

Individuazione di un indice sintetico di qualità chimico-microbiologica delle acque superficiali mediante analisi multivariata: il caso del bacino del Torrente Enza

Silvia Franceschini¹, Franco Sartore², Roberto Spaggiari¹, Pierluigi Viaroli²

¹ Agenzia Regionale Prevenzione Ambiente dell'Emilia Romagna - Sezione di Reggio Emilia

² Dipartimento di Scienze Ambientali, Università di Parma

Ricevuto il 9.9.1999

Accettato il 20.12.1999

Riassunto

I dati relativi a 26 parametri raccolti per otto anni durante il monitoraggio delle acque effettuato dall'ARPA di Reggio Emilia nel bacino del torrente Enza sono stati elaborati statisticamente, al fine di evidenziare le informazioni ridondanti. Applicando l'analisi discriminante canonica si è giunti all'individuazione di un set minimo di variabili (nitrati, coliformi fecali, COD e fosforo totale) in grado di rappresentare in modo significativo la qualità delle acque con un minore rapporto costi/benefici. In particolare, in base ai risultati ottenuti, si propone l'utilizzo di un indice bidimensionale, composto da nitrati e coliformi fecali, facilmente integrabile con le attuali procedure di classificazione e capace di offrire, in relazione ai costi aggiuntivi, elevati vantaggi in termini di sorveglianza della qualità dei corpi idrici superficiali.

PAROLE CHIAVE: qualità delle acque / analisi discriminante canonica / inquinamento chimico-microbiologico / indice di qualità / rapporto costi-benefici

Abstract

Individuation of a synthetic index of chemical-microbiological surface water quality by means of multivariate analysis: the case of the basin of the Enza stream

The presence of redundant information in the 26 parameters used for water quality control, collected throughout eight years from ARPA of Reggio Emilia in the basin of Enza stream is verified by means of statistical analysis.

By applying canonical discriminant analysis a few significant parameters (nitrate, faecal coliforms, COD and total phosphorus) able to characterize environment with a low cost/benefit ratio. On the basis of results obtained it is proposed the use of a bidimensional index, based on nitrate and faecal coliforms, that can be easily integrated with current procedures and considered as convenient system to improve efficiency of surface water quality monitoring.

KEY WORDS: water quality control / canonical discriminant analysis / chemical-microbiological pollution / quality index / cost-benefit ratio

INTRODUZIONE

L'attività di monitoraggio costituisce un indispensabile strumento di controllo, di sorveglianza e di classificazione della qualità delle acque. Tale attività può essere effettuata in funzione dei criteri di qualità per specifica destinazione d'uso, oppure per definire più complessivamente il livello di qualità ambientale, come previsto dalla nuova normativa sulla tutela delle acque dall'inquinamento (D. Lgs. 152/99). Il giudizio di qualità così ottenuto costituisce il contributo fondamentale per indirizzare gli interventi di risanamento nell'ambito dei piani di attuazione delle politiche am-

bientali.

Il monitoraggio e la conseguente definizione di classi di qualità delle acque si basano sull'uso di indicatori, i quali devono fornire una rappresentazione sintetica delle condizioni ambientali ed essere caratterizzati da un ragionevole rapporto costi/benefici (OECD, 1994).

Gli organi preposti all'attività di monitoraggio svolgono generalmente il controllo periodico di numerosi parametri, con risultati onerosi, in termini di tempi e di costi. Secondo una stima dell'AUTORITÀ DI BACINO DEL Po (1995), nel bacino padano circa 1800 stazioni di

monitoraggio analizzano mediamente per ogni prelievo 19 parametri di costo compreso tra le 15 e le 22 mila lire, da cui deriva un costo complessivo annuo pari a circa 9,3 miliardi di lire.

La presente indagine si propone di esaminare le metodologie di monitoraggio attualmente utilizzate dall'ARPA di Reggio Emilia e individuare un set minimo di indicatori di qualità delle acque superficiali. La serie dei dati relativi ai 24 parametri rilevati mensilmente in sette stazioni del bacino del torrente Enza dal 1990 al 1997, è stata elaborata mediante l'utilizzo di tecniche di analisi multivariata, con i seguenti obiettivi:

- identificare i parametri "critici" in relazione alla caratterizzazione antropica del bacino considerato;
- individuare le possibili ridondanze;
- individuare il set minimo di variabili da analizzare per rappresentare in modo significativo la qualità delle acque, con maggiore frequenza e con un accettabile rapporto costi / benefici;
- confrontare il sistema di indicatori ottenuto con gli indicatori attualmente in uso.

AREA DI STUDIO

Il torrente Enza, che si estende con un bacino di 887,5 km² dal crinale tosco-emiliano alla confluenza nel fiume Po, è un corso d'acqua appenninico a regime torrentizio, in cui gli apporti di inquinanti e le consistenti derivazioni effettuate nel tratto pedemontano per uso irriguo ed idroelettrico determinano, specialmente nel periodo estivo, problemi di ordine quantitativo e qualitativo delle acque. I carichi inquinanti generati nel bacino derivano principalmente da fonti diffuse (spandimento di fanghi di depurazione e liquami zootecnici, uso di fertilizzanti), in quanto la Val d'Enza è caratterizzata da una forte vocazione agricola e zootecnica, mentre è limitato l'impatto delle aree più urbanizzate, le quali, anche al fine di preservare l'integrità idrogeologica della conoide, recapitano in parte i loro scarichi depurati nel limitrofo torrente Crostolo (AA.VV., 1986; MARCONI *et al.*, 1995).

MATERIALI E METODI

La procedura utilizzata per il monitoraggio delle acque prevede il rilevamento mensile di 26 parametri fisici, chimici e microbiologici in 7 stazioni di prelievo, di cui 5 localizzate sul corso principale dell'Enza e 2 in chiusura di bacino degli affluenti Tassobbio e Termina. I dati rilevati dal 1990 al 1997, corrispondenti a 740 casi, sono stati elaborati con il software statistico SPSS 8.0 per Windows. Ipotizzando l'esistenza di un gradiente di qualità delle acque, procedendo da

monte verso valle, si è applicata l'analisi discriminante canonica utilizzando le stazioni (numerata da 1 a 7) come variabile classificatoria. È stata utilizzata anche l'analisi delle componenti principali (PCA), tecnica utilizzata con successo in studi analoghi sulle acque superficiali (ANTONIETTI e SARTORE, 1996), che tuttavia, nel caso in esame, non ha portato a risultati significativi.

L'analisi discriminante è stata inizialmente applicata considerando tutte le variabili di tipo fisico-chimico (ad eccezione dei tensioattivi anionici, che figurano sempre al limite di rilevabilità) ed i principali indicatori di tipo microbiologico (coliformi totali e coliformi fecali) trasformati logaritmicamente.

RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati dell'analisi discriminante (Fig. 1) evidenziano l'esistenza di un trend monte-valle lungo il corso principale del torrente Enza: le stazioni 1, 2, 4, 6, 7 risultano infatti differenziate nel piano individuato dalle prime due funzioni discriminanti, le quali spiegano complessivamente l'89,8% della variabilità dei dati, mentre le stazioni 3 e 5, poste sugli affluenti, risultano distanziate dalle altre rispetto alla prima funzione e separate tra loro rispetto alla seconda.

Questa analisi fornisce un quadro generale della situazione che permette di confermare alcune delle ipotesi formulate, sebbene non consenta di caratterizzare le acque dal punto di vista dell'inquinamento. Infatti i coefficienti della matrice di struttura indicano che la prima funzione discriminante è correlata principalmente a variabili legate alla litologia dei sottobacini drenati (solfati, durezza, silice), mentre le variabili

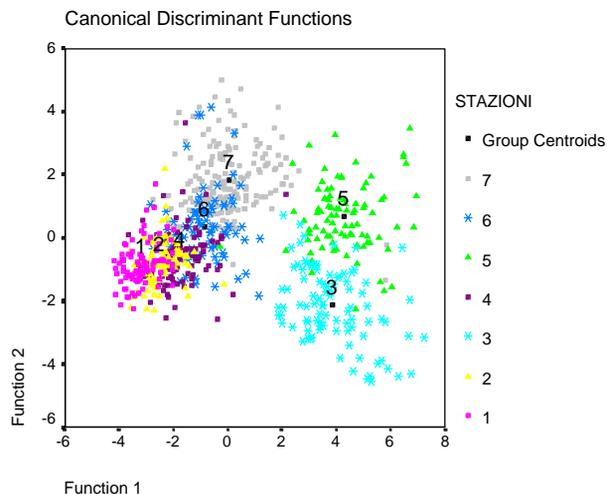


Fig. 1 – Rappresentazione grafica delle stazioni nel piano individuato dalle prime due funzioni discriminanti.

maggiormente significative emergono in modo apprezzabile soltanto nelle funzioni successive, che assumono progressivamente minore importanza.

Dal momento che le informazioni associate a dati di tipo "geologico" distorcono la distribuzione in modo indipendente dall'inquinamento, si è proceduto alla successiva eliminazione di gruppi di variabili.

Sono stati perciò esclusi dall'analisi i parametri dipendenti dalle caratteristiche naturali del suolo (solfati, durezza, silice), oltre alla temperatura dell'acqua, legata al gradiente termico altitudinale, e alla percentuale di ossigeno alla saturazione. Sono stati inoltre eliminati pH e conducibilità, due parametri chimico-fisici che risultano poco significativi in relazione all'inquinamento, in quanto il pH oscilla in un intervallo compreso tra 7 e 9, accettabile per l'ambiente considerato, e la conducibilità dipende fondamentalmente dalle caratteristiche idrochimiche di base delle acque (il 70% degli ioni presenti è costituito da cationi calcio e magnesio e da anioni carbonato e solfato).

È stata quindi valutata la presenza di informazioni ridondanti. Scatter esplorativi tra coppie di variabili (Fig. 2) hanno evidenziato alcune forti correlazioni, come quelle tra materiale in sospensione e torbidità e tra coliformi fecali e coliformi totali, tali da consentire l'eliminazione dall'analisi dei secondi elementi delle coppie, ritenuti meno significativi come indicatori.

Tra i parametri relativi all'inquinamento di tipo organico, COD e BOD₅, si è scelto di trascurare quest'ultimo, indicatore della frazione organica biodegradabile, a causa della alta frequenza con cui si presenta ai limiti della soglia di rilevabilità. Analogamente, per il carico eutrofizzante si è deciso di utilizzare il fosforo totale e non quello reattivo.

Si è inoltre osservato che i valori di portata presen-

tano una notevole eterogeneità tra le singole stazioni, come si può osservare dal confronto tra le distribuzioni di frequenza, riportate in figura 3.

Le portate presentano complessivamente distribuzione poissoniana, caratterizzata da elevata frequenza dei valori bassi; in particolare, nelle stazioni di monte e in quelle sugli affluenti, quasi il 100% dei valori misurati rientra nella prima classe (0-5 m³/s), mentre procedendo verso valle la distribuzione tende ad allargarsi con un numero crescente di casi che ricadono nelle classi più elevate. In questa fase quindi la portata è stata esclusa dall'analisi per evitare distorsioni legate all'eccessiva eterogeneità dei dati.

L'analisi discriminante applicata ai parametri rimasti mostra che le prime due funzioni discriminanti, che spiegano complessivamente l'85,9% della variabilità totale, sono principalmente correlate rispettivamente con l'azoto (nitrico e nitroso) e con il numero di coliformi fecali, e risultano quindi caratterizzate la prima da inquinamento di tipo chimico eutrofizzante e la seconda da inquinamento batteriologico.

In riferimento al regime idraulico si è effettuata inoltre la considerazione che gli eventi estremi di portata mascherano in una certa misura l'impatto degli inquinanti, tramite effetti di diluizione/concentrazione rilevabili anche dai diagrammi di dispersione delle principali variabili in relazione alle portate. Per questo motivo si è proceduto ad uno screening dei dati, eliminando i casi corrispondenti al primo ed all'ultimo decile dei valori di portata in ogni stazione. Tale operazione è stata realizzata separatamente sulle stazioni per evitare di penalizzare completamente le stazioni di monte e quelle degli affluenti. Questa procedura ha comportato l'eliminazione di 151 casi.

Nell'analisi successiva i cloruri hanno assunto un

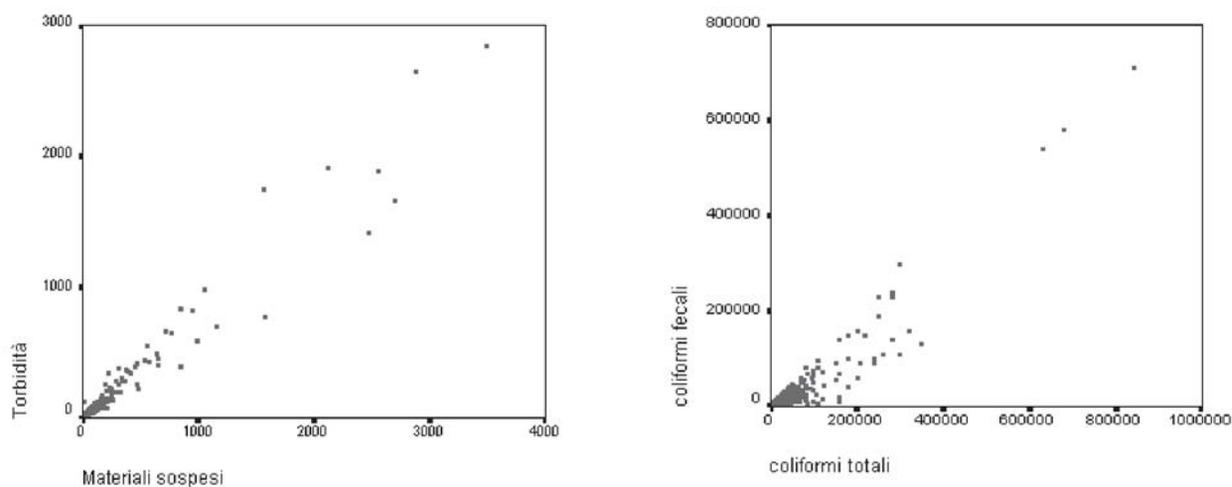


Fig. 2 - Diagrammi di dispersione di coppie di variabili ridondanti.

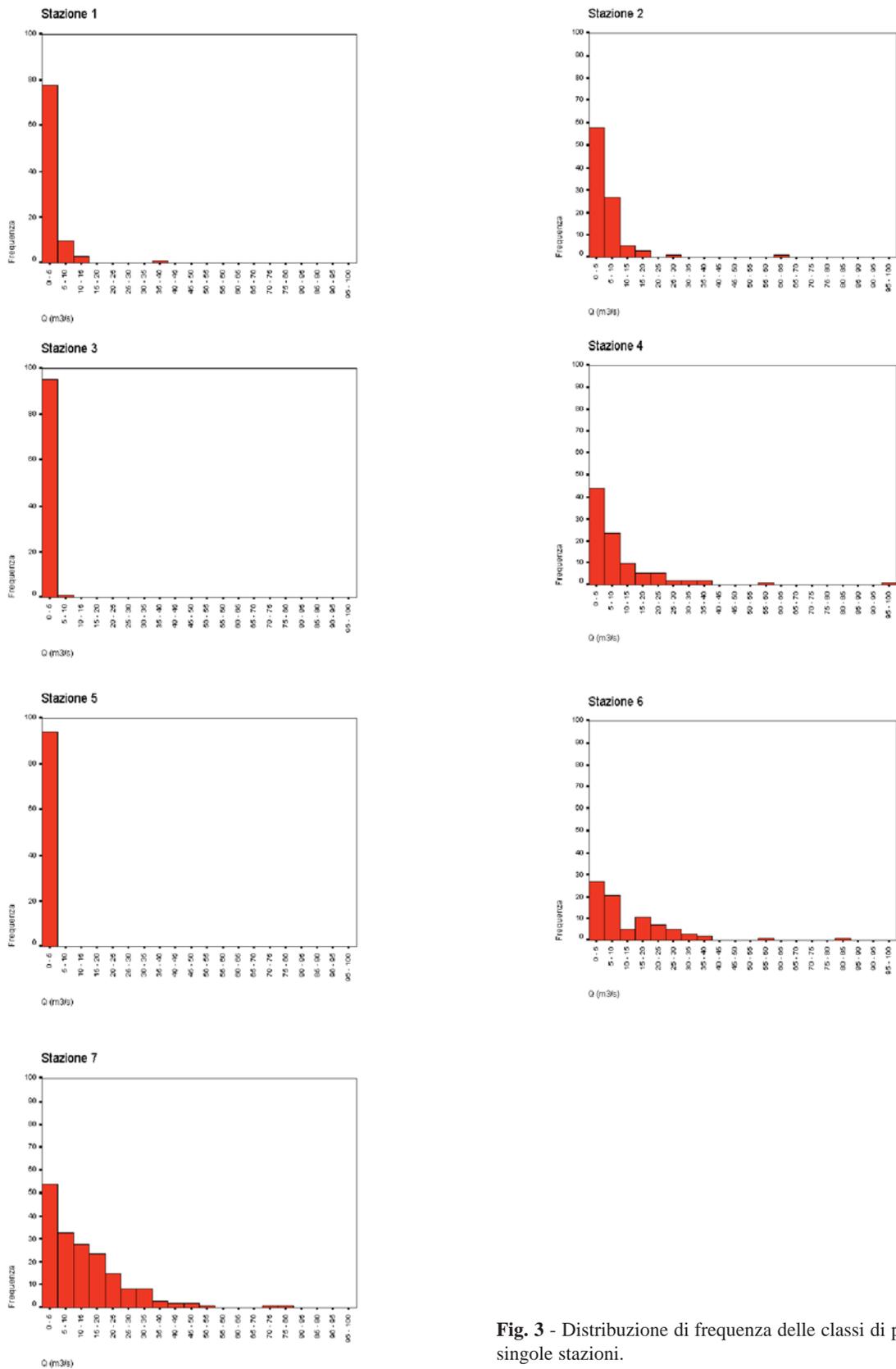


Fig. 3 - Distribuzione di frequenza delle classi di portata nelle singole stazioni.

peso rilevante nelle prime due funzioni discriminanti, in modo più evidente nell'analisi effettuata sulle sole stazioni del torrente Enza. Infatti, la vicinanza di una stazione agli scarichi di uno stabilimento termale provoca in questo anione la comparsa di picchi anomali. Trattandosi di una situazione peculiare e non generalizzabile, si è ritenuto opportuno eliminare i cloruri dalla lista delle variabili indicatrici di inquinamento.

Una ulteriore semplificazione è stata introdotta adottando i nitrati come unico indicatore sintetico delle componenti azotate, scelta motivata dal fatto che il rapporto fra azoto nitrico e azoto inorganico totale (ricavato come somma dell'azoto nitrico, nitroso e ammoniacale) risulta mediamente pari all'87%.

Infine, sono state eliminate due variabili di tipo fisico, ossigeno disciolto e materiali solidi sospesi, poiché si sono rivelate poco determinanti nella caratterizzazione delle funzioni discriminanti.

L'analisi applicata al termine di queste procedure ha permesso di individuare un set minimo di variabili, composto da nitrati, coliformi fecali, COD e fosforo totale, in grado di rappresentare in modo significativo la qualità delle acque. In particolare le prime due funzioni, che spiegano complessivamente il 96,8% della varianza cumulativa, sono fortemente correlate rispettivamente con nitrati e coliformi fecali (vedi coefficienti della matrice di struttura in Tab. I).

I risultati ottenuti giustificano il passaggio ad una rappresentazione bidimensionale di inquinamento com-

binato, caratterizzata da degrado chimico crescente lungo l'asse delle ascisse (concentrazione di nitrati) e degrado microbiologico crescente lungo l'asse delle ordinate (concentrazione di coliformi fecali). I punti situati lungo la diagonale principale di questo sistema corrisponderanno ad una situazione di massimo inquinamento complessivo.

Al fine di rendere operativa questa procedura di indagine si sono individuate delle classi di qualità delle acque, utilizzando i valori soglia previsti dal D.Lgs. 152/99 sulla tutela delle acque per il sistema di classificazione basato su macrodescrittori. Per la definizione delle classi di qualità dei coliformi fecali sono stati ritenuti validi con buona approssimazione i limiti proposti dalla tabella per *Escherichia Coli*, che ne rappresenta mediamente una frazione pari al 90%. L'estrema variabilità di questo parametro ha reso inoltre necessaria la sua rappresentazione in scala semilogaritmica (Tab. II).

L'indicatore può essere utilizzato nella versione grafica nella quale le stazioni di campionamento e le classi di qualità così definite sono riportate nel piano

Tab. I – Matrice di struttura relativa all'analisi discriminante applicata alle 4 variabili selezionate

	Structure Matrix			
	Function			
	1	2	3	4
nitrati	.936*	-.341	.005	-.085
coliformi fecali (ln)	.437	.783*	-.326	.299
C.O.D	.346	.464	.815*	.015
fosforo totale	.400	.551	.412	-.605*

Pooled within-groups correlations between discriminating variables and standardized canonical discriminant functions

Variables ordered by absolute size of correlation within function.

*. Largest absolute correlation between each variable and any discriminant function

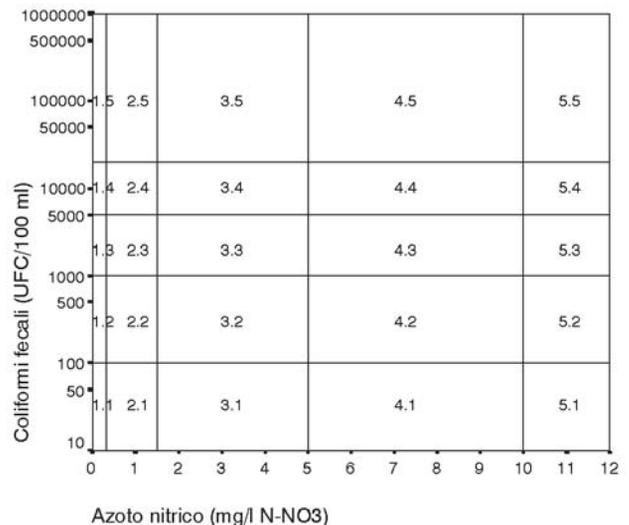


Fig. 4 - Rappresentazione grafica del sistema di classificazione basato sull'indice bidimensionale

Tab. II - Valori soglia utilizzati per la definizione di classi di qualità

Parametro	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5
N-NO ₃ (mg/l)	< 0,3	≤ 1,5	≤ 5	≤ 10	> 10
Coliformi fecali (UFC/100ml)	< 100	≤ 1.000	≤ 5.000	≤ 20.000	> 20.000

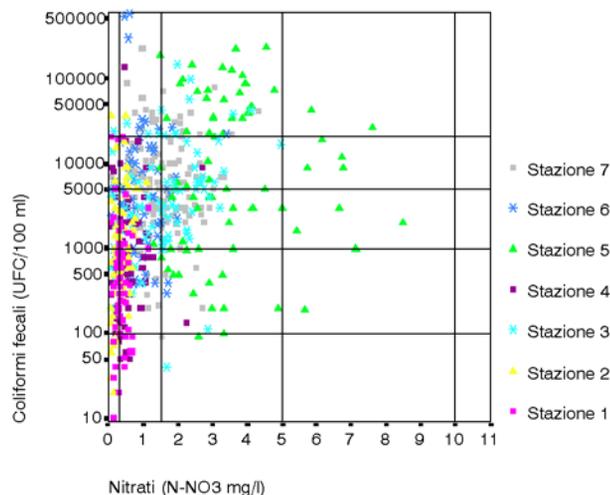


Fig. 5 - Classificazione grafica delle acque del t. Enza (1990-1997).

individuato da nitrati (in ascissa) e da coliformi fecali (in ordinata). La griglia di assi che passano per i valori limite di cui alla tabella I suddivide il piano in porzioni, ciascuna delle quali individua una classe di qualità combinata (Fig. 4).

I casi relativi al t. Enza nel periodo 1990-1997, a meno degli eventi estremi di portata eliminati, si distribuiscono nella griglia come mostrato in figura 5, in cui i casi figurano distinti in base alla stazione di appartenenza.

Dalle rappresentazioni ottenute si possono trarre le seguenti considerazioni:

- le stazioni appartenenti al tratto montano e pedemontano (n. 1, 2, 4) presentano mediamente modeste concentrazioni di nitrati, ma valori anche elevati di coliformi, distribuendosi graficamente nella sezione individuata dalle classi 1-1, 2-1, 2-5 e 1-5;
- le stazioni di pianura ed in chiusura di bacino presentano un degrado maggiore, che le fa ricadere nell'area compresa fra le classi 2-3, 3-3, 3-5 e 2-5;
- gli affluenti presentano complessivamente una scadente qualità delle acque; in particolare il t. Termina si colloca nell'area superiore destra del grafico, corrispondente alla situazione di massimo inquinamento combinato.

In base al sistema di classificazione proposto, il torrente Enza risulta caratterizzato da un trend di inquinamento chimico crescente da monte (dove le concentrazioni di nitrati non superano gli 1,5 mg/l) verso valle; questo andamento è interrotto in corrispondenza delle situazioni di maggiore degrado degli affluenti (in particolare il t. Termina), che presentano picchi di concentrazioni superiori ai 5 mg/l tali da giustificare la collocazione in quarta classe. L'inquinamento batte-

riologico stimato attraverso il rilevamento dei coliformi fecali risulta invece piuttosto elevato lungo tutto il corso del torrente, anche se caratterizzato da estrema variabilità, con picchi massimi che superano anche di diversi ordini di grandezza i valori mediamente registrati. Questo fenomeno interessa sia le stazioni di monte, dove si raggiunge saltuariamente anche il limite di 20.000 UFC/100 ml che separa la quarta dalla quinta classe, sia le stazioni di valle, dove i valori medi ricadono mediamente in terza e quarta classe e gli eventi "anomali" assumono proporzioni dell'ordine di 200-500.000 UFC/100 ml.

CONCLUSIONI

Dalla presente ricerca risulta che, fra tutti i parametri attualmente utilizzati nel sistema di monitoraggio del torrente Enza, quelli relativi a nitrati, COD, fosforo totale e coliformi fecali possono essere identificate come "fattori critici" in relazione ai fenomeni di inquinamento (comprendente le componenti di tipo organico, eutrofizzante e microbiologico). Il set di parametri così individuato è in grado di rappresentare in modo significativo la qualità delle acque con un minore rapporto costi/benefici, in seguito all'eliminazione di informazioni ridondanti.

In particolare si propone un sistema di sorveglianza della qualità delle acque basato sull'utilizzo di un indice bidimensionale, composto dai parametri che sono risultati maggiormente significativi nella caratterizzazione delle acque del bacino: nitrati e coliformi fecali, indicatori rispettivamente di inquinamento eutrofizzante di origine diffusa (agricoltura, zootecnia) e di inquinamento microbiologico di origine prevalentemente civile. Esso costituisce un sistema di sorveglianza e di primo allarme facilmente interpretabile ed applicabile a basso costo, a completamento delle attuali procedure, rendendo possibile una intensificazione dei controlli e l'analisi dei trends di qualità su entrambe le scale spaziale e temporale (a medio e lungo termine) con un dettaglio maggiore di quanto oggi consentito.

Dall'esame dei costi legati all'attività di monitoraggio, dedotti dal Tariffario ARPA 1998, è possibile effettuare una valutazione economica dell'applicazione di tale sistema.

Nella tabella III sono riportati a confronto i costi di ogni rilevamento effettuato sulle sette stazioni del bacino del t. Enza, nel caso della procedura corrente e in quello della procedura semplificata. Certamente il contributo informativo apportato nei due casi è differente, ma il consistente divario esistente sul piano economico rende particolarmente interessanti i vantaggi ottenibili dall'applicazione del secondo.

La nuova normativa prevede che il monitoraggio

Tab. III - Costo delle attività di monitoraggio nel bacino del t. Enza.

Costi (L)	Sistema a 7 parametri	Sistema a 2 parametri
Costo delle analisi	285.000	60.000
Spese di campionamento	40.000	40.000
Totale per ogni prelievo	325.000	100.000
Totale sulle 7 stazioni	2.275.000	700.000

Tab. IV - Bilancio costi/benefici relativo all'applicazione del sistema di monitoraggio integrato nelle due ipotesi.

Opzioni di utilizzo ipotizzate	Vantaggi ottenibili in termini di frequenza di controlli	Costi aggiuntivi richiesti (migliaia di lire)
1. Come integrazione quindicinale dell'attuale procedura	Raddoppio della frequenza (da 12 a 24)	Maggiorazione del 30% rispetto ai costi attuali (27.300 - 35.700)
2. 8 volte all'anno, in sostituzione del monitoraggio ufficiale	Triplicazione della frequenza (da 4 a 12)	Maggiorazione del 60% rispetto ai costi previsti (9.100 - 14.700)

delle acque superficiali venga effettuato con frequenza mensile, fino al raggiungimento dell'obiettivo di qualità pari a una II classe (buona) su tutto il corso d'acqua, conseguito il quale la frequenza potrà divenire trimestrale. Sulla base del bilancio costi/benefici, riportato nella tabella IV, si possono quindi configurare due diverse opzioni di utilizzo dell'indice proposto:

1. Allo stato attuale, una applicazione con frequenza mensile, come integrazione quindicinale della corrente procedura, allo scopo di garantire una maggiore continuità di controllo;
2. Nell'ipotesi di raggiungimento dell'obiettivo di buona qualità delle acque, una applicazione 8 volte all'anno in sostituzione del monitoraggio ufficiale, che verrebbe effettuato soltanto 4 volte: questa soluzione consentirebbe di mantenere comunque una costante attività di sorveglianza a costi ragionevoli.

In conclusione, il sistema di sorveglianza proposto costituisce una possibile valida integrazione dell'attuale sistema di monitoraggio nel bacino del t. Enza, in quanto basato sul controllo di due parametri (nitrati e coliformi fecali) risultati critici nella definizione dell'inquinamento delle acque e rilevabili con elevata frequenza ad un contenuto rapporto costi/benefici.

In particolare, secondo le due ipotesi configurate, l'utilizzo di tale indice consentirebbe di raddoppiare la frequenza dei controlli nella situazione attuale con una maggiorazione dei costi del 30% circa, e di triplicarla, nell'ipotesi del miglioramento diffuso (obiettivo di II classe) della qualità delle acque del torrente, con una maggiorazione del 60% circa. In definitiva, esso offre, in relazione ai costi aggiuntivi richiesti, elevati vantaggi ottenibili in termini di sorveglianza della qualità dei corpi idrici superficiali.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., 1986 - Primi lineamenti del Piano di risanamento idrico del bacino del T. Enza. Provincia di Reggio Emilia.
- Antonietti R., Sartore F., 1996 - Optimization of parameters used for freshwater survey. *Wat. Res.*, **30** (6): 1535-1538.
- Autorità di Bacino del Fiume Po, 1995 - Rapporto sullo stato della collaborazione con la National Rivers Authority sul monitoraggio della qualità delle acque. Parma.
- Marconi M., Messori R., Spaggiari R., 1995 - L'acqua. In:

“Rapporto sullo stato dell'ambiente della provincia di Reggio Emilia” a cura di M. Anceschi. Provincia di Reggio Emilia.

OECD, 1994 - Environmental Indicators, Paris

Spaggiari R., Messori R., 1995 - Definizione della qualità dei corpi idrici mediante il monitoraggio chimico e biologico e sua evoluzione nel tempo. Presidio Multizonale di Prevenzione, Azienda U.S.L. di Reggio Emilia, Reggio Emilia.