

STUDIO E RIQUALIFICAZIONE DELLA QUALITÀ DEI CORPI IDRICI SUPERFICIALI: IL PROGETTO PILE

Franco SALERNO, Elisa BURASCHI, Gianni TARTARI

Istituto di Ricerca Sulle Acque, CNR, Località Occhiate, 20047 Brugherio, Milano,
tel. +39/039/216941, fax +39/039/2004692, salerno@irsa.cnr.it

RIASSUNTO

Questo lavoro focalizza l'attenzione su una proposta metodologica che permette di stimare il carico di fosforo che giunge agli ambienti lacustri, tenendo conto sia della variabilità spaziale del territorio sia dei processi fisici che determinano la formazione del deflusso idrico e del trasporto di nutrienti. Probabilmente, il solo approccio che può garantire un'adeguata stima dell'inquinamento diffuso e puntiforme, è l'utilizzo di modelli (in questo caso il modello SWAT) in grado di simulare la qualità delle acque, calibrati e validati direttamente attraverso misure in campo. La complessità dei bacini idrografici, includendo nell'analisi l'integrazione dei risultati di una moltitudine di aspetti naturali ed antropici, necessita di un approccio distribuito reso possibile dall'utilizzo di un sistema GIS, che permette una comparazione topologica delle informazioni territoriali. I risultati di questo lavoro, applicati al caso del Lago di Pusiano, hanno permesso di ricavare il carico attuale di fosforo confermando che le cause che determinano l'attuale grado di trofia del lago è l'apporto eccessivo derivante dalle acque di scolo del collettore consortile.

ABSTRACT

This work focuses the attention on a methodological proposal that allows estimating the phosphorus load arriving at lacustrine environment, considering both the spatial variability and physical processes cause the formation of the flow and of the nutrient transport. Probably, the only approach which can guarantee a suitable estimate of *point* and *non-point* pollution, is the application of a quality water model (in this case the SWAT model), calibrated and validated directly through field measures. The complexity of hydrographical basins, including in the analysis a multitude of natural and anthropic aspects, needs a distributed approach made possible by a GIS support, which allows a topologic comparison of territorial data. The results of this work, applied to Pusiano Lake case study, allowed knowing the actual phosphorus load, confirming that the causes producing the current trophic degree of the lake are due to the storm water overflows of the sewer network.

Introduzione

La Direttiva Europea sulle Acque (Direttiva 00/60/CE, WFD) nello stabilire il raggiungimento degli obiettivi di qualità dell'ecosistema acquatico, pone in primo piano la riduzione delle fonti inquinanti presenti nel bacino idrografico. La volontà di protezione viene espressa come miglioramento della qualità dal punto di vista biologico, assegnando un ruolo principale alla valutazione dello stato delle comunità di organismi che popolano un ambiente quale mezzo attraverso il quale esprimere la valutazione della qualità dello stesso. Il principale fattore di pressione per i laghi è determinato dalla quantità di nutrienti che vengono immessi e dalla modalità di immissione. In generale, la distinzione tra sorgenti puntiformi (*point*) e diffuse (*non-point*) consente una grossolana classificazione della

maggior o minor capacità di contenimento e trattamento degli inquinanti. Questa classificazione implicitamente sottolinea anche una distinzione tra maggior o minor capacità di stimare e misurare i carichi inquinanti, più semplice per i puntiformi, più complessa per i diffusi.

Le sorgenti di inquinamento urbano ed industriale sono usualmente considerate sorgenti puntiformi, facilmente identificabili e controllabili. In Italia però è comune la situazione in cui il collettamento delle acque reflue funziona secondo un sistema misto, con una rete fognaria dotata di scolmatori di piena che riversano il carico in eccesso in corsi d'acqua adiacenti. Nel caso di bacini idrografici, che includono ambienti lacustri nel loro ambito, il carico veicolato da immissari recettori può costituire un'importante voce del carico totale di nutrienti che perviene al lago. Questa situazione è molto frequente nel territorio subalpino altamente antropizzato dell'Italia settentrionale.

L'Istituto di ricerca sulle acque del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IRSA) nel 2002, ha avviato il Progetto PILE (*Pusiano Integrated Lake/Catchment Experimental Project*) per contribuire all'individuazione delle relazioni tra pressioni antropiche e il livello trofico dei corpi idrici superficiali. Le ricerche sono state condotte nel bacino imbrifero del Lago di Pusiano (Provincia di Como e Lecco), caratterizzato da un elevato grado di urbanizzazione che ha determinato, negli ultimi trent'anni, il persistere di una condizione di eutrofia, situazione tipica di molti corpi idrici dell'area prealpina.

L'IRSA con il progetto PILE sul Lago di Pusiano ha inteso sviluppare una metodologia per studiare i processi di trasporto di nutrienti, in particolare in aree fortemente urbanizzate, per comprendere le cause e le possibilità di intervento sulle condizioni trofiche degli ambienti lacustri recettori.

Il caso di studio

Il Lago di Pusiano è situato tra i due rami del Lago di Como. Il suo bacino idrografico (circa 100 km²), presenta ben il 12% di territorio urbanizzato e localizzato prevalentemente in prossimità del corpo lacustre, in una matrice forestata e con una pressione agricola trascurabile. Tale situazione è pressoché ideale per studi di *runoff* urbano tipica dell'area prealpina italiana.

Fino a metà degli anni '80 l'immissione diretta dei reflui civili ed industriali nelle acque del principale affluente, il Fiume Lambro, e degli altri affluenti rivieraschi minori, ha determinato livelli di ipertrofia con valori di fosforo totale prossimi ai 200 µg P/l (Tartari, Quattrin, 1998). In tale periodo le opere di collettamento realizzate, che portarono alla deviazione fuori bacino del 70-80% degli scarichi, hanno permesso una sensibile riduzione dei carichi di nutrienti ed un progressivo miglioramento della qualità trofica delle acque, evidenziata da una riduzione di circa il 70% delle concentrazioni di fosforo alla circolazione invernale. I segni di ripresa sono andati però attenuandosi nel tempo, fino a raggiungere nell'ultimo decennio una condizione stabile di eutrofia con un contenuto di fosforo totale alla circolazione invernale di 67 µg P/l. E' evidente quindi che si è ancora lontani da uno stato ecologico buono, secondo quanto indicato dai D.lgs 152/99 e dalla WFD, che per questo ambiente è individuabile nella condizione di mesotrofia (30 µg P/l).

Nel bacino idrografico del Lago di Pusiano esistono sorgenti puntiformi legate alla presenza di un numero elevato di scaricatori di piena, dislocati lungo il collettore consortile, sorgenti diffuse derivanti dalle superfici impermeabili urbane e sorgenti puntiformi derivanti da circa l'8%, nell'anno 2003, di popolazione non ancora collettata. La tipologia dominante di rete fognaria dei Comuni ricadenti nel bacino del Lago di Pusiano, che vengono serviti da un impianto di depurazione collocato fuori dal bacino idrografico del lago, è di tipo misto che convoglia contemporaneamente acque meteoriche ed acque reflue civili ed industriali. La carta di figura 2 evidenzia lungo il collettore consortile la presenza di ben 74 scolmatori di piena. Molto probabilmente non tutti entrano in funzione durante gli eventi meteorici, ma è evidente che l'entità della pressione che essi esercitano sulla qualità delle acque del Fiume Lambro e di conseguenza sul Lago di Pusiano è necessariamente elevata e richiede un'adeguata quantificazione, operazione che si è cercato di effettuare nel corso del Progetto PILE.

L'approccio modellistico: SWAT

La descrizione dell'idrologia a scala di bacino e la simulazione degli apporti di nutrienti, con particolare riguardo al fosforo, che rappresenta l'elemento nutriente limitante la crescita algale del Lago di Pusiano, è stata condotta utilizzando il modello SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*, Arnold et al., 1993), sviluppato per predire l'impatto della gestione del territorio ed il rilascio di sedimenti e nutrienti in bacini idrologici di medie e grosse dimensioni. SWAT è un modello fisico e per questo motivo non incorpora funzioni di regressione, ma vengono richieste specifiche informazioni riguardanti la meteorologia, la pedologia, la topografia, la vegetazione, le aree agricole e le sorgenti puntiformi di inquinamento. SWAT utilizza come interfaccia grafica ArcViewTM 3.x (ESRI): in questo modo, il modello offre la possibilità di incorporare, nelle equazioni che simulano i processi idrologici e di qualità, la variabilità spaziale di molteplici aspetti territoriali. I dati, disponibili direttamente in forma georeferenziata, costituiscono gli input con il software del modello che provvede a simulare i processi idrologici e di qualità. Piuttosto che effettuare regressioni tra pochi dati di input, SWAT richiede specifiche informazioni sul clima, sulle proprietà del suolo, sulla topografia, sulla vegetazione e sulle pratiche di gestione agricola. Nelle figure seguenti vengono riportati i tematismi e le principali basi dati utilizzate nel caso di studio: nella figura 1 sono indicate le stazioni meteorologiche e la copertura pedologica ottenuta attraverso un modello l'intersezione delle caratteristiche fisiche della carta litologica, delle pendenze e dell'uso del suolo (Salerno, 2005), nonché, sulla destra, la distribuzione della copertura vegetale e delle superfici agricole presenti nel bacino Idrografico del Lago di Pusiano.

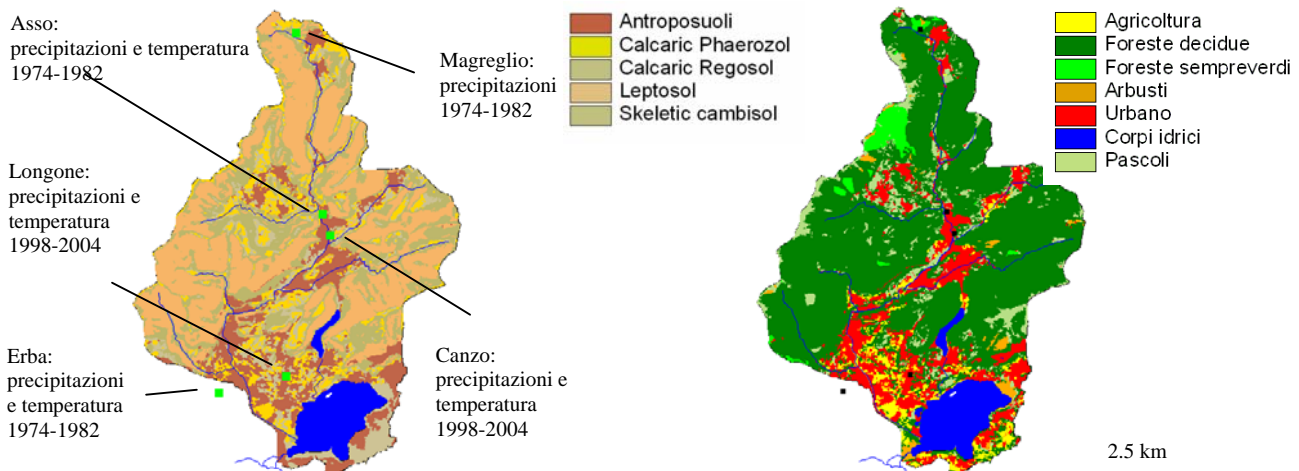


Figura 1 – Copertura pedologica e localizzazione delle stazioni meteorologiche (sinistra) e copertura vegetale ed aree agricole (destra)

I dati climatici richiesti da SWAT sono la temperatura massima e minima, le precipitazioni, la radiazione solare e l'umidità relativa. Per la temperatura e per le precipitazioni sono state utilizzate le serie storiche disponibili (figura 1), mentre per sopperire alla mancanza di dati di radiazione solare e umidità relativa, per il calcolo dell'evapotraspirazione, si è utilizzata l'equazione di Hargreaves-Samana (Allen, 1998) che necessita solo dei dati di temperatura. I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli derivati dall'applicazione dell'equazione di Penman-Monteith (Allen, 1998), per il periodo 1999/2001, per il quale tutti i dati erano disponibili. Gli alti valori di correlazione ottenuti per il confronto ($R^2=0.84$), hanno permesso di considerare corretta l'evapotraspirazione calcolata con Hargreaves-Samana. Successivamente l'inserimento nel modello di un adeguato valore di Leaf Area Index (LAI) (Cutini, 1998) ha permesso di stimare correttamente l'evapotraspirazione reale.

Nel corso degli anni recenti nel bacino del Lago di Pusiano, oltre alla raccolta dei dati idrologici, si è anche condotta una caratterizzazione dello stato di qualità delle acque fluviali in diverse sezioni del Fiume Lambro. Su 10 sezioni fluviali (figura 2) la campagna di monitoraggio è iniziata nell'anno 2002 e si è conclusa il Maggio 2004.

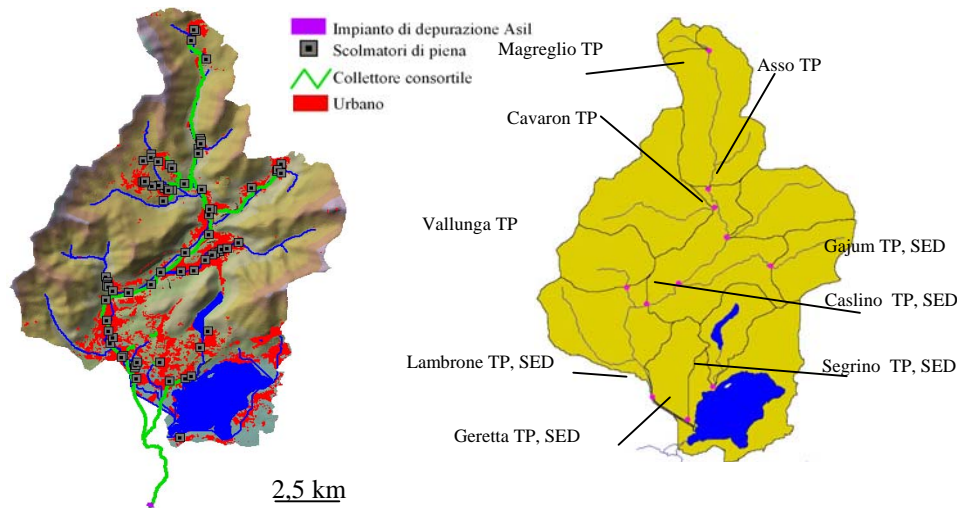


Figura 2 - Collocazione degli scolmatori di piena (sinistra) e punti di campionamento della qualità delle acque fluviali (destra)

Per il campionamento del sedimento in sospensione (SED) le analisi sono state invece condotte solo nel anno 2004 e solo su 5 sezioni. In questo periodo sono state anche effettuate le analisi relative alla componente disciolta di fosforo (TDP) e, per sottrazione dal fosforo totale (TP), quella legata al particolato (PP). Insieme a queste frazioni si è analizzato il fosforo reattivo (P-PO₄), mentre per i campionamenti in cui il TDP non è stato analizzato, il P-PO₄ è servito per stimare il valore di TDP, utilizzando a tale scopo la media del rapporto TDP/P-PO₄. Le forme di fosforo simulate dal modello, distinte in fosforo minerale (minP) e fosforo organico (orgP), sono state confrontate rispettivamente con il TDP e il PP, secondo quanto indicato in Tolson et al. (2004). Il periodo in cui si disponeva dei campionamenti dell'asta fluviale è stato fatto coincidere con il periodo di calibrazione del modello e pertanto per il fosforo il modello risulta tarato dal 2002 al 2004 e per i sedimenti a partire dai primi di gennaio del 2004.

Risultati e discussione

Nelle simulazioni idrologiche degli affluenti del Lago di Pusiano il modello SWAT è stato calibrato e validato per parte settentrionale del bacino dal 1971 al 1982 e poi applicato dal 2001 al 2004, ottenendo buoni risultati nel confronto tra la portata giornaliera osservata e quella simulata dal modello: R^2 0,81, E_{NS} 0,62 per la calibrazione; R^2 0,74, E_{NS} 0,67 per la validazione (Salerno et al., 2004). Successivamente, per mezzo del confronto di caratteristiche tra sottobacini analoghi, i risultati ottenuti sono stati estesi a tutto il resto del bacino, giungendo a definire il bilancio idrologico complessivo del lago. Il confronto tra le variazioni di volume del lago osservata e simulata a livello settimanale, per il periodo analizzato (1/5/2003 al 31/5/2004), ha evidenziato un coefficiente di correlazione R^2 di 0,58 e un E_{NS} di 0,57 (Salerno, 2005). Per il trasporto di sedimenti e nutrienti, SWAT modella invece i processi erosivi secondo la Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE, Williams, 1975), mentre per il carico di sedimento proveniente dalle superfici urbane, SWAT utilizza il meccanismo del “*build up and wash off*” (Huber, Dickinson, 1988). Durante i periodi secchi la polvere e lo sporco vengono generati (*build up*) sulle superfici impermeabili, mentre durante un evento di precipitazione il *runoff*

rimuove (*washoff*) questi inquinanti e li trasporta nel fiume. L'opzione "*buildup and wash off*" viene applicata alla porzione impermeabile dell'area urbana, mentre per la restante parte, SWAT utilizza le equazioni relative alle superfici naturali. Determinato il carico solido dalle superfici impermeabili, SWAT calcola il carico di fosforo moltiplicando il carico di sedimento per una concentrazione di fosforo che deve essere individuata sperimentalmente. L'impossibilità fino ad oggi di disporre nel bacino del Pusiano di una stima adeguata dell'apporto di fosforo da ciascuno scolmatore di piena, ha indotto a modellizzare il loro contributo come se si fosse trattato di un carico diffuso da superfici urbane, incrementando il coefficiente di rilascio di queste ultime (portato a 900 mg P/kg rispetto a un valore medio di 196 mg P/kg).

Il processo di calibrazione del particolato ha dato buoni risultati, con R^2 e E_{NS} per tutte le 5 sezioni con valori superiori a 0,90. Molto importante nel processo di simulazione del trasporto del fosforo è stata la definizione del rateo di arricchimento, definito come la concentrazione di fosforo trasportato con il sedimento rispetto alla concentrazione di fosforo nel suolo. Ottimizzato questo parametro, le simulazioni giornaliere di TP, TDP e PP, per ognuna delle 10 sezioni, sono state confrontate con i carichi ottenuti dalle concentrazioni misurate nel fiume per le portate simulate dal modello idrologico di SWAT. La tabella 3 riassume i risultati ottenuti per il minP/TDP e l'orgP/PP e per il fosforo totale (TP) ed evidenzia una migliore aderenza nella simulazione per il fosforo organico (R^2 0,95 e E_{NS} 0,94), rispetto al fosforo minerale (R^2 0,66 e E_{NS} 0,56). Questa minore efficienza per minP/TDP può essere dovuta essenzialmente al fatto che il trasporto di PP è strettamente connesso con le dinamiche idrologiche e con il trasporto di particolato. Pertanto la bontà delle simulazioni ottenute per queste ultime rafforza di conseguenza la capacità del modello di simulare correttamente il fosforo particolato. Contrariamente, il TDP risente meno di questi processi. Va comunque sottolineato che il fosforo nel bacino del Lago di Pusiano è di origine prevalentemente antropica, mentre il modello SWAT simula correttamente solo i processi di mineralizzazione che avvengono nel suolo. Comunque, ai fini della definizione del carico di TP che giunge al Lago di Pusiano, la minore efficienza nella stima del minP non ha pregiudicato i risultati nel loro complesso, essendo infatti il rapporto tra TDP e PP nei campioni dell'ordine 1:10, in media. In tabella 3 si può notare infatti che il TP medio per il bacino ha un R^2 di 0,93 e un E_{NS} pari a 0,92.

Tabella 3 - Risultati della calibrazione del fosforo

	minP		orgP		TP	
	R^2	E_{NS}	R^2	E_{NS}	R^2	E_{NS}
Numero sottobacini	10		10		10	
Minimo	0,30	0,35	0,23	0,52	0,66	0,34
Media bacino	0,66	0,56	0,95	0,94	0,93	0,92
Massimo	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99

Il modello SWAT, così calibrato, è stato applicato per il periodo 2000/2003 valutando un carico annuale medio complessivo di TP in entrata al lago di 12,6 t/a, in ottimo accordo con i carichi sperimentali ottenuti in altre indagini (Tartari, Quattrin, 1998; Salerno, 2005).

Conclusioni

Il carico di fosforo totale (esterno ed interno) in entrata in un lago determina la concentrazione media pelagica alla circolazione invernale. Una stima del carico totale che consentirebbe di aggiungere l'obiettivo di qualità di 30 $\mu\text{g P/l}$ per il Lago di Pusiano, considerato come realistico dal Piano di Tutela ed Uso delle Acque della Lombardia, è stata effettuata utilizzando il modello stocastico di Vollenweider (1976), che mette in relazione il carico di fosforo con il rapporto tra la profondità media e il tempo di ricambio (OECD, 1982). Depurando il carico totale ottenuto del carico interno (Vuillermoz, 2003) si è quindi stimato che il raggiungimento dell'obiettivo di qualità può essere ottenuto con un

carico esterno di 5,4 t/a. Sulla base di queste valutazioni si può quindi concludere che considerando attualmente un carico esterno di 12,6 t/a, per raggiungere l'obiettivo di mesotrofia, considerato lo stato trofico "obiettivo", si renderà necessaria una riduzione di circa 7 t/a del carico esterno, un valore recentemente ritenuto imputabile alla presenza del numero rilevante di scolmatori di piena (74) ed oggetto di verifica sperimentale.

La coerenza dei risultati ottenuti con un modello geograficamente distribuito come SWAT con quelli sperimentali evidenzia bene il livello di sviluppo raggiunto dalle tecniche GIS nel supportare modelli "fisici" molto complessi, gli unici che in prospettiva sono in grado di divenire uno strumento gestionale efficace.

L'applicazione del modello SWAT ha rappresentato una delle maggiori fasi del Progetto PILE, a cui si sono affiancati studi limnologici intensivi orientati alla identificazione di alcuni dei processi abiotici e biotici che determinano la qualità delle acque lacustri, in un'ottica orientata (Salerno, 2005) a definire le linee guida per il risanamento del lago.

Riferimenti bibliografici

- Allen R.G., Pereira L.D., (1998) "Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements", FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome
- Arnold J.G., Allen P.M., Bernhardt G. (1993), "A comprehensive surface groundwater flow model", *Journal of Hydrology* 142: 47-69
- Cutini A. (1998) "Estimation of leaf area index with the Li-Cor LAI 2000 in deciduous forest", *Forest Ecology and Management*, 10: 55-65
- Huber W.C., Dickinson R.E. (1988), "*Storm water management model, version 4: user's manual*", U.S. Environmental Protection Agency, Athens . 237 pp.
- OECD (1982), *Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control*. O.E.C.D., Parigi. 164 pp.
- Salerno F. (2005) "*Utilizzo di sistemi radar meteorologici nella modellizzazione degli apporti di nutrienti ai corpi idrici superficiali*", Tesi di Dottorato, Università dell'Insubria. 333 pp.
- Salerno F., Boguniewicz J., Buraschi E., Vuillermoz E., Tartari. G. (2004), "Application of a semi-distributed model to a complex hydrogeological watershed", *Proceedings ECO-GEOWATER EuroWorkshop, GI for International River Basin Management*, Budapest, June 3-5, 2004.
- Tartari G., Quattrin B. (1998), "Evoluzione limnologica del Lago di Pusiano negli ultimi decenni e prospettive future", *Atti 13° Congresso AIOL; Portonovo, Ancona, 28-30 settembre 1998*, 117-128
- Tolson B.A. (2004) "*Watershed modelling of the Cannosville Basin using SWAT 2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannosville Reservoir. Version 1.0*", Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, 159 pp.
- Vollenweider R.A. (1976). Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Ist. ital. Idrobiol.*, 33:53-83.
- Vuillermoz E. (2003), "*Evoluzione trentennale della qualità delle acque del Lago di Pusiano*", Università degli Studi di Milano Bicocca, Tesi di laurea, 126 pp.
- Williams J.R. (1975). "Sediment routing for agricultural watersheds", *Water Resource Bull.*, 11(5): 965-974