

Modellizzazione dei processi eutrofici nella laguna di Orbetello

Tommaso Salaorni¹

¹Università di Firenze, tommaso.salaorni@unifi.it

Riassunto

La Laguna di Orbetello, situata nella provincia di Grosseto, in Toscana, è un corpo idrico di transizione. Comunica con il Mar Tirreno tramite i tre canali di Fibbia, Nassa ed Ansedonia, che permettono dei ricambi idrici piuttosto modesti. Essa rappresenta una risorsa economica grazie alle attività di pesca e all'attrattiva turistica della zona della laguna e del Monte Argentario. La laguna è da decenni soggetta a fenomeni di eutrofizzazione, che in passato hanno provocato ripetute morie della fauna acquatica lagunare. Si configura quindi la necessità di sviluppare un supporto decisionale ad eventuali scenari di risanamento e recupero della zona, che sia in grado di simulare con sufficiente precisione i processi biologici e fisici presenti in laguna e simulare scenari variati rispetto al caso reale in modo da valutare l'impatto di più scenari di recupero. Il modello che è stato sviluppato, nella versione corrente, è in grado di riprodurre con precisione soddisfacente i livelli di ossigeno disciolto nella colonna d'acqua, e presenta un grande margine di miglioramento.

Parole chiave: Eutrofizzazione, modellistica, inquinamento, risanamento, macroalghe, modello, itticoltura.

Abstract

The Orbetello Lagoon, located in the province of Grosseto, in Tuscany, is a transitional body of water. It communicates with the Tyrrhenian Sea via the three canals of Fibbia, Nassa and Ansedonia, which allow rather modest water exchanges. It represents an economic resource coming from fishing activities and the tourist attraction of the lagoon area and Monte Argentario. The lagoon has been subject to eutrophication phenomena for decades, which in the past have caused repeated death waves of the lagoon's aquatic fauna. There is therefore a need to develop a decision-making support for possible rehabilitation and recovery scenarios of the area, which has capable of simulating with sufficient precision the biological and physical processes present in the lagoon and simulating scenarios different from compared to the real case in order to evaluate the impact of multiple recovery options. The model that has been developed, in the current version, is able to reproduce the levels of dissolved oxygen in the water column with satisfactory precision and has great room for improvement.

Keywords: Eutrophication, modeling, pollution, remediation, macroalgae, model, fish culture.

Introduzione al problema

L'eutrofizzazione rappresenta uno squilibrio ecologico causato dall'accumulo eccessivo di nutrienti, in particolare azoto e fosforo, nelle acque superficiali. Questo processo conduce ad una grande proliferazione di alghe e batteri causando impatti negativi sull'ecosistema, come la riduzione dell'ossigeno disponibile per la fauna ittica e l'alterazione della qualità dell'acqua.

Le lagune costiere sono ecosistemi caratterizzati da una produttività primaria pari a 10-15 volte superiore a quella delle aree continentali (Carrada e Fresi, 1998) (Duarte, 1995) (Valiela, 1995). Ciò è dovuto alla

presenza di un'intensa attività microbica che, degradando le sostanze organiche, permette di ricircolare i nutrienti in esse presenti (Mann, 1988) (Sorokin et al., 1996). A ciò si aggiunga lo stock abbondante che viene a formarsi nello strato sedimentario del fondale e che può tornare ad essere bio-disponibile al variare delle condizioni ambientali locali. Su questo stato nutrizionale si instaura una complessa rete alimentare che, più di altri sistemi marini, è collegata alla dinamica dei produttori bentonici e planctonici (Mann, 1988) (Izzo & Hull, 1991) (Borum & Sand-Jensen, 1996). Già tra il 1975 ed il 1993 la laguna di Orbetello conobbe sempre più frequenti fenomeni di eutrofizzazione (Cognetti, et al., 1978) (Lenzi & Angelini, 1984) (Bucci, et al., 1992) (Cartei & Innamorati, 1997) con pronunciate fioriture algali accompagnate da crisi anossiche. Le crisi furono spesso accompagnate dalla morte di organismi aerobici, come nel 1986 e 1993 quando si stimarono perdite di pesci per, rispettivamente, 150 e 90 tonnellate (Lenzi, 1992) (Innamorati, 1998). Le problematiche legate all'eutrofizzazione delle acque della laguna di Orbetello sono associate ad una serie di cause che hanno comportato nel tempo l'accumulo di nutrienti all'interno del corpo lacustre. Nel tempo ad alcune di queste si è posto rimedio, come con la costruzione dell'impianto trattamento reflui di Terrarossa, che prende in carico la rete fognaria di Orbetello, la quale scaricava precedentemente in laguna. Tuttavia, permangono gli allevamenti ittici che, scaricando i propri reflui (uno direttamente in laguna, l'altro nei canali di collegamento con il mare), rappresentano tutt'ora un elemento di apporto nutrizionale non trascurabile (Lenzi, et al., 2000), e l'apporto dal fiume Albegna che comunicando con la laguna tramite il canale di Fibbia, potrebbe essere un'ulteriore fonte di contaminanti.

Monitoraggio corrente

Su commissione della Regione Toscana, ARPAT svolge attività monitoraggio della laguna, tra cui campionamenti delle acque per analisi chimiche e acquisizione e validazione di dati acquisiti in continuo dal seguente sistema di strumentazione:

- a) 3 sonde multi-parametriche installate in laguna, denominate Ponente, Levante, Levante 2. Misurano pH, conducibilità elettrica, temperatura, potenziale redox e ossigeno disciolto nelle acque;
- b) 3 correntometri, installati in corrispondenza dei canali di Fibbia e Ansedonia e in corrispondenza della cosiddetta Diga (infrastruttura che collega Orbetello al Monte Argentario);
- c) 3 anemometri installati in corrispondenza delle stazioni di Ponente e levante, ed in corrispondenza della stazione meteo del SIR;
- d) 4 idrometri installati uno in ciascun canale ed uno in prossimità della Diga;
- e) 2 punti di campionamento manuale, denominati MAS-88 e MAS-89 e gestiti da ARPAT, designati per la raccolta di campioni dalle acque della laguna allo scopo di condurre analisi chimiche.

Questi dati, completati da rilevazioni in-situ condotte dal Dott. Leporatti (Leporatti, 2022), dai dati di Copernicus Marine Service e da studi precedenti sulla laguna di Orbetello, compongono il database su cui ci si è basati per la conduzione di questo lavoro.



Figura 1. Posizionamento di centraline, punti di campionamento e strumentazioni di monitoraggio.

Approccio metodologico alla modellizzazione

Per la costruzione del modello ecologico si è fatto utilizzo del software Mike 21, che fornisce una suite di strumenti per la modellizzazione biologica ed idrodinamica. È uno strumento per la creazione di modelli di ecosistemi acquatici atti a descrivere la qualità dell'acqua, i fenomeni eutrofici, le contaminazioni da metalli pesanti e l'ecologia dei corpi idrici superficiali. Questo mette a disposizione una serie di modelli matematici predefiniti e gli strumenti per la creazione di modelli personalizzati. Per il presente lavoro si è scelto di utilizzare uno dei modelli forniti dal software e di adattarlo, con modifiche anche piuttosto profonde, al funzionamento tipico e particolare della laguna di Orbetello.

Esistono due macro-approcci alla modellizzazione matematica: l'approccio ad agente e l'approccio a processo. La modellizzazione orientata ai processi è una tecnica di modellizzazione ormai ben consolidata. Solitamente la variazione di una massa o di una concentrazione variabili nel tempo è descritta da un'equazione differenziale ordinaria (EDO):

$$\frac{dA}{dt} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

Un termine (P_1 , P_2 , P_3) che si trova nella parte destra di tale EDO è comunemente chiamato "processo" poiché di solito descrive il contributo di un singolo processo biologico o reazione chimica per la variabile A , ad es. il cambiamento di A dovuto al processo di crescita e respirazione della vegetazione. La dinamica di A deriva quindi dall'interazione di tutti i processi ad essa associati.

La modellizzazione orientata ai processi è ampiamente applicata, ad es. per modellizzare concentrazioni come livelli di ossigeno, inquinamento o biomassa. Essa costituisce la spina dorsale del modello biologico della laguna.

Il modello si struttura mediante un insieme di entità interagenti, dette oggetti, le quali, attraverso relazioni matematiche, elaborano tutti i fattori che influenzano la dinamica della simulazione.

- a) Variabili di stato: rappresentano le caratteristiche target che vengono consultate per valutare la qualità dell'acqua e lo stato di salute della laguna, ad esempio ossigeno disciolto e solidi sospesi;
- b) Costanti: rappresentano argomenti nelle espressioni del modello che sono costanti nel tempo ma possono cambiare nello spazio. Esempi tipici sono i coefficienti di calibrazione, le relazioni stechiometriche o le concentrazioni di semi saturazione;
- c) Forzanti: rappresentano fattori esterni all'ecosistema lagunare che prendono parte alle espressioni del modello. Esempi sono la temperatura, la salinità o la batimetria;
- d) Variabili ausiliarie: le variabili ausiliarie rappresentano calcoli intermedi che sono necessari a più di un processo. Permettono di eseguire il calcolo una volta sola per poi passare il risultato a tutti i processi che lo necessitano, risparmiando risorse.

Per quanto riguarda la laguna, questa viene schematizzata in una mesh di calcolo composta da un numero finito di elementi triangolari (celle). La dimensione di ciascuna cella varia in accordo con quelle che sono le necessità di calcolo: i canali e le aree di maggior interesse hanno bisogno di essere modellizzate con una risoluzione spaziale maggiore (celle più piccole), mentre zone dove si ritiene opportuna una maggiore approssimazione permettono l'utilizzo di risoluzioni meno stringenti. La scelta della risoluzione della mesh si traduce quindi in un'analisi costi-benefici: una mesh ad alta risoluzione offre il vantaggio di fornire risultati più dettagliati nello spazio e consente calcoli più precisi relativi al trasporto e alla movimentazione in acqua di solidi sospesi e specie chimiche disciolte. Tuttavia, ciò comporta tempi di calcolo significativamente più lunghi. Una risoluzione più bassa fornirà risultati meno dettagliati, ma avrà il prezioso beneficio di snellire, anche significativamente, i tempi di calcolo. Quest'ultimo aspetto non è da sottovalutare: il processo di costruzione, correzione e calibrazione del modello è fortemente iterativo. La complessità intrinseca del modello rende difficile anticipare con precisione gli effetti di una modifica o l'introduzione di nuovi processi. Ogni parte del modello è interconnessa con le altre, generando dinamiche di causa-ed-effetto intricate e spesso difficili da valutare a priori. Modifiche e aggiunte richiedono quindi l'esecuzione di numerose simulazioni, mettendo alla prova la funzionalità del modello e sottoponendolo a stress-test. Questo approccio iterativo è essenziale per garantire una valutazione accurata e completa delle modifiche apportate, ma risente fortemente della durata di ciascuna simulazione.

È cruciale poi selezionare attentamente la mesh per il modello, in quanto mesh diverse possono produrre risultati leggermente differenti. La scelta deve essere quanto più definitiva possibile, ma senza escludere la possibilità di apportare modifiche in futuro. Al contrario, la struttura della mesh deve agevolare l'implementazione di cambiamenti minimizzando le variazioni. Ad esempio, potrebbe essere auspicabile simulare gli effetti di dragaggi o modifiche morfologiche al fondale. Introdurre tali modifiche comporta inevitabilmente modifiche nella mesh e, pertanto, è fondamentale che tali aggiornamenti siano il più contenuti possibile. Questo approccio consente di mantenere la flessibilità necessaria per adattare il modello alle esigenze future, senza compromettere la coerenza e la stabilità della simulazione. Alla luce di queste considerazioni, si è deciso di fare uso di una mesh (figura 2) composta da 7199 celle e che richiede circa 9-11 ore per simulare un anno di processi in laguna.

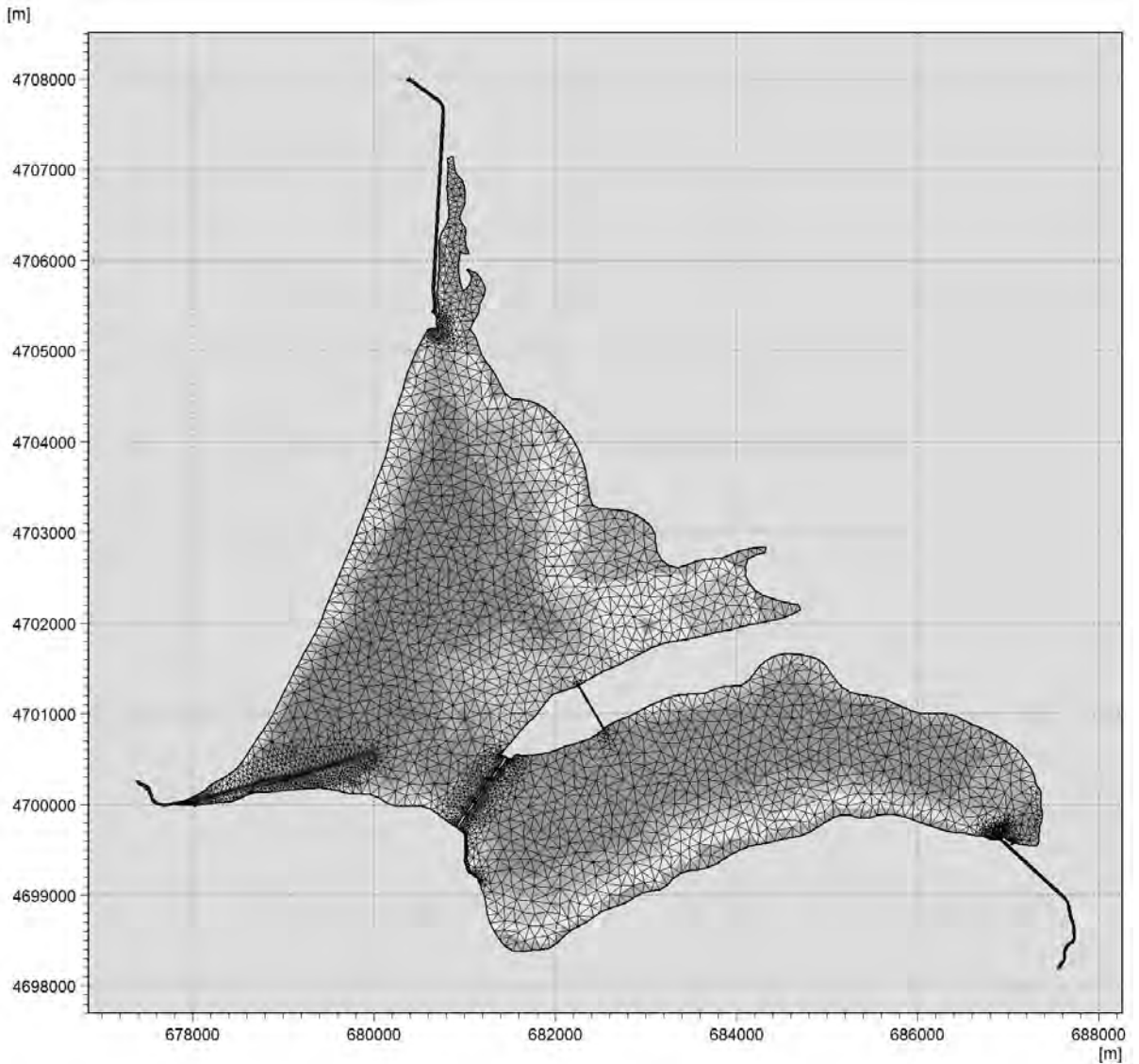


Figura 2. Mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni del modello ecologico.

Il modello deve tenere conto anche di tutte le interazioni che si svolgono sulla profondità della laguna, dalla superficie dell'acqua fino all'interno del fondale. Questo potrebbe essere ottenuto tramite un funzionamento tridimensionale, composto da una mesh tridimensionale in cui ciascuna cella può comunicare in tutte le

direzioni con le celle circostanti. Una soluzione di questo tipo comporta però la creazione di un modello più complesso e una dilatazione dei tempi di calcolo. Il modello si serve invece di proprietà dette “ambiti” (figura 3), da associare ad oggetti come concentrazioni, costanti, variabili di stato ecc. Ogni ambito descrive la posizione verticale dell’oggetto nella colonna d’acqua. Gli ambiti hanno principalmente lo scopo di organizzare il modello e imitare una struttura tridimensionale. Gli elementi con ambiti non comunicanti, infatti, non possono interagire tra loro: un elemento appartenente all’ambito della superficie dell’acqua, ad esempio, non può interagire direttamente con un altro elemento definito nell’ambito del sedimento, perché sono separati dall’ambito della colonna d’acqua.

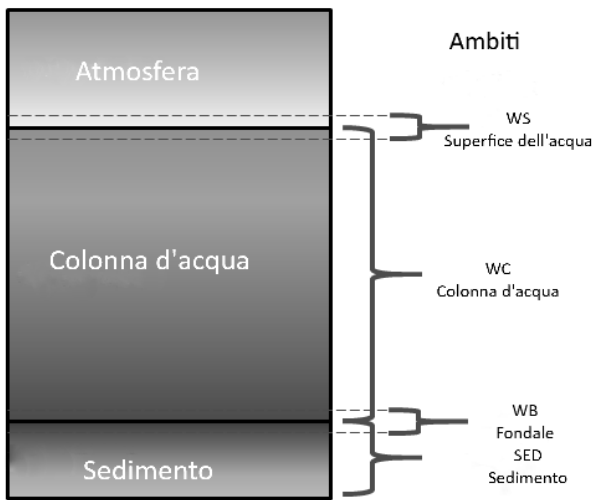


Figura 3. Schema degli ambiti di calcolo.

Struttura del modello biologico

Per quanto riguarda il lato biologico del modello, questo prevede esplicitamente quattro popolazioni di specie viventi: fitoplancton, zooplancton, macroalghe e vegetazione radicata al fondale. Altre popolazioni, come i batteri eterotrofi o nitrificati coinvolti nella degradazione del materiale organico, sono inclusi implicitamente nelle formule di calcolo e non vengono calcolate esplicitamente tramite una variabile di stato dedicata. Questo comporta un importante risparmio di risorse. Il fondale e il materiale organico che lo compongono sono parte integrante e fondamentale dell’ecosistema lagunare. Questo viene modellizzato tramite i cicli dell’azoto (figura 4) e del fosforo (figura 5). Il funzionamento generale del modello, con un focus per quanto riguarda il bilancio dell’ossigeno disciolto in acqua, è schematizzato in figura 6.

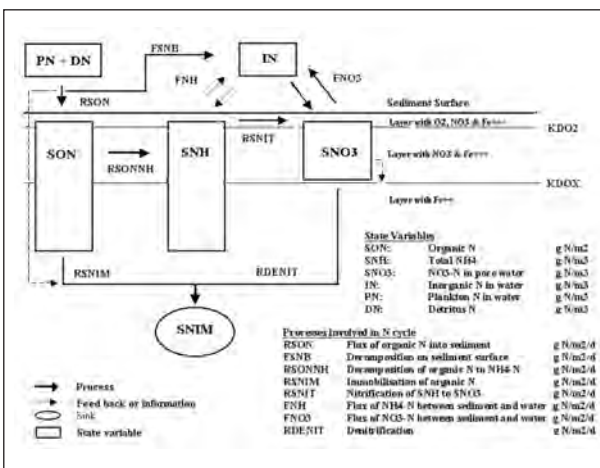


Figura 4. Schematizzazione del ciclo dell’azoto all’interno del sedimento.

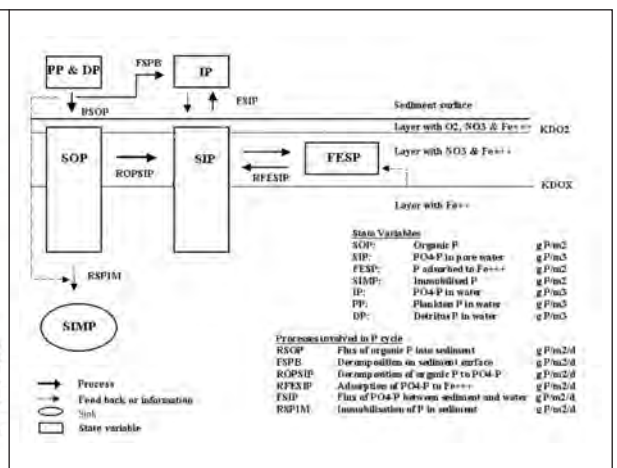


Figura 5. Schematizzazione del ciclo del fosforo all’interno del sedimento.

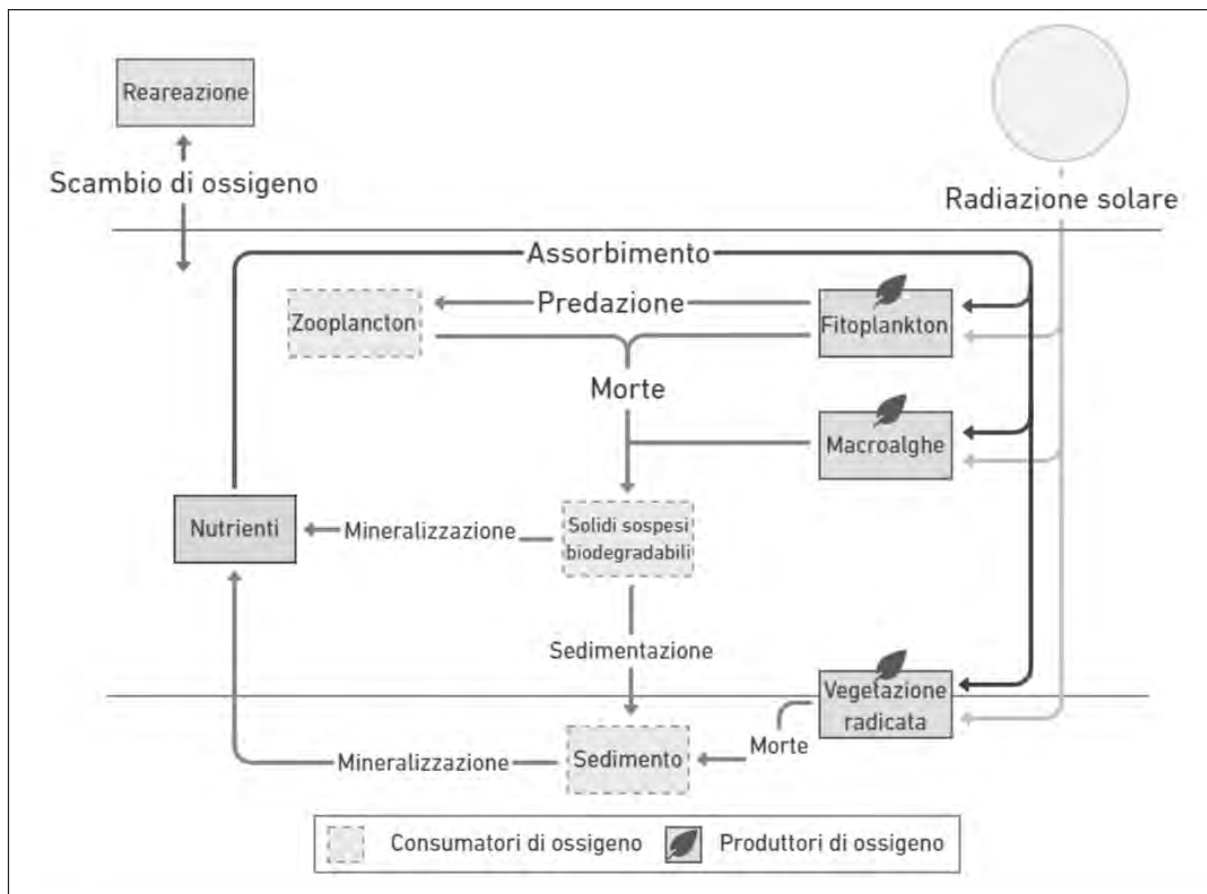


Figura 6. Schematizzazione generale del modello biologico.

Il modello utilizza 25 variabili di stato (tabella 1) per rappresentare la qualità dell'acqua e le condizioni del fondale (sedimento) all'interno della laguna.

Tabella 1. Le variabili di stato che definiscono il modello ecologico.

| | | | |
|---|---------------------|---|---------------------|
| Fitoplancton C | [mg/l] | Detrito N | [mg/l] |
| Fitoplancton N | [mg/l] | Detrito P | [mg/l] |
| Fitoplancton P | [mg/l] | Inorganico N | [mg/l] |
| Clorofilla-a | [mg/l] | Inorganico P | [mg/l] |
| Zooplancton C | [mg/l] | Ossigeno disciolto | [mg/l] |
| Detrito C | [mg/l] | Macroalghe C | [g/m ²] |
| Veg. radicata C | [g/m ²] | Macroalghe N | [g/m ²] |
| Veg. Radicata n. fusti | [-] | Macroalghe P | [g/m ²] |
| Profondità di penetrazione di NO ₃ nel sedimento | [m] | Organico P nel sedimento | [g/m ²] |
| PO ₄ adsorbito da Fe ⁺⁺⁺ | [g/m ²] | Fosfati nei sedimenti | [g/m ²] |
| N organico nel sedimento | [g/m ²] | NO ₃ -N nell'acqua interstiziale (sedimento) | [g/m ²] |
| Ammonio nel sedimento | [g/m ²] | P immobilizzato nel sedimento | [g/m ²] |
| N immobilizzato nel sedimento | [g/m ²] | | |

Dati in ingresso al modello

Dati necessari

Per ogni simulazione sono necessari dei dati relativi alla laguna stessa e alle acque in ingresso al sistema ecologico:

- a) Condizioni iniziali: rappresentano il punto di partenza di ogni simulazione. Nello specifico sono composte da un valore per ogni variabile di stato per ogni punto del dominio di calcolo;
- b) Condizioni a contorno: sono le informazioni sulla qualità delle acque in ingresso dai canali. Nello specifico sono serie temporali che devono coprire tutta la durata del periodo da simulare. Inoltre, essendo relative a delle portate in ingresso, le uniche variabili di stato per le quali devono essere forniti dati sono quelle per le quali nel modello è previsto il trasporto in acqua (tutte quelle misurate in mg/l in tabella 1);
- c) Dati fisici ed idrodinamici: il modello richiede informazioni riguardanti salinità, batimetria, temperatura dell'acqua, vento, densità e dati idrodinamici completi, ovvero informazioni dettagliate sui flussi d'acqua nella laguna per l'intero periodo di simulazione. La ricostruzione bidimensionale del campo di correnti, dell'andamento dei livelli idrici, della temperatura e della salinità dell'acqua nella laguna di Orbetello è stata eseguita mediante simulazione numerica con il modulo Hydrodynamic Flexible Mesh del codice di calcolo Mike 21, non oggetto di questo articolo. Il codice è basato sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes nella versione bidimensionale per flussi incomprimibili sotto le ipotesi Bussinesq e quella di distribuzione idrostatica della pressione (Shallow Water Equations – SWE). L'uso delle SWE è giustificato nello studio presente dalle profondità relativamente limitate dei fondali della laguna (aventi valori medi di circa 1.13 m). Per risolvere le SWE, il codice utilizza uno schema di soluzione esplicito ai volumi finiti. Questo tipo di simulazioni risultano spesso onerose: l'approccio adottato consente di eseguirle una volta sola per ogni mesh e fornire i risultati direttamente al modello ecologico, accelerando il lavoro;
- d) Sorgenti: rappresentano le acque in ingresso alla laguna da qualsiasi fonte che non siano i canali. Nel presente lavoro sono le acque meteoriche e di run-off dal bacino imbrifero della laguna e gli scarichi delle itticultore intensive di Ittima e Vigneto.

Per tutti i dati necessari si è fatto largo uso dei dati disponibili dal monitoraggio della laguna.

Provenienza dei dati per le condizioni iniziali

I dati riguardanti le condizioni iniziali sono stati estratti dalle seguenti fonti:

- a) Le tre centraline multi-parametriche presenti in laguna, per i dati riguardanti l'ossigeno disciolto;
- b) Dalla banca dati dei punti di campionamento MAS-88 e MAS-89 per quanto riguarda: Fitoplancton, Clorofilla, Azoto inorganico, Fosforo inorganico, Azoto totale, Fosforo totale;
- c) Dai dati riportati nelle relazioni tecniche del Dott. Leporatti (Leporatti, 2022) per quanto riguarda: macroalghe e vegetazione radicata con la loro rispettiva distribuzione in laguna;
- d) I resoconti tecnici stilati da ARPAT per la Regione Toscana per quanto riguarda gli scarichi delle itticultore intensive;
- e) Dati di letteratura (Izzo, et al., 2019) e di monitoraggio ambientale (Fanciulletti, et al., 2018) per i dati sul sedimento.

Molte di queste informazioni non sono disponibili nella forma necessaria per il modello. Si è fatto ricorso alle informazioni presenti in letteratura per convertire i dati disponibili nelle forme necessarie per il funzionamento del modello. In particolare:

- a) Fitoplancton, che viene fornito da ARPAT in cellule/litro viene convertito nelle sue frazioni C, N e P (Reynolds, 2006);
- b) Zooplancton, per i quali non si hanno dati, viene messo in relazione con la popolazione di fitoplancton e convertito nella sua frazione C (Reynolds, 2006) (D'Alelio, et al., 2016);
- c) Macroalghe e vegetazione radicata, per le quali sono disponibili dati espressi in Tonnellate Peso Umido (TPU), vengono convertite nelle loro frazioni C, N e P (Reynolds, 2006) (D'Alelio, et al., 2016).

Provenienza dei dati per le condizioni a contorno

Come anticipato, i dati riguardanti le condizioni a contorno sono analoghi a quelli necessari per le condizioni iniziali. A cambiare è la provenienza dei dati, per i quali si fa riferimento ai punti di campionamento MAR-AL, MAR-AS e MAR-SS, situati in mare. Rimangono analoghi anche i metodi di conversione di questi dati nei formati necessari per il modello.

Provenienza dei dati per le sorgenti

I dati necessari per l'inserimento nel modello degli scarichi delle itticolture provengono dai resoconti di monitoraggio stilati da ARPAT per la Regione Toscana. Per quanto riguarda i dati sulle acque meteoriche, si è fatto ricorso ai dati provenienti dalle stazioni meteorologiche locali e ad EPA SWMM per il calcolo delle portate di run-off.

Assunzioni

All'interno del modello, sono state introdotte alcune assunzioni esemplificative del problema al fine di agevolare il processo di simulazione e affrontare la mancanza di dati disponibili.

- Gli scarichi delle itticolture intensive vengono supposti costanti durante tutto l'anno e pari al valor medio;
- È nota la presenza di scaricatori di piena che servono il sistema fognario di Orbetello. In assenza di informazioni sulla loro attivazione, la portata in ingresso in laguna è considerata nulla per tutta la durata della simulazione;
- Il canale di Fibbia comunica con la foce del fiume Albegna (figura 1). La portata in ingresso in laguna dal canale viene rappresentata con i dati pari riportati dal sito di campionamento ARPAT MAR-AL, che in realtà è localizzato in mare di fronte alla foce del fiume Albegna.

Risultati ottenuti

Il modello restituisce una serie temporale per ogni variabile di stato, per ogni cella della mesh. È possibile salvare serie temporali per i valori assunti dai processi e dalle variabili ausiliarie, al fine di monitorarne il funzionamento e di avere un processo di risoluzione dei problemi più efficiente. La qualità del funzionamento del modello viene valutata in base al confronto tra i valori calcolati dal modello e i valori relativi al monitoraggio o presenti in laguna. Il confronto chiave, tuttavia, si concentra sulle misurazioni dell'ossigeno disciolto ottenute dalle tre centraline. Questo parametro non solo presenta dati sperimentali estremamente dettagliati su cui è possibile fare un confronto su base oraria, ma assume anche un ruolo di rilievo nelle situazioni di crisi distrofiche. La sua criticità risiede nel fatto che la sua diminuzione eccessiva rappresenta il principale fattore problematico per la fauna.

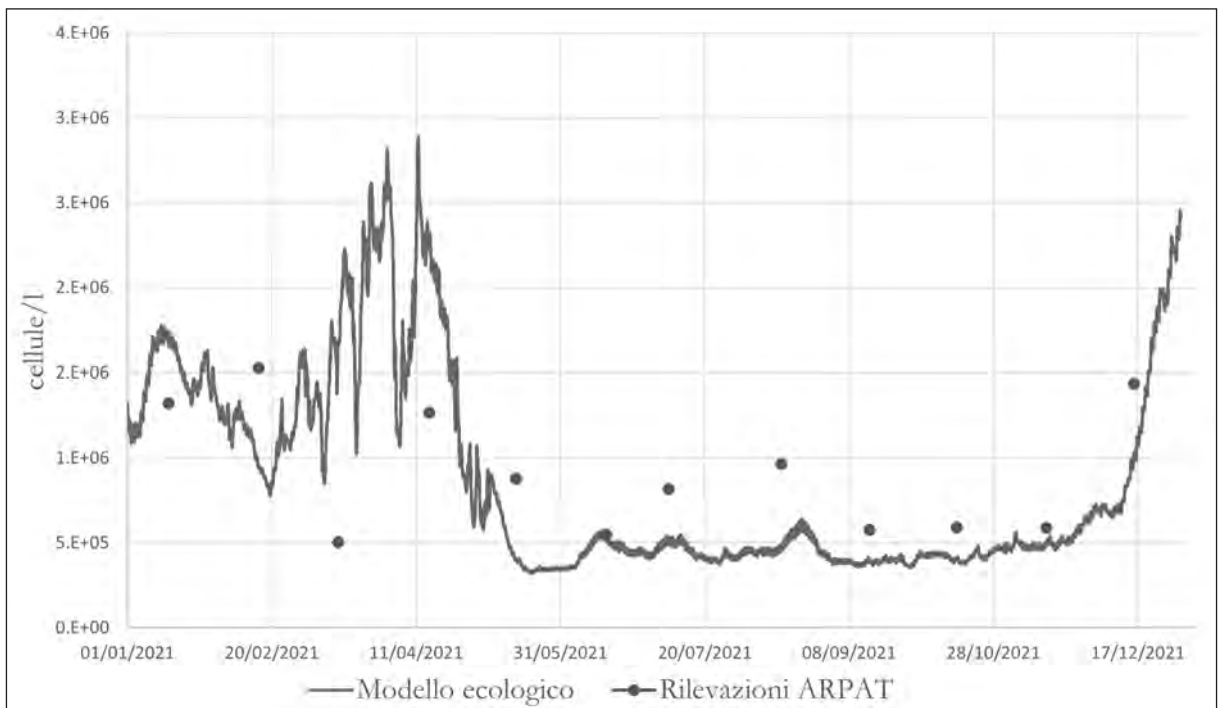


Figura 7. Andamento della popolazione di fitoplancton in laguna. Non essendo disponibili dati sul fitoplancton dai punti di campionamento MAS-88 e MAS-89 successivi al 2015, si è scelto di riportare una media mensile per ogni mese dell'anno, estrapolata dai dati precedenti). Il simulato è inoltre in linea con i dati di letteratura disponibili (Nuccio, et al., 2002).

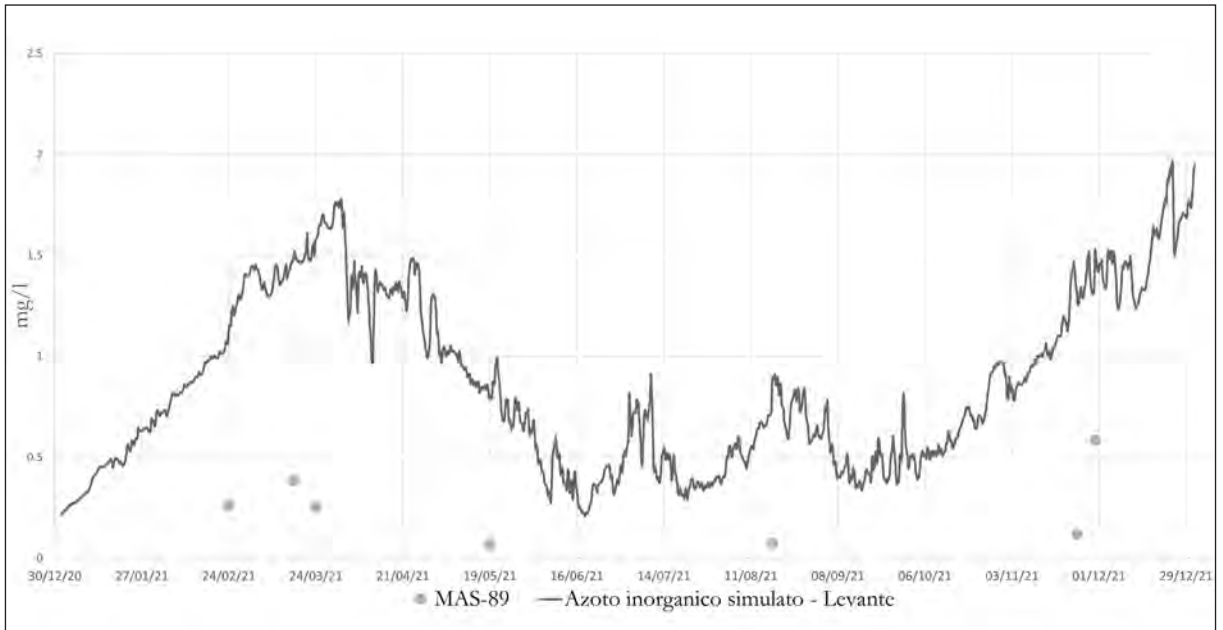


Figura 8. Andamento dell'azoto inorganico disciolto in laguna a Levante, confrontato con le rilevazioni di ARPAT da MAS-89.

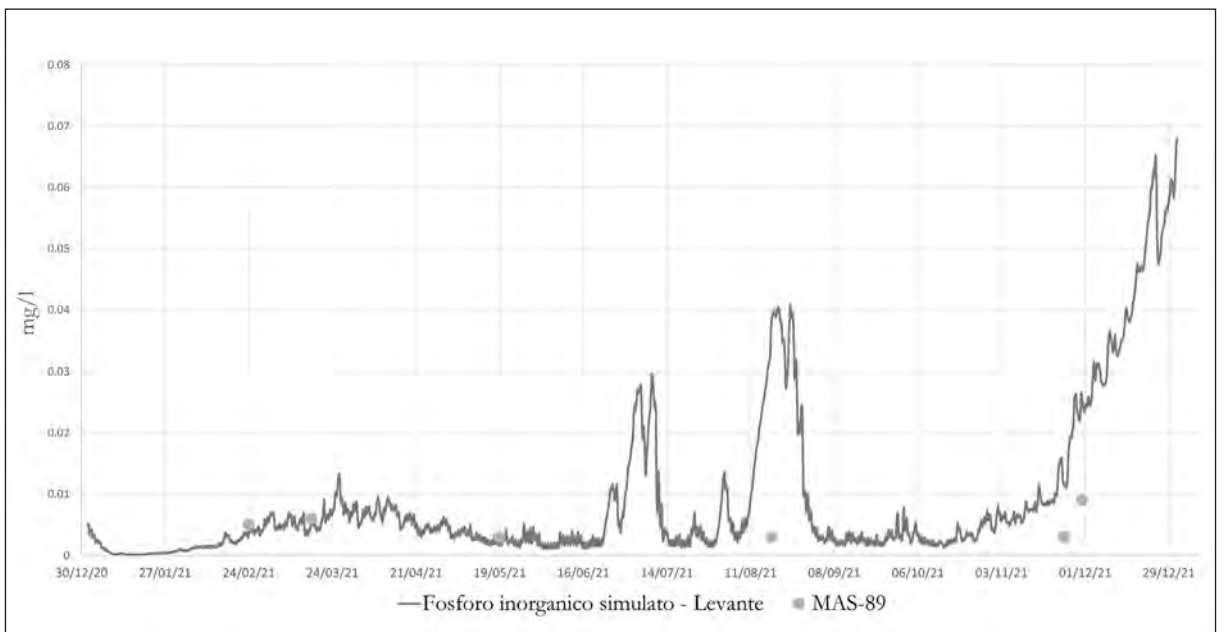


Figura 9. Andamento del Fosforo inorganico disciolto in laguna a Levante, confrontato con le rilevazioni di ARPAT da MAS-89.

Conclusioni

Il modello dimostra le sue potenzialità per le modellizzazioni di ambienti come quello della laguna di Orbetello. Questo necessita ancora di numerosi affinamenti, che possono essere coadiuvati da dati migliori sul sedimento, i quali risultano ad oggi difficili da reperire. Una volta completato, potrà essere di aiuto come supporto decisionale per la mitigazione delle problematiche ambientali che da decenni affliggono la laguna.

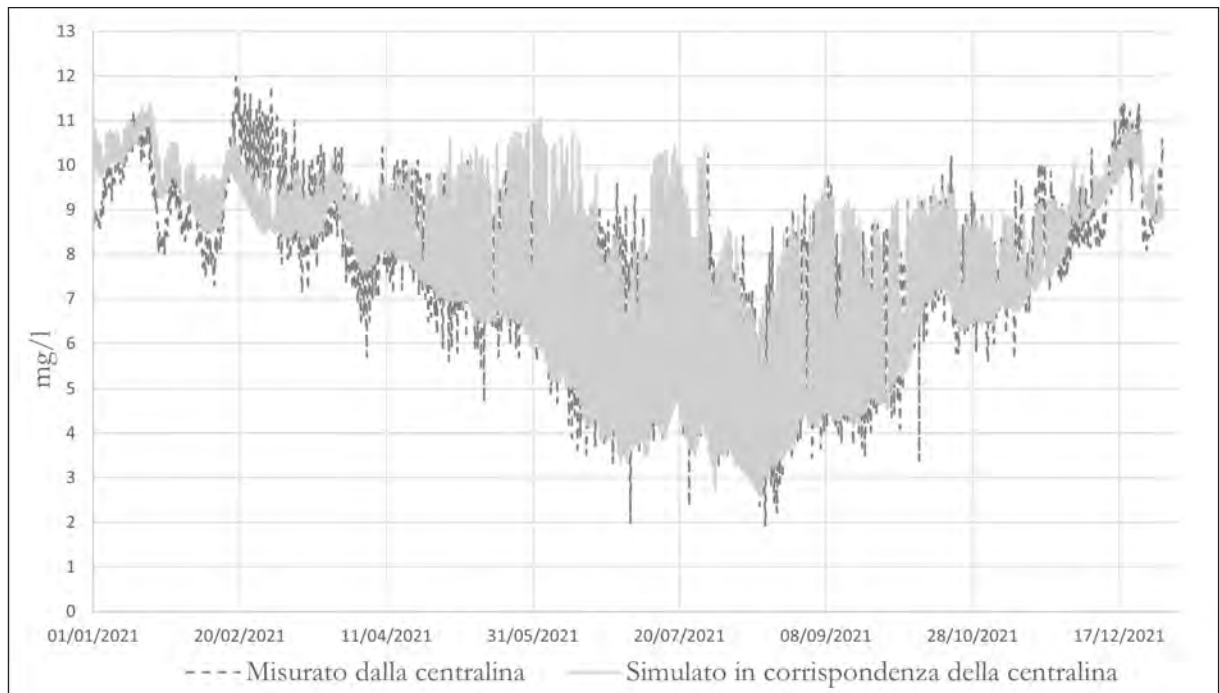


Figura 10. Ossigeno disciolto in acqua, confronto tra i valori simulati in corrispondenza della centralina ARPAT Levante 2, e i valori misurati dalla centralina stessa.

Bibliografia

- Borum & Sand-Jensen, 1996. Is Total Primary Production in Shallow Coastal Marine Waters Stimulated by Nitrogen Loading?
- Bucci, et al., 1992. Ecological conditions in the Orbetello Lagoon and suggested actions for its restoration.
- Carrada & Fresi, 1998. Le lagune salmastre costiere. Alcune riflessioni sui problemi e sui metodi.
- Cartei & Innamorati, 1997. Variazioni delle condizioni trofiche della laguna di Orbetello.
- Cognetti, Angelis & Orlando, 1978. Risanamento e protezione dell'ambiente idrologico delle lagune di Orbetello, Comune di Orbetello, Regione Toscana.
- D'Alelio, Libralato, Wyatt & Ribera D'Alcalà, 2016. Ecological-network models link diversity, structure and function in the plankton food web.
- Duarte, 1995. Submerged aquatic vegetation in relation to different nutrient regimes.
- Fanciulletti; Macii; Franchi; Lenzi, 2018. *Valutazione dell'impatto dei reflui delle aziende Ittima e Vigneto nella laguna di Orbetello*, Follonica: Studio Stalf.
- Innamorati, 1998. La laguna di Orbetello: risanamento e gestione conservativa.
- Izzo & Hull, 1991. The anoxic crises in dystrophic processes of coastal lagoons: an energetic explanation.
- Izzo, et al., 2019. Indicatori funzionali della stabilità ecologica di ambienti lagunari.
- Lenzi, 1992. Experiences for the management of Orbetello Lagoon: eutrophication and fishing.
- Lenzi & Angelini, 1984. Indagine sulle condizioni ambientali della laguna di Orbetello. Chimico-fisica e carica microfitica.
- Lenzi, Palimieri & Porrello, 2003. Restoration of the eutrophic Orbetello lagoon.
- Leporatti, 2022. Valutazione delle attuali condizioni ambientali della laguna di Orbetello nell'anno 2021-2022, finalizzata all'avvio dei lavori di gestione e dei sistemi di mitigazione a contrasto dell'eutrofizzazione.
- Mann, 1988. Production and use of detritus in various freshwater, estuarine and coastal marine.
- Nuccio, Melillo, Massi & Innamorati, 2002. Phytoplankton abundance, community structure and diversity in the eutrophicated Orbetello lagoon (Tuscany) from 1995 to 2001.
- Reynolds, 2006. *The Ecology of Phytoplankton*. s.l.:Cambridge University Press.

Sorokin, Giovanardi & Dalla Venezia, 1996. Study of ecosystem of the Lagoon of Venice, with emphasis on antropogenic impact.
Valiela, 1995. *Marine Ecological Processes*. New York: Springer New York.

Ricevuto il 20/11/2023; accettato il 30/12/2023