769 Q (Yule) 0,970 Jaccard 0,769 Sorensen 0,870</p>		x	0		x	20	2	22	0	4	26	30		24	28	52	<p>N42/N44</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">22</td><td style="text-align: center;">7</td><td style="text-align: right;">29</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">30</td><td style="text-align: right;">31</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">23</td><td style="text-align: center;">37</td><td style="text-align: right;">60</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,747 Q (Yule) 0,979 Jaccard 0,733 Sorensen 0,846</p>		x	0		x	22	7	29	0	1	30	31		23	37	60	<p>N43/N44</p> <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">0</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">x</td><td style="text-align: center;">20</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: right;">29</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">30</td><td style="text-align: right;">31</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">21</td><td style="text-align: center;">39</td><td style="text-align: right;">60</td></tr> </table> <p>$r_{(phi)}$ 0,689 Q (Yule) 0,970 Jaccard 0,667 Sorensen 0,800</p>		x	0		x	20	9	29	0	1	30	31		21	39	60
	x	0																																																
x	20	2	22																																															
0	4	26	30																																															
	24	28	52																																															
	x	0																																																
x	22	7	29																																															
0	1	30	31																																															
	23	37	60																																															
	x	0																																																
x	20	9	29																																															
0	1	30	31																																															
	21	39	60																																															

macroinvertebrati rilevata *ante* svasso e quelle *post* svasso sia nella stazione di campionamento N3 che N4. Gli stessi risultati sono riportati nella tabella IV in forma comparativa solo per i due indici più significativi di similarità (Sorensen) e associazione (Q_{Yule}).

Sebbene non sia stata registrata differenza significativa tra il campione pre svasso e i successivi campioni dal punto di vista delle presenze/assenze di taxa, si è proceduto a verificare se vi sono stati risvolti sui rapporti interni tra gruppi di Ruoli Trofici (RT).

In base ai rapporti percentuali tra i componenti dei diversi Ruoli Trofici (Tab. V e Fig. 3), si nota come nel punto N3 ci sia un chiaro aumento da febbraio a luglio dei raccoglitori a scapito soprattutto di filtratori che subiscono una forte contrazione numerica, mentre gli altri gruppi sembrano non risentire del fenomeno. Nel punto N4, invece, non si riscontrano particolari comportamenti indotti tant'è che possiamo affermare che nel tratto post immissione di acqua dalla centrale sembra che gli effetti dello svasso siano minimi, probabilmente a causa della diluizione e delle variazioni di portata (*hydropeaking*) che condizionano l'ambiente in modo

molto più consistente rispetto ad uno svasso estemporaneo. Perciò nel prosieguo dell'analisi ci riferiremo solo ai dati e risultati inerenti il punto N3 spesso indicato come sito "maso Oliva".

Poiché il campionamento è stato eseguito con un anticipo di 20 giorni rispetto allo svasso, avvenuto l'11 marzo, è ragionevole supporre che il monitoraggio sia stato pianificato nella convinzione che in questo lasso di tempo nulla sarebbe cambiato all'interno della comunità. Accettando questo assunto, riteniamo pertanto valida la situazione *ante* considerando il giorno 11 marzo come momento zero, per cui la sequenza dei campionamenti risulta la seguente:

Data	11 mar	23 mar	11 mag	20 lug
giorni	1	20	61	131

I valori numerici per ogni gruppo trofico nelle diverse date e punti sono riassunti nella tabella VI insieme ai rapporti dei Ruoli Trofici (Fig. 4).

Nel rapporto della Dolomiti Edison Energy le schede relative alle presenze bentoniche non riportano valori numerici precisi, se non per i valori bassi, ma riportano

Tab. IV. Visualizzazione in forma comparativa dei risultati di similarità ed associazione.

Sorensen	N31	N32	N33	N34
N31	1	0,941	0,821	0,755
N32		1	0,764	0,769
N33			1	0,815
N34				1

Sorensen	N41	N42	N43	N44
N41	1	0,809	0,756	0,766
N42		1	0,87	0,733
N43			1	0,800
N44				1

Q(yule)	N31	N32	N33	N34
N31	1	1,000	0,936	0,886
N32		1	0,889	0,896
N33			1	0,975
N34				1

Q(yule)	N41	N42	N43	N44
N41	1	0,928	0,881	0,898
N42		1	0,97	0,979
N43			1	0,970
N44				1

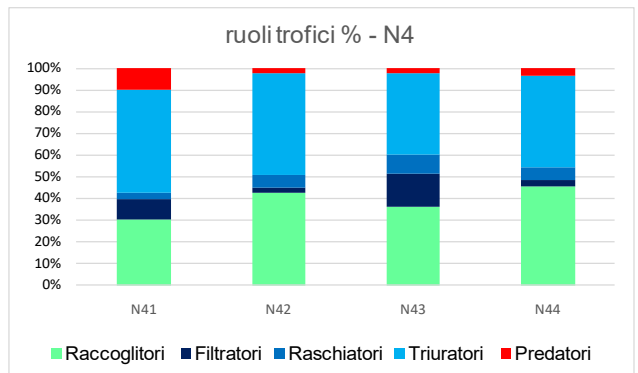
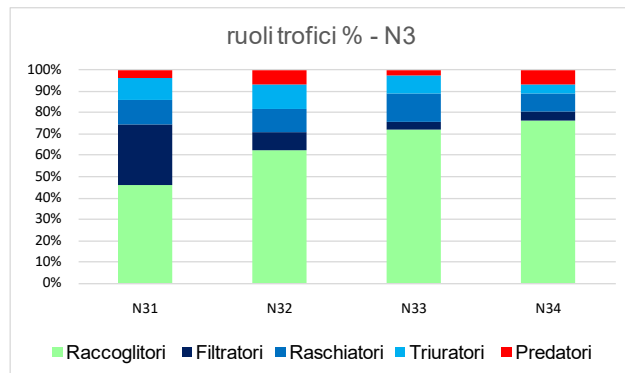


Fig. 3. Rappresentazione delle percentuali di ciascun Ruolo Trofico nei punti N3 e N4 nei 4 campionamenti.

stime del minimo, oppure figurano valori sicuramente superiori ad un numero minimo stabilito dal metodo. Quindi ci si trova di fronte a valori come >20, >100 o addirittura >300. In questo caso si è ritenuto di considerare il valore minimo assegnato come valore quantitativo anche se il valore reale poteva essere superiore creando una condizione di uniformità unanime.

Dai risultati (Tab. VI e Fig. 4) si evince che nel punto N3 (loc. maso Oliva) esiste un evidente calo dei rapporti (S+F)/(T+R) e F/(S+R) passando dalla condizione ante svaso a quella rilevata in luglio, mentre gli altri rapporti non subiscono modificazioni significative. Nel caso N4 l'unica nota è il calo nel campione di maggio del rapporto T/(R+F) a favore dei rapporti (S+F)/(T+R) e F/(S+R).

Come già detto in precedenza, ci soffermiamo ad analizzare solo le variazioni del punto N3 in quanto nel punto N4 l'*hydropeacking* indotto dallo scarico della centrale gioca un ruolo importante per cui non è facile distinguere gli effetti da quelli dovuti allo svaso.

Il calo del rapporto (S+F)/(T+R) ci informa che la stabilità del fondo è soggetta a pressioni che influenzano la stabilità degli habitat (vedi Tab. I), inoltre il calo del rapporto F/(S+R) indica la presenza di sedimento fine in sospensione, veicolato da monte dopo lo svaso.

Queste condizioni hanno influito sulla presenza numerica dei taxa bentonici, causando il drastico calo dei filtratori (Fig. 5), mentre gli altri gruppi mostrano lievi oscillazioni giudicabili nella norma e quindi poco significative.

Tab. V. Rappresentazione delle presenze percentuali dei diversi R.T. nei punti N3 e N4. Presenze numeriche dei diversi gruppi R.T. dove le sigle si riferiscono ai diversi R.T., ovvero: R = raccoglitori, F = filtratori, S = raschiatori, T = trituratori, P= predatori. N31 = punto 3 e data 23 febbraio. N32 = punto 3 e data 30 marzo. N33 = punto 3 e data 11 maggio. N34 = punto 3 e data 20 luglio. Così vale anche per il punto N4.

	N31	N32	N33	N34
Raccoglitori	0,46	0,63	0,72	0,76
Filtratori	0,29	0,08	0,04	0,04
Raschiatori	0,12	0,11	0,13	0,09
Trituratori	0,10	0,12	0,08	0,04
Predatori	0,04	0,06	0,02	0,07
Densità tot	1,00	1,00	1,00	1,00

	N41	N42	N43	N44
Raccoglitori	0,30	0,43	0,36	0,46
Filtratori	0,09	0,02	0,15	0,03
Raschiatori	0,03	0,06	0,09	0,06
Trituratori	0,47	0,47	0,37	0,43
Predatori	0,10	0,02	0,03	0,03
Densità tot	1,00	1,00	1,00	1,00

Tab. VI. Presenze numeriche nei punti N3 (a sinistra) e N4 (a destra) degli individui bentonici suddivisi per Ruoli Trofici e rapporti tra gruppi di ruoli trofici. Per il significato dei limiti si veda la Tab. I.

data	11-mar	30-mar	11-mag	20-lug
giorni	1	20	61	131
F	300	61	20	24
P	41	47	11	38
R	479	457	393	421
S	123	80	72	47
T	102	84	46	22
	1045	729	542	552

data	11-mar	30-mar	11-mag	20-lug
giorni	1	20	61	131
F	51	12	100	17
P	55	12	19	21
R	167	232	264	293
S	17	32	64	38
T	262	252	271	273
	552	540	718	642

data	11-mar	30-mar	11-mag	20-lug
giorni	1	20	61	131
S/(T+R+F)	0,14	0,13	0,16	0,10
T/(R+F)	0,13	0,16	0,11	0,05
F/(S+R)	0,50	0,11	0,04	0,05
(S+F)/(T+R)	0,73	0,26	0,21	0,16
P/(F+R+S+T)	0,04	0,07	0,02	0,07

LIMITI
 >0,75 aut
 >0,5,>0,25
 >0,5
 >0,5
 0,1-0,2

data	11-mar	30-mar	11-mag	20-lug
giorni	1	20	61	131
S/(T+R+F)	0,04	0,06	0,10	0,07
T/(R+F)	1,20	1,03	0,74	0,88
F/(S+R)	0,28	0,05	0,30	0,05
(S+F)/(T+R)	0,16	0,09	0,31	0,10
P/(F+R+S+T)	0,11	0,02	0,03	0,03

Se consideriamo l'andamento delle presenze di filtratori e lo confrontiamo con i valori dei rapporti tra ruoli trofici della tabella 2 si ottengono dei valori di correlazione molto alti, ovvero $r = 0,999$ tra filtratori e $F/(S+R)$ e $r = 0,997$ tra filtratori e $(S+F)/(T+R)$, a conferma dell'esistenza di uno stress ecosistemico che coinvolge una parte del benthos e le caratteristiche trofiche del corso d'acqua.

Risulta evidente come i valori totali delle presenze reali esposte nella tabella VII mostrano una aderenza quasi perfetta tra i valori reali e quelli fittati dalla curva (Fig. 6); esiste tra le due sequenze una correlazione molto alta sebbene i campioni siano pochi, ovvero $r = 0,9998$ con $p < 0,01$ e, simmetricamente, il test t-Student dimostra che le differenze tra le due sequenze sono dovute al caso per lo 0.001% e che le stesse appartengono per il 99.98% dei casi alla stessa popolazione numerica.

Per la verità, l'aderenza tra dati reali e teorici vale solo per i primi 131 giorni (ultima data di verifica post svaso) ma c'è da aspettarsi che poi la curva tenda a ritornare verso i valori iniziali e non tendere asintoticamente a zero. In questo caso possiamo dire che esiste uno stress temporaneo sull'insieme dei R.T. che prosegue fino al

131° giorno dalla data dello svaso.

Inoltre, vista la scarsa rappresentatività dei dati a valle dello scarico, in quanto non si riescono a distinguere gli effetti dello svaso da quelli dell'*hydropeaking*, d'o-

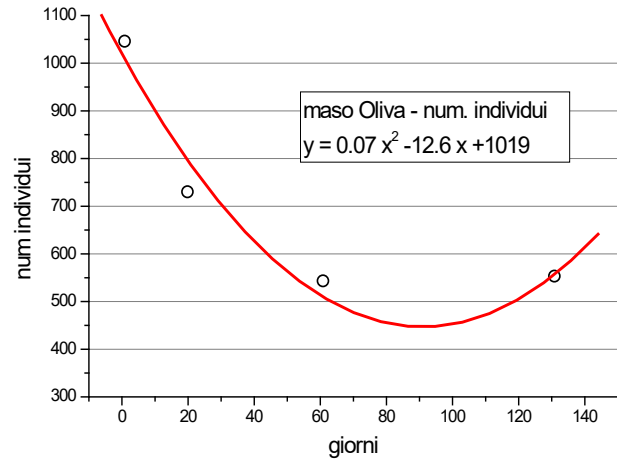


Fig. 6. Curva di interpolazione dei valori di presenza totali di individui macrobentonici riferiti ai dati della stazione "maso Oliva".

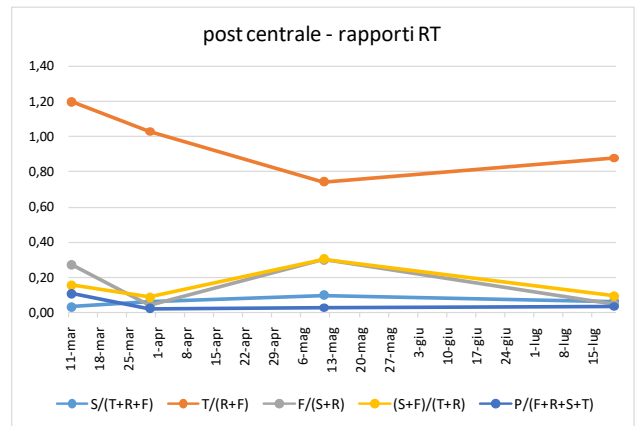
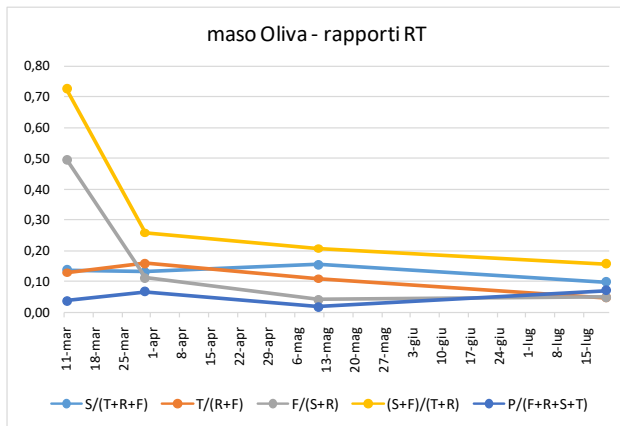


Fig. 4. Rappresentazione dei rapporti tra R.T. degli individui bentonici nella stazione maso Oliva e a valle dello scarico della centrale.

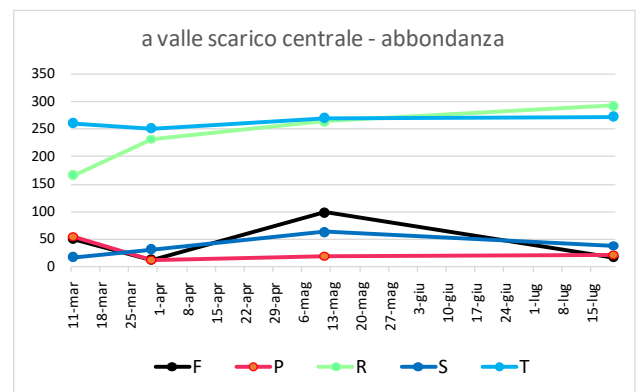
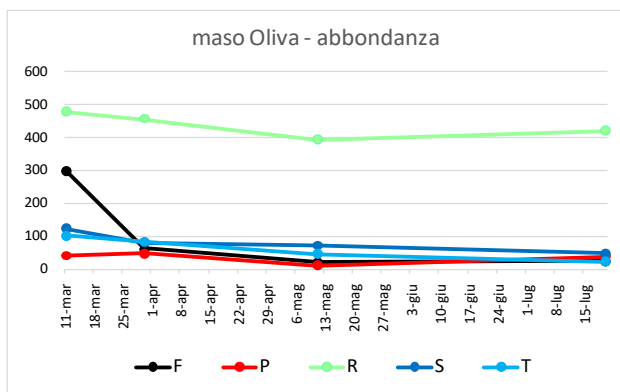


Fig. 5. Andamento nel tempo delle presenze numeriche dei diversi gruppi di R.T. nei due punti di campionamento: N3 = maso Oliva, N4 = valle scarico della centrale. F=filtratori, P=predatori, R=raccoglitori, S=raschiatori, T=tritatori.

ra in poi considereremo solo i dati del tratto a monte, identificato come loc. maso Oliva.

Infatti nella tabella VII si riportano i dati riferiti al tratto ponte delle Fusine - Rocchetta (maso Oliva).

In casi come questi, dove si manifesta evidente una scarsa resilienza, sarebbe stato utile ripetere il monitoraggio almeno fino all'inizio del recupero numerico dei diversi taxa, per capire meglio l'entità dello stress dall'andamento della probabile curva a sacco e individuare l'ampiezza, la malleabilità e l'elasticità.

Questa limitazione ci impone di ragionare in termini di tempo solo fino al 131 giorno o poco più, ovvero sul lasso di tempo dalla data dello svaso all'ultima campagna di monitoraggio (luglio). Perciò d'ora in avanti considereremo solo questo spazio temporale accettando il fatto (molto presumibile) che la comunità bentonica non sia cambiata dalla data *ante facto*, cioè 28 febbraio, rispetto a quella dello svaso (11 marzo)

Analisi dell'energia di sistema o eco-exergia

Come affermato nella procedura esposta precedentemente, l'exergia di un sistema è la misura della sua deviazione dall'equilibrio termodinamico con l'ambiente, e rappresenta la massima capacità di energia per svolgere il mantenimento dell'equilibrio (con irreversibilità), incrementando l'entropia a spese dell'exergia (Ludovisi, 2009).

Nella tabella VIII si riportano i valori di lunghezza dei singoli individui riscontrati nei campioni eseguiti come monitoraggio nei due punti (N3 e N4) espressi in millimetri (L), la biomassa in milligrammi (B) di ognuno ottenuta attraverso i fattori di conversione secondo le indicazioni in bibliografia (Benke *et al.*, 1999). Accanto a questi valori è riportato anche il coefficiente β di calcolo della exergia come indicato da Jørgensen (2002).

Perciò accanto al valore numerico di presenza dei diversi taxa, per facilitare la comprensione, è indicato anche il valore di exergia di ogni presenza, o almeno per i taxa di cui si dispone di dati per il calcolo. Il valore dell'exergia è qui espresso in unità di exergia relativa (UE), riferito cioè al contenuto di exergia del detrito che è stato assunto come riferimento pari a uno (UE

Tab. VII. Andamento nel tempo delle presenze di vari taxa suddivisi in Ruoli Trofici nel tratto maso Oliva.

giorni	1	20	61	131
F	300	61	20	24
P	41	47	11	38
R	479	457	393	421
S	123	80	72	47
T	102	84	46	22
tot	1046	749	603	683

detrito = 1).

Chiaramente, dal punto di vista dimensionale, l'exergia è riferita ai milligrammi, o grammi, di biomassa, ma per meglio comprendere il peso della stessa si è assunto che la quantità di individui di ogni campione sia riferito a un metro quadro di fondo in quanto si suppone che questa sia l'area di prelievo campionario in ogni punto eseguito con il retino immanicato per l'indice IBE. Perciò l'exergia descritta sarà considerata per metro quadro.

Nelle tabelle IX e X sono riportati i valori sinottici della tabella precedente per ogni ruolo trofico e riferiti rispettivamente alla biomassa e alle Unità di Exergia (UE/g), mentre nella tab. XI si riporta il valore dell'exergia (in kJ/m^2) per ogni singola data di campionamento; tuttavia il conto dei giorni è stato calcolato partendo dalla data dello svaso e questo determina una apparente discordanza.

Come evidenziato nelle tabelle e nella figura 7, l'andamento nel tempo è in calo per alcuni ruoli trofici, mentre per altri (raschiatori e predatori) è sostanzialmente immutato. Particolarmente manifesto è il calo dei filtratori e della exergia a loro associata.

Queste risposte allo stress sono confermate anche a

Tab. IX. Valori della biomassa totale per gruppi di Ruolo Trofico espressi in g/m^2 riferiti alla stazione di rilevamento N3 (loc. maso Oliva).

biomassa	11/3/19	30-mar	11-mag	20-lug
giorni	1	20	61	131
F	1,02	0,22	0,07	0,07
P	0,10	0,07	0,02	0,09
R	1,26	1,25	1,02	1,12
S	0,04	0,04	0,05	0,03
T	0,45	0,27	0,21	0,17
tot	2,86	1,84	1,37	1,49

Tab. X. Valori totali di exergia riferiti alla stazione di rilevamento N3 (loc. maso Oliva) con indicazione per ogni ruolo trofico l'exergia in unità di su grammo (UE/g). L'unità base è l'exergia del detrito che vale 1.

UE	11/3/19	30-mar	11-mag	20-lug
giorni	1	20	61	131
F	35,6	7,6	2,5	2,5
P	4,5	3,3	1,1	4,4
R	37,8	37,4	30,6	33,6
S	1,3	1,4	1,8	1,1
T	14,8	8,6	6,7	5,6
tot	94,0	58,3	42,8	47,2

Tab. VIII. Valori di lunghezza media in mm (L) degli individui riscontrati nei diversi campioni, loro biomassa in UE/mg (B) e coefficiente β relativo, per il calcolo della exergia singola (Ex), riferiti alle varie fasi di monitoraggio (23 febbraio momento zero).

	β	L mm	B mg	maso Oliva						post scarico centrale												
				23-feb-19		30-mar		11-mag		20-lug		23-feb		30-mar		11-mag		20-lug				
				num	Ex UE/g	num	Ex UE/g	num	Ex UE/g	num	Ex UE/g	num	Ex UE/g	num	Ex UE/g	num	Ex UE/g	num	Ex UE/g			
Hydropsychidae	F	35	7	2,95	200	20,67	30	3	10	1,03	10	1,03	10	1,03	1	0,10	0	0,00	0	0,00	3	0,3
Polycentropodidae	F	35	15	2,74	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,10
Simuliidae	F	35	8	4,27	100	14,96	30	4,49	10	1,50	10	1,50	10	1,50	50	7,48	10	1,50	100	14,96	10	1,50
<i>Pistidium</i>	F	35	7		0	0,00	1	0,00	0	0,00	4	0,00	4	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	3	0,00
Rhyacophilidae	P	47	20	2,55	30	3,60	20	2,40	3	0,36	10	1,20	10	1,20	10	1,20	1	0,12	5	0,60	4	0,48
Dytiscidae	P	47	2	2,89	3	0,41	3	0,41	3	0,41	20	2,72	20	2,72	1	0,14	0	0,00	0	0,00	3	0,41
Athericidae	P	47	23	2,62	1	0,12	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Empididae	P	47	6	2,57	1	0,12	0	0,00	2	0,24	2	0,24	2	0,24	3	0,36	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Limoniidae	P	47	10	2,63	2	0,25	4	0,49	1	0,12	2	0,25	2	0,25	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
<i>Dina</i>	P	47	25		1	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
<i>Glossiphonia</i>	P	47	25		0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	3	0,00
<i>Helobdella</i>	P	47	8		0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
<i>Crenobia</i>	P	47	5	2,20	0	0,00	0	0,00	1	0,10	1	0,10	1	0,10	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
<i>Dugesia</i>	P	47	5	2,20	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	20	2,06	10	1,03	10	1,03	10	1,03
<i>Polycelis</i>	P	47	5	2,20	3	0,31	20	2,06	1	0,10	3	0,31	3	0,31	20	2,06	1	0,10	4	0,41	1	0,10
<i>Baetis</i>	R	30	9	2,91	300	26,18	300	26,18	300	26,18	300	26,18	300	26,18	100	8,73	100	8,73	100	8,73	30	2,62
<i>Ephemerella</i>	R	30	7	2,73	1	0,08	30	2,46	10	0,82	50	4,10	50	4,10	0	0,00	6	0,49	1	0,08	200	16,38
<i>Paraleptophlebia</i>	R	30	8	2,71	5	0,41	2	0,16	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
<i>Rhithrogena</i>	R	30	14	2,75	50	4,12	30	2,47	10	0,82	0	0,00	0	0,00	1	0,08	4	0,33	0	0,00	0	0,00
Elminthidae	R	30	2	2,93	10	0,88	30	2,64	6	0,53	10	0,88	10	0,88	3	0,26	6	0,53	4	0,35	10	0,88
Chironomidae	R	30	16	2,63	100	7,89	50	3,95	50	3,95	50	3,95	50	3,95	50	3,95	100	7,89	100	7,89	20	1,58
Ephydriidae	R	30	3	2,62	0	0,00	1	0,08	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Psychodidae	R	30	10	2,63	0	0,00	1	0,08	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,08	0	0,00	1	0,08
Lumbricidae	R	30	60		3	0,00	3	0,00	3	0,00	1	0,00	1	0,00	3	0,00	3	0,00	3	0,00	2	0,00

(segue)

	β	L mm	B mg	maso Oliva												post scarico centrale							
				23-feb			30-mar			11-mag			20-lug			23-feb		30-mar		11-mag		20-lug	
				num	Ex UE/g	UE/g	num	Ex UE/g	UE/g	num	Ex UE/g	UE/g	num	Ex UE/g	UE/g	num	Ex UE/g	UE/g	num	Ex UE/g	UE/g	num	Ex UE/g
Lumbriculidae	R	30	60	10	0,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00
Naididae	R	30	5	0	0,00	0	0,00	4	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,00	0	0,00	0	0,00
Tubificidae	R	30	20	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	2	0,00	5	0,00	20	0,00	20	0,00
Brachyptera	S	35	8	2	0,19	1	0,10	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Ecdyonurus	S	35	14	100	9,92	50	4,96	50	4,96	30	2,98	10	0,99	10	0,99	10	0,99	4	0,40	8	0,79	8	0,79
Epeorus	S	35	14	3	0,30	0	0,00	1	0,10	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Glossosomatidae	S	35	10	3	0,36	14	1,70	10	1,22	4	0,49	2	0,24	10	1,22	10	1,22	50	6,08	20	2,43	20	2,43
Goeridae	S	35	8	5	0,50	11	1,10	6	0,60	4	0,40	4	0,40	10	1,00	10	1,00	5	0,50	4	0,40	4	0,40
Ancylus	S	35	4	10	0,00	4	0,00	4	0,00	7	0,00	1	0,00	1	0,00	2	0,00	4	0,00	4	0,00	4	0,00
Lymnaea	S	35	12	0	0,00	0	0,00	1	0,00	1	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00
Physa	S	35	16	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,00	1	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,00	1	0,00
Amphinemura	T	32,5	8	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,09	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Leuctra	T	32,5	10	30	2,67	11	0,98	1	0,09	10	0,89	0	0,00	1	0,09	1	0,09	1	0,09	3	0,27	3	0,27
Protonemoura	T	32,5	8	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,09	1	0,09	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Limnephilidae	T	32,5	22	30	2,90	30	2,90	10	0,97	5	0,48	30	2,90	30	2,90	30	2,90	50	4,83	30	2,90	30	2,90
Odontoceridae	T	32,5	22	0	0,00	0	0,00	2	0,20	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Sericostomatidae	T	32,5	16	30	2,73	30	2,73	30	2,73	6	0,55	30	2,73	20	1,82	20	1,82	20	1,82	10	0,91	10	0,91
Tipulidae	T	32,5	23	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	2	0,18	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Asellidae	T	32,5	5	2	0,19	3	0,29	0	0,00	0	0,00	100	9,66	100	9,66	100	9,66	100	9,66	200	19,33	200	19,33
Gammaridae	T	32,5	10	10	1,22	10	1,22	3	0,37	0	0,00	0	0,00	100	12,19	100	12,19	100	12,19	30	3,66	30	3,66
Totale				1045	101	729	67	542	47	552	48	552	56	540	51	718	70	642	70	642	56	56	56
																							93,07

livello totale e presentano un andamento particolare, con cali evidenti nei primi 90 giorni circa dopo lo svaso per poi dimostrare una leggera ripresa. La curva della exergia ricalca, ovviamente, quella espressa dai valori totali di individui confermando graficamente un comportamento come una curva a sacco (Fig. 8) che possa riportare il livello dell'exergia alla quota ante svaso, senza però poter sapere se lo stato finale avrà

Tab. XI. Valori dell'exergia per ogni Ruolo Trofico espressi in kJ/m^2 riferiti ai dati della stazione N3 (loc. maso Oliva). Si ricorda che l'unità di exergia del detrito vale $18,7 \text{ kJ}$ (Fonseca *et al.*, 2000; Jørgensen *et al.*, 2004).

	11-3-19	30-mar	11-mag	20-lug
giorni	1	20	61	131
F	666	142	47	47
P	84	62	21	82
R	707	699	572	628
S	24	26	33	20
T	276	161	126	104
Tot	1757	1089	799	882

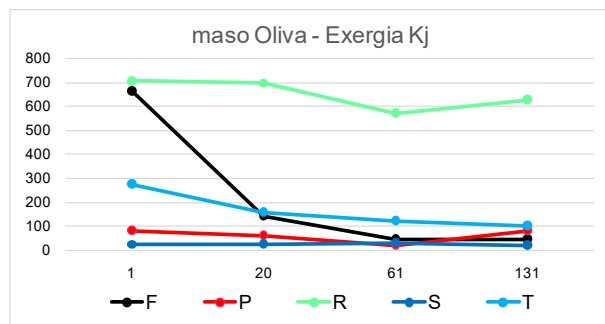


Fig. 7. Andamento della exergia di ogni R.T. espressa in kJ/m^2 .

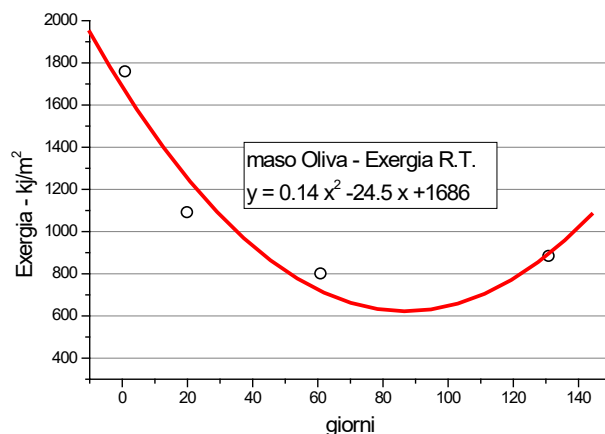


Fig. 8. Curva interpolante i dati di exergia del totale dei Ruoli Trofici (kJ/m^2) e simulante una curva a sacco con una aderenza correlativa $r = 0,928$.

una certa malleabilità o se ritornerà allo stesso livello. Se avessimo disposto di analisi che vanno oltre il 20 luglio, avremmo potuto rappresentare la curva completa e discutere sulla capacità resiliente del fiume, sulla sua efficienza di recupero e funzionalità, ma con i dati in possesso si può solo ipotizzare e speculare sugli scenari oltre tale data.

Il comportamento descritto è facilmente comprensibile osservando la figura 8 che illustra, appunto, il contenuto di exergia nel tempo con la curva polinomiale che più si approssima e presenta un minimo al giorno 88 a quota 614 kJ/m^2 .

Nella tabella XII si riportano i dati di exergia totale (Ex) e exergia strutturale (stEx) dopo la trasformazione in kilojoule ottenuti moltiplicando i valori UE per $18,7$ che è il valore UE del detrito espresso in kJ (Jørgensen, 2002).

Dalla letteratura sappiamo che l'energia strutturale stEx rappresenta la risposta ecologica allo stress e il suo andamento ci può dare utili informazioni. Cosicché sappiamo che la stEX rimane stabile o aumenta nel caso di presenza di composti alloctoni che possono essere metabolizzati dall'ecosistema in tempi brevi, o quando può adattarsi alla nuova situazione con cambiamenti strutturali sempre in breve tempo. Spesso il calo di exergia negli ambienti lenticci è associato ad un processo di eutrofizzazione e di cambio della struttura della comunità di viventi (Lodovisi e Poletti, 2003).

Viceversa, nel caso di un calo di stEX siamo di fronte alla incapacità del sistema di adattarsi alla novità o almeno di adattarsi nel lungo periodo, dimostrando inoltre irreversibilità dei mutamenti dell'ecosistema a breve termine (Silow *et al.*, 1998).

Nel nostro caso si osserva un chiaro calo, come del resto intuibile dato i valori di Ex, con una leggera ripresa come già osservato in precedenza, a conferma della scarsa capacità resiliente del corso d'acqua in questo tratto.

Analisi della perdita del Servizio Ecosistemico

Nel capitolo precedente abbiamo definito la perdita di exergia in kJ/m^2 della comunità di macroinvertebrati del tratto di fiume definito come località maso Oliva. La

Tab. XII. Espressione della exergia totale e strutturale del tratto di fiume in località maso Oliva espressa in kilojoule per metro quadro.

giorni	Ex	stEx
1	1757	1085
20	1089	719
61	799	509
131	882	519

tabella XI illustra bene la situazione, da un contenuto di exergia iniziale pari a 1757 kJ/m^2 di alveo bagnato fino a 882 kJ/m^2 dopo 131 giorni dallo svaso con una perdita continua fino al giorno 88 quando tocca il minimo di 614 kJ/m^2 . La quantificazione in kJ/m^2 totale risulta essere la somma delle perdite giornaliere almeno fino al giorno 88 (minimo) senza considerare l'ipotizzabile ripresa dopo tale limite, quindi siamo in condizione minima di sicurezza dell'analisi.

La perdita giornaliera non è costante in quanto è rappresentata da una curva, come indicato nella figura 8, perciò utilizzeremo l'informazione della polinomiale per conoscere la perdita media giornaliera di exergia.

Nella tabella XIII si riportano i valori di exergia, come da equazione della curva, giorno per giorno con a fianco la differenza tra ogni giorno e il giorno precedente, definita come *delta* (Δ).

I valori dei *delta* ottenuti sono stati riportati su un grafico e descrivono una retta (Fig. 9). Conseguentemente si può rimarcare che il calo giornaliero, massimo nei primi giorni dallo svaso e minimo verso il giorno

88, la cui differenza e media dei delta (=12,33) sono costanti, corrisponde al giorno 44 il cui contenuto di exergia è pari a 783 kJ/m^2 . Perciò la perdita di exergia nell'arco di 88 giorni è 783 kJ/m^2 * 88 giorni, pari a 68.904 kJ/m^2 .

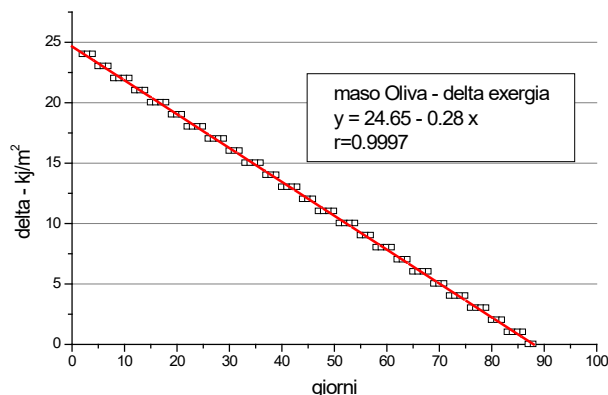


Fig. 9. Rappresentazione delle differenze giornaliere dei valori di exergia dal giorno 1 al giorno 88.

Tab. XIII. Valori di exergia giorno dopo giorno fino al giorno del minimo della curva.

giorni	kJ/m^2	Δ	giorni	kJ/m^2	Δ	giorni	kJ/m^2	Δ	giorni	kJ/m^2	Δ
1	1662	0	23	1197	18	45	867	12	67	673	6
2	1638	24	24	1179	18	46	855	12	68	667	6
3	1614	24	25	1161	18	47	844	11	69	662	5
4	1590	24	26	1144	17	48	833	11	70	657	5
5	1567	23	27	1127	17	49	822	11	71	652	5
6	1544	23	28	1110	17	50	811	11	72	648	4
7	1521	23	29	1093	17	51	801	10	73	644	4
8	1499	22	30	1077	16	52	791	10	74	640	4
9	1477	22	31	1061	16	53	781	10	75	636	4
10	1455	22	32	1045	16	54	771	10	76	633	3
11	1433	22	33	1030	15	55	762	9	77	630	3
12	1412	21	34	1015	15	56	753	9	78	627	3
13	1391	21	35	1000	15	57	744	9	79	624	3
14	1370	21	36	985	15	58	736	8	80	622	2
15	1350	20	37	971	14	59	728	8	81	620	2
16	1330	20	38	957	14	60	720	8	82	618	2
17	1310	20	39	943	14	61	712	8	83	617	1
18	1290	20	40	930	13	62	705	7	84	616	1
19	1271	19	41	917	13	63	698	7	85	615	1
20	1252	19	42	904	13	64	691	7	86	614	1
21	1233	19	43	891	13	65	685	6	87	614	0
22	1215	18	44	879	12	66	679	6	88	614	0

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si sono utilizzati i dati risultanti dal monitoraggio e controllo eseguito da Dolomiti-Edison in occasione dello svasso della diga di Mollaro per effettuare una elaborazione più articolata rispetto alla valutazione della qualità dell'ecosistema secondo i metodi indicati dalla normativa vigente.

Infatti i metodi di valutazione della qualità biologica del corso d'acqua attualmente indicati dalla normativa sono in grado di rispondere alla domanda "qual è la qualità dell'ambiente acquatico" ma non sono adatti a quantificare economicamente l'entità dello stress e l'impatto sull'ecosistema. In buona sostanza non sono lo strumento adatto per la valutazione del Servizio Ecosistemico.

Per questa ragione si è intrapresa una strada diversa, basata sui ruoli trofici e, soprattutto, sull'esame dell'energia interna al sistema in forma termodinamica, cioè sull'esame dell'exergia. Tale approccio ha dovuto però fare i conti con alcune debolezze dei dati di partenza come, ad esempio, la mancanza di una quantificazione numerica precisa delle presenze macrobentoniche, d'altronde il metodo IBE utilizzato non lo prevede ma esprime solo una stima di abbondanza per classi di numerosità (es. >20, >100 oppure > 300), oppure la mancanza del valore beta (β) per alcuni dei taxa rinvenuti.

La procedura utilizzata ha, perciò, sofferto di questa limitazione e il risultato finale potrebbe essere leggermente difforme dal valore reale.

Vi sono anche altre approssimazioni, come nel calcolo della biomassa benthonica, la quale, non essendo stata valutata nel lavoro suddetto, è stata ricavata dalle lunghezze medie degli individui moltiplicate per un co-

efficiente appropriato, oppure la misura dei metri quadri di alveo bagnato ricavati dall'analisi della cartografia e non da un rilievo topografico di campo.

A tutte queste limitazioni che potrebbero in qualche modo rendere debole il risultato finale si contrappone invece la presentazione di una procedura che sposta l'attenzione verso nuovi campi di valutazione e ragionamento, ovvero verso la possibilità di quantificare, in modo non approssimativo ma più reale, la dimensione di uno stress ambientale determinato da azioni atte a modificarne nel tempo e spazio le caratteristiche ecologiche, cioè stimare uno dei tanti Servizi Ecosistemici che un fiume può offrire.

Tale procedura potrebbe essere applicata anche come indice di "salute" e funzionalità di un ecosistema fluviale. Infatti anche la letteratura internazionale si sta muovendo in questo senso, utilizzando sempre più il concetto di exergia in ambito ecologico, anche se gioca un ruolo determinante la scarsa maturità dell'approccio che non ha ancora prodotto un numero significativo di pubblicazioni sull'argomento, sebbene le prospettive per una messa a punto anche di metodi di utilizzo pratico siano incoraggianti.

In conclusione si auspica che nelle prossime indagini di valutazione di un impatto o disturbo o stress ci sia la richiesta della valutazione dell'exergia eventualmente persa e della sua quantificazione.

Ringraziamenti

Si ringrazia la gentile disponibilità della società Dolomiti Edison Energy per aver concesso l'utilizzo dei dati e l'autorizzazione alla pubblicazione.

BIBLIOGRAFIA

- Allan J.D., Castillo M.M., 2007. *Stream Ecology. Structure and function of running waters*. Second Edition. Springer publisher, 436pp.
- Benke A., Huryn A.D., Smock L. A., Bruce Wallace J., 1999. Length-mass relationships for freshwater macroinvertebrates in North America with particular reference to the southeastern United States. *J. Sci. Am. Benthol. Soc.*, **18**(3): 308-343
- Buffagni A., Erba S., 2008. Definizione dello stato ecologico dei fiumi sulla base dei macroinvertebrati bentonici per la 2000/60/CE(WFD): il sistema di classificazione MacrOper. IRSA-CNR, *Notiziario dei Metodi Analitici*, numero speciale 2008: 24-46.
- Cordone A.J., Kelley D.W., 1961. The influences of inorganic sediment on the aquatic life of a stream. *California Fish and Game*, **47**: 189-228.
- Crosa G., Castelli E., Gentili G., Espa P., 2010. Effects of suspended sediments from reservoir flushing on fish and macroinvertebrates in an alpine stream. *Aquatic Sciences*, **72**(1): 85-95.
- Doretto A., Piano E., Bona F., Fenoglio S., 2018. How to assess the impact of fine sediments on the macroinvertebrate communities of alpine streams? A selection of the best metrics. *Ecological Indicators*, **84**: 60-69.
- Doretto A., Piano E., Fenoglio S., Bona F., Crosa G., Espa P., Quadroni S., 2021. Beta-diversity and stressor specific index reveal patterns of macroinvertebrate community response to sediment flushing. *Ecological Indicators*, **122**: 107256.
- Ercolani A.P., Areni A., Leone L., 2001. *Statistica per la psi-*

- cologia. I Fondamenti di psicometria statistica e descrittiva.* Il Mulino, Bologna.
- Espa P., Crosa G., Gentili G., Quadroni S., Petts G., 2015. Downstream ecological impacts of controlled sediment flushing in an Alpine valley river: a case study. *River Research and Applications*, **31**(8): 931-942.
- Fenoglio S., Bo T., 2007. *Lineamenti di ecologia fluviale.* CittaStudi Edizioni 252 pp.
- Fonseca J., Marches J., Paiva A., Freitas A., Madeira V., Jørgensen S.E., 2000. Nuclear DNA in determination of weighing factor to estimate exergy from organisms biomass. *Ecological Modelling*, **126**: 179-189.
- Ghetti P.F., 1997. *Manuale di applicazione. Indice Biotico Esteso (I.B.E.). I macroinvertebrati nel controllo della qualità degli ambienti di acque correnti.* Provincia Autonoma di Trento, 222 pp.
- Hogg I.D., Norris R.H., 1991. Effects of Runoff and Land Clearing and Urban Development on the Distribution and Abundance of Macroinvertebrates in Pool Areas of a River. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, **42**: 507-518.
- Hynes H.B.N., 1970. *The ecology of running waters.* Liverpool: Liverpool University Press
- ISPRA, 2017. Nuovo indice dello stato ecologico delle comunità ittiche. *ISPRA, Manuali e Linee Guida*, **159/2017**. 20 pp.
- Jaccard P., 1901. Étude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et des Jura. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, **37**: 547-579.
- Jørgensen S.E., 1995. Application of ecological indicators to assess the ecological condition of lakes. *Lakes Reserv. Res. Manag.*, **41**: 177-182.
- Jørgensen S.E., 2000. Application of exergy and specific exergy as ecological indicators of coastal areas. *Aquat. Ecosyst. Health*, **3**: 419-430.
- Jørgensen S.E., Verdonshot P., Lek S., 2002. Explanation of observed structure of functional feeding groups of aquatic macroinvertebrates by an ecological model and the maximum exergy principles. *Ecological Modelling*, **158**: 223-231.
- Jørgensen S.E., Odum H., Brown M., 2004. Exergy and exergy stored in genetic information. *Ecological Modelling*, **178**: 11-16.
- Yule G.U., 1900. *On the association of attributes in statistics.* Philosophical Transactions of the Royal Society of London.
- Kanoglu M., Dince I., Gengel Y.A., 2008. Exergy for better environment and sustainability. *Environ. Dev. Sustain.*, **11**: 971-988.
- Ludovisi A., Poletti A., 2003. Use of thermodynamic indices as Ecological indicators of the development state of lake ecosystems. 2. Exergy and specific exergy indices. *Ecol. Modell.*, **159**: 223-238.
- Merrit R.W., Cummins K.W., 2007. Trophic relationships of macroinvertebrates. In “*Methods in stream ecology*” pp. 585-610. Hauer F.R. & Lamberti G.A. Editors. Second edition, Elsevier publisher.
- Silow E.A., 1997. The possibility of use of structural exergy for ecosystem state assessment. ANSWER. Nanjing.
- Silow E.A., 1998. The changes of ecosystem goal functions in stressed aquatic communities. *J. Lake Sci.*, **10** (Suppl): 435-450.
- Silow E.A., 1999. The use of two lumped models for the analysis of consequences of external influences on the lake Baikal ecosystem. *Ecological Modelling*, **121**: 103-113.
- Silow E.A., 2006 Possibility of using goal functions for estimation of “health” of ecological aquatic systems: exergy. *Siberian Ecol. J.*, **3**: 269-284.
- Silow E.A., Oh I.H., 2004. Aquatic ecosystem assessment using exergy. *Ecol. Indic.*, **4**: 189-194.
- Sørensen T., 1948. A method of establishing group of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its vegetation on Danish commons. *Biologiske Skrifter / Kongelige Danske Videnskabernes Selskab*, **5**(4): 1-34.
- Steinborn W., Svirezhev Y. (2000) Entropy as an indicator of sustainability in agro-ecosystems: North Germany case study. *Ecological Modelling*, **133**(3): 247-257
- Wood P.J., Armitage P.D., 1997. Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental Management*, **21**(2): 203-217.