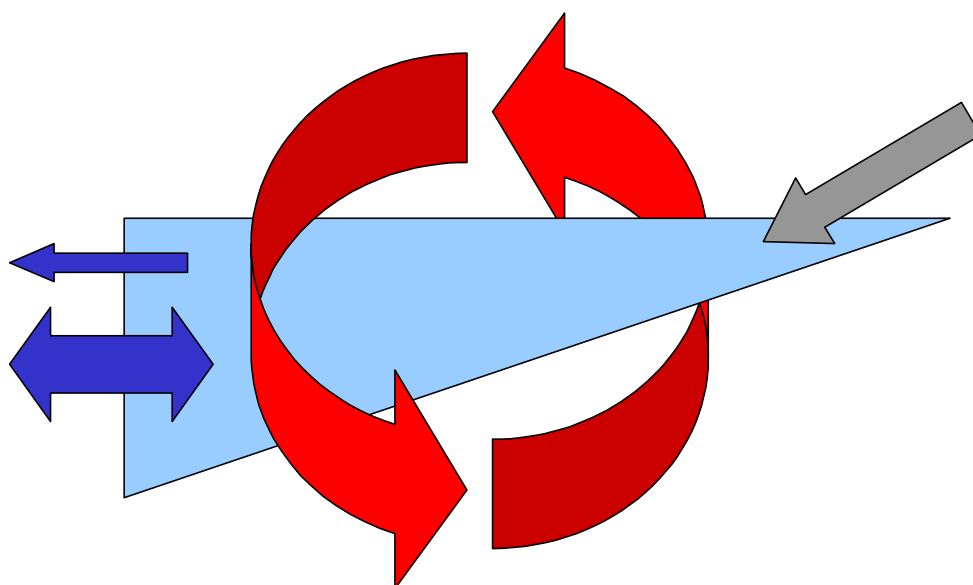


# MODELLO BIOGEOCHIMICO LOICZ

## BREVE DESCRIZIONE TECNICA

A cura di Gianmarco Giordani e Pierluigi Viaroli

in occasione del Workshop:



**Trasporto dei nutrienti negli ambienti acquatici di transizione  
lungo le coste italiane: valutazione dei flussi e delle funzioni  
dell'ecosistema.**

**Venezia 14 e 15 aprile 2002**

Sala Conferenze THETIS S.p.A.,  
Arsenale Vecchio,  
Venezia

## INDICE

	Pag.
Premessa	3
1. Dati necessari per poter applicare il modello	3
2. Introduzione	4
3. Assunzioni del modello	4
4. Modello ONE BOX- ONE LAYER	5
5. Comportamenti conservativi	5
5.1. Bilancio di massa dell'acqua	5
5.2. Bilancio di massa del sale	7
5.3. Stima del tempo medio di residenza	9
6. Comportamenti non conservativi	9
7. Calcoli stechiometrici per stimare funzioni generali dell'ecosistema	11
8. Alcune verifiche per controllare la corretta applicazione del modello	13
9. Esempio di applicazione del modello LOICZ one box – one layer.	14
10. Riferimenti bibliografici	17

# MODELLO BIOGEOCHIMICO LOICZ

## BREVE DESCRIZIONE TECNICA

Il modello biogeochimico LOICZ è descritto in dettaglio in Gordon *et al.*, 1996 e nella pagina web <http://data.ecology.su.se/MNODE/index.htm> . Nello sviluppo di questo modello è stato utilizzato un approccio molto generale, applicabile a tutti gli ecosistemi marini costieri in modo da poterli comparare e confrontare tra loro. Inoltre, le informazioni ottenute permettono di raggruppare questi ecosistemi in base a caratteristiche comuni (typology) e analizzarli su scala regionale e globale.

Con questi modelli si vuole analizzare quanto velocemente l'acqua fluisce attraverso il sistema e quanto velocemente carbonio e nutrienti fluiscono nell'acqua e nel sistema. Si vogliono anche studiare funzioni fondamentali dell'ecosistema ottenibili dalla discrepanza tra il flusso dell'acqua e quello dei nutrienti.

Questo libretto vuole essere solo un semplice manuale di applicazione del modello, in cui vengono brevemente illustrati i principali tratti, assunzioni e calcoli. Alla fine un esempio di calcolo vuole semplificarne l'applicazione.

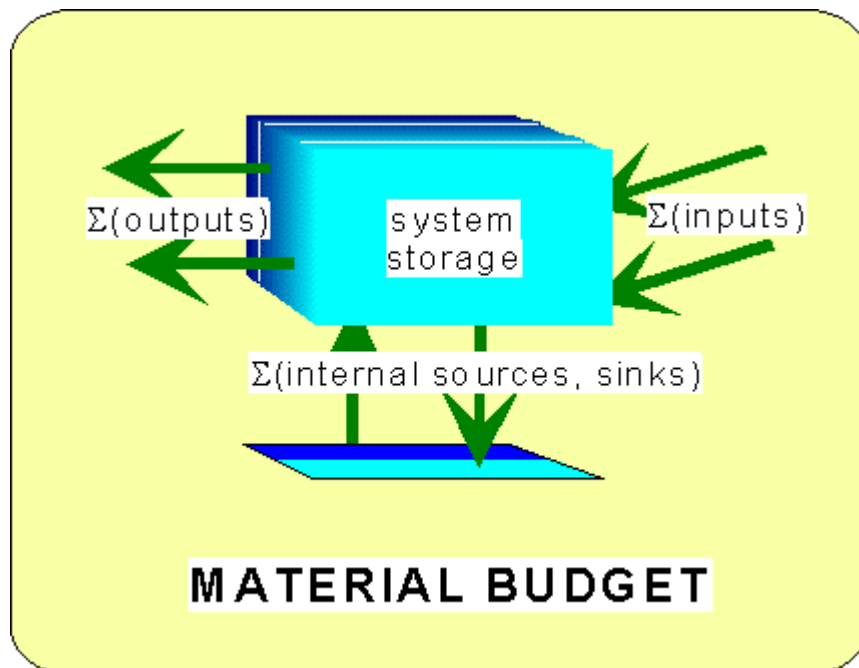
### **1. Dati necessari per poter applicare il modello**

Per poter applicare il modello LOICZ ad un certo sistema sono necessari informazioni dirette o stimate dei seguenti parametri:

1. Una descrizione generale del sistema comprendente profondità media, area superficiale ed evoluzione stagionale.
2. Flussi d'acqua dolce in entrata e in uscita (come apporti fluviali, precipitazioni, evaporazione, acque sotterranee, ecc.)
3. Salinità media degli apporti (se rilevante), del sistema e del mare adiacente.
4. Concentrazioni di azoto e fosforo inorganico disciolto nella colonna d'acqua del sistema, nel mare adiacente e nei apporti d'acqua dolce o salmastra.
5. Evoluzione stagionale dei principali produttori primari con una stima del loro rapporto molare di C:N:P
6. Concentrazioni di N e P organico disciolto (opzionale) possono essere utili per eseguire ulteriori calcoli.

## 2. Introduzione

Il modello biogeochimico LOICZ è un classico modello ecologico basato sui bilanci di massa. Un bilancio di massa (figura 1) descrive i tassi con cui un materiale raggiunge (input), lascia (output) e modifica la sua presenza (storage) all'interno di un sistema. Alcune sostanze possono subire trasformazioni interne che portano a rilasci o accumuli netti nel sistema. Queste trasformazioni sono definite sorgenti (sources) o perdite (sinks) interne del sistema. Il comportamento di materiali che non subiscono queste trasformazioni come acqua e sale viene definito conservativo. Viceversa quello di materiali come C, N e P che all'interno dell'ecosistema subiscono numerose e complesse trasformazioni viene definito non conservativo.



**Figura 1.** Schema di un bilancio di massa di un ecosistema costiero.

Il bilancio di massa di una sostanza è quindi rappresentato dalla seguente equazione:

$$\frac{dM}{dt} = \sum(\text{input}) - \sum(\text{output}) + \sum(\text{sources} - \text{sinks}) \quad (1)$$

dove  $dM/dt$  è lo storage,  $\Sigma(\text{input})$  e  $\Sigma(\text{output})$  sono le somme delle entrate e delle uscite di materiale e  $\Sigma(\text{source-sinks})$  rappresentano le trasformazioni interne al sistema.

## 3. Assunzioni del modello

Tra le varie assunzioni applicabili al modello, quattro sono particolarmente forti e caratterizzanti il modello. La loro reale validità spesso rende efficace oppure invalida l'applicazione del modello al sistema. Elenchiamo semplicemente queste assunzioni che verranno spiegate più in dettaglio al momento del loro utilizzo.

1. Il sistema è in stato stazionario.
2. I bilanci di massa da acqua e sale sono utilizzati per stimare i flussi e gli scambi d'acqua.
3. I comportamenti non conservativi dei nutrienti sono utilizzati per stimare “flussi biogeochimici dell'ecosistema”.
4. I flussi non conservativi di fosforo inorganico disciolto (DIP) sono ritenuti proporzionali al metabolismo netto dell'ecosistema (NEM) che è la differenza tra produzione primaria e respirazione (p-r)
5. Le differenze tra i flussi di azoto inorganico disciolto osservati e quelli attesi dai flussi di DIP e dal rapporto CNP dei principali produttori primari, sono il risultato di processi microbici come azotofissazione e denitrificazione

#### **4. Modello ONE BOX – ONE LAYER**

Questo modello viene usato quando il sistema in esame è praticamente omogeneo, sia verticalmente che orizzontalmente . Questo è il caso in cui la colonna d'acqua è completamente rimescolata e nella laguna non sono presenti zone con caratteristiche molto diverse. Per semplicità, in questo documento, viene considerato solo questo modello, ma sono applicabili anche modelli multi-boxes per sistemi caratterizzati da forti disomogeneità orizzontali e modelli multi-layers per sistemi caratterizzati da masse d'acqua stratificate. I principi applicativi di tutti questi modelli sono comuni ma la loro applicazione può presentare diversi gradi di complessità.

#### **5. Comportamenti conservativi**

Nella costruzione del modello vengono innanzitutto analizzati materiali che mostrano un comportamento conservativo, *in primis* l'acqua e successivamente il sale.

##### **5.1 Bilancio di massa dell'acqua**

Partendo dall'eq. (1), assumiamo che il sistema sia in stato stazionario (assunzione 1), cioè che la quantità di materiale all'interno del sistema non cambi nell'intervallo di tempo in esame. Per questa ragione bisogna considerare intervalli di tempo piuttosto ampi (mese, stagione, anno). Si assume quindi che lo storage ( $dM/dt$ ) sia uguale a zero. Ciò può produrre degli errori ma semplifica notevolmente i calcoli.

Siccome l'acqua ha un comportamento conservativo  $\Sigma(\text{sources-sinks})=0$  e l'equazione precedente viene così semplificata in:

$$\Sigma(\text{input})-\Sigma(\text{output})=0$$

Per convenzione indichiamo con V i vari flussi di acqua, sia input che output anche se, più propriamente andrebbero indicati con F essendo dei flussi e non dei volumi. Sempre per convenzione gli input sono indicati con segno positivo e gli output con segno negativo. Gli output con il relativo segno negativo vengono indicati con \*

Quindi:

$$\Sigma(\text{input}) + \Sigma(\text{output}^*) = 0$$

Gli input sono così indicati:

Input	Sigla
Apporto fluviale	$V_Q$
Precipitazioni dirette nel sistema	$V_P$
Acque sotterranee	$V_G$
Altri input d'acqua dolce	$V_O$

Gli output sono così indicati:

Input	Sigla
Evaporazione diretta dal sistema	$V_E$
Flusso netto al mare (residuale)	$V_R$

In generale, l'unità di misura utilizzata per i flussi è  $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ .

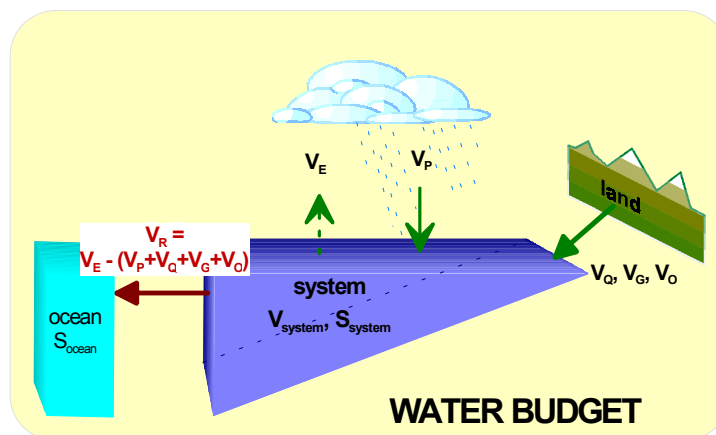


Figura 2. Schema del bilancio di massa dell'acqua

L'evaporazione è un parametro difficilmente misurabile; è comunque possibile stimarlo con l'equazione di Hargreaves dalla temperatura e dalla latitudine del sistema (Shuttleworth, 1993). Alcuni parametri indicati nella tabella precedente, possono essere stimati anche in mancanza di misure dirette utilizzando i database o i calcoli disponibili nel sito web LOICZ :

(<http://data.ecology.su.se/MNODE/Methods/TOC.HTM> ).

Il flusso residuale ( $V_R$ ) è il flusso d'acqua netto che, per bilanciare gli input e gli output, è diretto dal sistema al mare o viceversa. Un flusso d'acqua marina che entra in laguna è osservabile nei casi in cui l'evaporazione è molto intensa e gli apporti d'acqua dolce sono scarsi (è il caso di alcune lagune del Messico). Questo parametro è solitamente difficile da misurare e quindi il bilancio di massa dell'acqua viene usato per ottenere una stima di  $V_R$ . Quindi:

$$\begin{aligned}\Sigma(\text{input}) + \Sigma(\text{output}^*) &= 0 \\ V_Q + V_P + V_G + V_O + V_E + V_R &= 0 \\ V_R &= -(V_Q + V_P + V_G + V_O + V_E)\end{aligned}$$

per evitare confusione sul segno di  $V_E$  usiamo il suo valore assoluto:

$$V_R = -V_Q - V_P - V_G - V_O + |V_E|$$

Un valore negativo di  $V_R$  indica un'uscita netta d'acqua dal sistema, mentre un valore positivo indica un'entrata netta di acqua marina.

## 5.2. Bilancio di massa del sale

Tra i movimenti di masse d'acqua di un ecosistema costiero oltre a quelli indicati nel paragrafo precedente esiste il flusso di scambio ( $V_X$ ). Questo è il volume d'acqua della laguna che viene continuamente sostituita da un uguale volume di acqua marina. Questo flusso non porta a significative variazioni di volume e quindi non viene conteggiato nel bilancio di massa dell'acqua, ma è importantissimo per i flussi di nutrienti in quanto una massa d'acqua lagunare ricca di nutrienti viene sostituita da un'uguale massa d'acqua marina povera di nutrienti. Questo porta ad una perdita netta di nutrienti dal sistema.

Più precisamente il bilancio di massa dell'acqua diviene:

$$\begin{aligned}\Sigma(\text{input}) + \Sigma(\text{output}^*) &= 0 \\ \Sigma(V_Q + V_P + V_G + V_O + V_X) + \Sigma(V_E + V_R - V_X) &= 0\end{aligned}$$

$V_X$  per definizione è positivo e quindi va cambiato di segno quando viene indicato tra gli output.

Per quantificare  $V_x$  viene usato il bilancio di massa del sale, che avendo un comportamento conservativo, può venire utilizzato per stimare i movimenti delle masse d'acqua. Una figura esemplificativa di un bilancio di massa del sale è la numero 3.

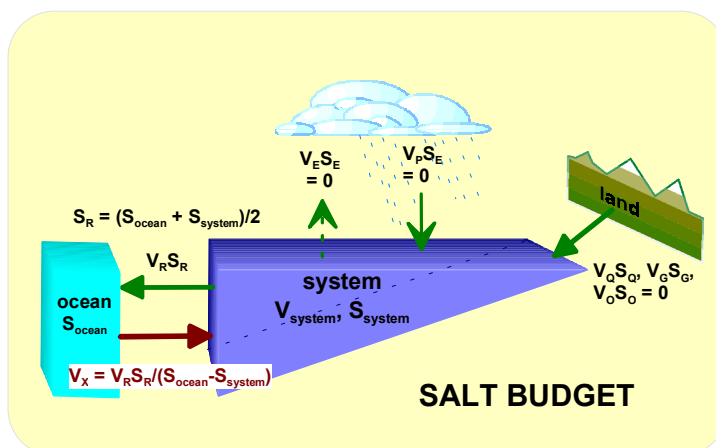


Figura 3. Schema del bilancio di massa del sale

Le simbologie utilizzate sono analoghe a quelle del bilancio di massa dell'acqua:

Gli input sono così indicati:

Parametro	Sigla
Salinità media degli apporti fluviale	$S_Q$
Salinità media delle precipitazioni dirette nel sistema	$S_P$
Salinità media delle acque sotterranee	$S_G$
Salinità media degli altri input d'acqua dolce	$S_O$
Salinità media dell'evaporazione diretta dal sistema	$S_E$
Salinità media del flusso netto al mare (residuale)	$S_R$
Salinità media del flusso di scambio in entrata in laguna	$S_{Xinflowing}$
Salinità media del flusso di scambio in uscita dalla laguna	$S_{Xoutflowing}$
Salinità media del mare adiacente la laguna	$S_{sea}$
Salinità media del sistema in esame	$S_{sys}$

Tutti i valori di salinità sono espressi in psu (per mille).

In prima approssimazione  $S_Q, S_P, S_G, S_O$  e  $S_E$  possono essere considerati trascurabili. Qualora uno di questi parametri sia diverso da zero, la formula va modificata di conseguenza. Il file excel di calcolo allegato a questo documento tiene comunque in considerazione questa eventualità. Inoltre  $S_{Xinflowing}$  può essere approssimato a  $S_{sea}$  e  $S_{Xoutflowing}$  a  $S_{sys}$ .  $S_R$  è la salinità nella zona di comunicazione tra il mare e la laguna e viene considerato uguale alla media tra  $S_{sea}$  e  $S_{sys}$ .



$$S_R = (S_{sea} + S_{sys})/2$$

Il bilancio di massa del sale è rappresentato dall'equazione:

$$V_X S_{sea} + V_R S_R - V_X S_{sys} = 0$$

e quindi:

$$V_X = \frac{V_R S_R}{(S_{sys} - S_{sea})}$$

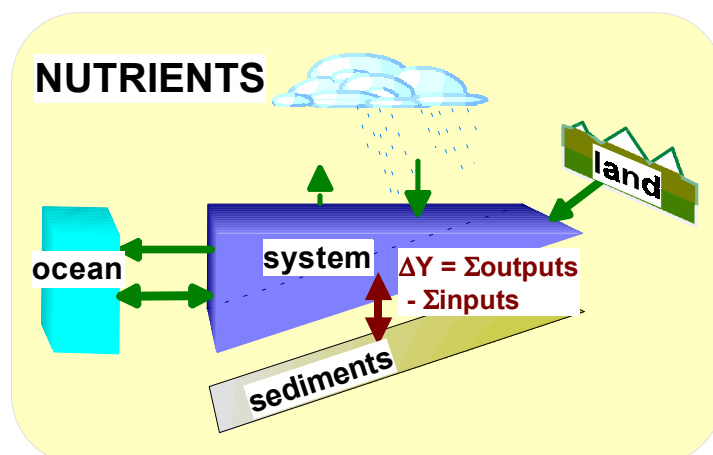
### 5.3. Stima del tempo medio di residenza

Il tempo medio di residenza dell'acqua nel sistema ( $\tau$ ) è un parametro molto importante e può essere stimato conoscendo il volume medio del sistema  $V_{sys}$ ,  $V_R$  e  $V_X$ .

$$\tau = \frac{V_{sys}}{(V_X + |V_R|)}$$

## 6. Comportamenti non conservativi

I nutrienti inorganici hanno un classico comportamento non conservativo poiché all'interno del sistema subiscono trasformazioni che portano ad una loro minor disponibilità (sink) o ad una loro mobilizzazione (source). Tra queste trasformazioni le più importanti sono l'organizzazione o la mineralizzazione di nutrienti nei tessuti dei produttori primari e l'adsorbimento-deadsorbimento nel sedimento. In altre parole il termine  $\Sigma(\text{sources-sinks})$  dell'equazione (1) non può essere trascurato ma invece diviene un parametro importante per la stima di funzioni dell'ecosistema. Un bilancio di un nutriente generico indicato con Y è illustrato in figura 4.



**Figura 4.** Schema del bilancio di massa di un generico nutriente definito Y

Anche per i nutrienti si assume lo stato stazionario e quindi  $dM/dt$  si pone uguale a zero. Per comodità  $\Sigma(\text{source-sink})$  viene indicato come  $\Delta Y$  e quindi l'equazione (1) diviene:

$$\Sigma(\text{input}) + \Sigma(\text{output}^*) + \Delta Y = 0$$

\* anche in questo caso gli output sono indicati con segno negativo

La simbologia utilizzata è la seguente:

Parametro	Sigla
Concentrazione media del nutriente negli apporti fluviale	$Y_Q$
Concentrazione media del nutriente nelle precipitazioni dirette nel sistema	$Y_P$
Concentrazione media del nutriente nelle acque sotterranee	$Y_G$
Concentrazione media del nutriente negli altri input d'acqua dolce	$Y_O$
Concentrazione media del nutriente nelle evaporazioni dirette dal sistema	$Y_E$
Concentrazione media del nutriente nel flusso netto al mare (residuale)	$Y_R$
Concentrazione media del nutriente nel mare adiacente la laguna	$Y_{\text{sea}}$
Concentrazione media del nutriente nel sistema in esame	$Y_{\text{sys}}$

L'unità di misura di concentrazione utilizzata è  $\text{mmol m}^{-3}$  che equivale a micromoli su litro o micromolare ( $\mu\text{M}$ ). Moltiplicando la concentrazione per il flusso si ottiene il carico di Y ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1} \times \text{mmol m}^{-3} = \text{mmol d}^{-1}$ ).

Il bilancio di massa di Y diviene:

$$\Sigma(\text{input}) + \Sigma(\text{output}^*) + \Delta Y = 0$$

$$\Delta Y = -(\Sigma(\text{input}) + \Sigma(\text{output}^*))$$

$$\Delta Y = -(V_Q Y_Q + V_P Y_P + V_G Y_G + V_O Y_O + V_E Y_E + V_R Y_R + V_X (Y_{\text{sea}} - Y_{\text{sys}}))$$

N.B. ogni V mantiene il suo segno (input = positivo; output = negativo)

Valori positivi di  $\Delta Y$  indicano che c'è una netta mobilitazione del nutriente Y in quanto gli output sono maggiori degli input e quindi i processi che portano alla liberazione di Y (sources) prevalgono su quelli che portano ad una sua scomparsa (sink). Valori negativi di  $\Delta Y$  indicano invece che il sistema agisce come un sink del nutriente Y cioè che gli input sono superiori agli

output e quindi che i processi di accumulo di Y nel sistema sono prevalenti su quelli di mobilizzazione.

Con questi modelli non si riescono a stimare i valori assoluti di questi processi ma solo il loro effetto netto a livello dell'ecosistema.

Il valore di  $\Delta Y$  ottenuto dalla formula indicata sopra è espresso in  $\text{mmol Y d}^{-1}$  ed è riferito all'intera laguna. Dividendo  $\Delta Y$  per la superficie della laguna si ottiene un  $\Delta Y$  riferito all'unità di superficie ed espresso in  $\text{mmol Y d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ; quest'ultimo è un parametro comparabile tra le diverse lagune. Questo valore è ottenuto dall'analisi dell'intera laguna e quindi difficilmente valutabile sperimentalmente.

Per l'applicazione del modello LOICZ sono necessari almeno il calcolo del bilancio di massa del fosforo e dell'azoto inorganico disciolto (DIP e DIN) ottenendo quindi un  $\Delta\text{DIP}$  e un  $\Delta\text{DIN}$ . Per l'azoto è necessario considerare la somma delle varie forme inorganiche ( $\text{DIN} = \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ ) mentre per il P si considera il SRP (soluble reactive P).

## **7. Calcoli stechiometrici per stimare funzioni generali dell'ecosistema**

Per stimare funzioni generali dell'ecosistema con semplici calcoli stechiometrici è necessario il rapporto molare di C:N:P dei principali produttori primari. Una stima diretta di questo rapporto è sempre preferibile ma, in mancanza di questa, il rapporto 106:16:1 di Redfield è adeguato per ambienti dominati da fitoplancton; per altri produttori primari è possibile ottenere delle informazioni in Atkinson & Smith (1983) e Duarte (1992).

Il rapporto CNP ci permette di stimare il rapporto con cui C, N e P inorganici vengono assimilati ed organicati nei processi di produzione primaria e il rapporto con cui C, N e P organici vengono rilasciati come composti inorganici, quindi mineralizzati, nei processi di decomposizione. Dallo studio di questi due processi (produzione e respirazione) è possibile analizzare il metabolismo della laguna a livello ecosistemico, in particolare, una prevalenza dei processi di produzione rendono il sistema definibile come "autotrofico" mentre una prevalenza dei processi di respirazione lo rendono "eterotrofico". Si definisce in questo modo il metabolismo netto dell'ecosistema (NEM) che è la differenza tra i processi di produzione e quelli di respirazione (p-r). Quest'importante funzione dell'ecosistema può venire stimata dal bilancio di C, N e P e da come questi elementi vengono accumulati o persi dal sistema. La stima più accurata del NEM può venire effettuata considerando il bilancio del C ma spesso i dati relativi a quest'elemento sono insufficienti in quanto di difficile misurazione anche considerando che larga parte del ciclo del C è in fase gassosa ( $\text{CO}_2$ ). E' quindi necessario utilizzare i bilanci di N e P e come questi seguono il ciclo del C nei suoi passaggi tra forme organiche ed inorganiche.

Naturalmente N e P subiscono altri processi all'interno del sistema che si sommano a questo semplice movimento di organicazione e mineralizzazione come: adsorbimento e de-adsorbimento su particelle di sedimento e processi microbici come la denitrificazione e l'azotofissazione.

Tralasciando una dettagliata trattazione dei cicli di C, N e P possiamo comunque affermare che il ciclo del P è quello che segue più fedelmente quello del carbonio in quanto per l'N i processi di denitrificazione e di azotofissazione sono slegati da produzione e respirazione di C.

Viene quindi assunto che  $\Delta\text{DIP}$  sia inversamente proporzionale a NEM (assunzione 4) cioè che un  $\Delta\text{DIP}$  negativo indica una perdita netta di DIP e quindi una prevalenza dei processi di produzione che portano ad una organicazione di questo nutriente. La proporzionalità è data dal rapporto C:P dei produttori primari che indica come questi due cicli sono legati tra loro. Quindi per calcolare NEM:

$$\text{NEM} = (p-r) = -\Delta\text{DIP} (\text{C:P})$$

Valori negativi di NEM indicano invece un sistema eterotrofico dove la respirazione di sostanza organica è prevalente sulla produzione e quindi vi è un rilascio netto di DIP che si manifesta con un valore di  $\Delta\text{DIP}$  positivo.

Si tratta comunque di una grossa semplificazione del ciclo del P in quanto vengono trascurati i processi di adsorbimento e deadsorbimento su particelle di sedimento che portano a variazioni di concentrazioni di DIP non legate al ciclo del C. Tuttavia i processi che disaccoppiano il ciclo di questo nutriente con quello del C sono generalmente meno importanti che per l'N.

LOICZ raccomanda di usare  $\Delta\text{DIP}$  quando è possibile, per stimare NEM. Una trattazione dettagliata di questa motivazione e del perché non conviene utilizzare  $\Delta\text{DIC}$  (dissolved inorganic carbon) o  $\Delta\text{O}_2$  è in <http://data.ecology.su.se/MNODE/Methods/stoich.htm> e in Gordon *et al*, (1996).

Un'ulteriore importante funzione dell'ecosistema è legata al metabolismo dell'azoto. Anche in questo caso si parte da  $\Delta\text{DIP}$  e dal rapporto molare dei produttori primari, in questo caso N:P. Si calcola innanzitutto il comportamento non conservativo dell'azoto legato a quello del P e quindi, per le assunzioni indicate sopra, con quello del C. Si ottiene un  $\Delta\text{DIN}$  atteso che indichiamo con  $\Delta\text{DIN}_{\text{exp}}$  con la seguente formula:

$$\Delta\text{DIN}_{\text{exp}} = \Delta\text{DIP} (\text{N:P})$$

$\Delta\text{DIN}_{\text{exp}}$  è considerato il flusso di DIN legato ai processi di produzione e respirazione; la differenza tra  $\Delta\text{DIN}$  osservato e  $\Delta\text{DIN}_{\text{exp}}$  può essere utilizzato quindi per stimare altri processi del ciclo dell'N come azotofissazione e denitrificazione. Si definisce quindi

$$(nfix-denit) = \Delta DIN - \Delta DIN_{exp} = \Delta DIN - \Delta DIP (N:P)$$

Anche in questo caso si ottengono indicazioni sulla prevalenza di una serie di processi su altri e non dei relativi valori assoluti. Valori positivi di (nfix-denit) indicano una prevalenza dei processi che portano alla maggior presenza di DIN come la fissazione biologica dell'N mentre valori negativi indicano una prevalenza dei processi dissimilativi come la denitrificazione. Anche in questo caso viene fortemente semplificato il ciclo dell'N in quanto vengono trascurati o meglio inclusi in queste categorie processi molto diversi come ad esempio l'accumulo di N da parte dei vegetali con funzione di riserva e quindi non legato alla produzione di sostanza organica (luxury uptake), viene considerato come denitrificazione.

NEM e (nfix-denit) sono importanti indicatori di funzioni dell'ecosistema. Con il modello LOICZ possono venire stimati e confrontati tra i vari ecosistemi costieri.

## 8. Alcune verifiche per controllare la corretta applicazione del modello

Dopo aver eseguito tutti i calcoli indicati in questo documento è possibile controllare se il modello è stato applicato in modo corretto ad un certo sistema o se certe assunzioni sono troppo pesanti o se le caratteristiche del sistema sono tali da dover procedere in modo diverso. Il fine del modello LOICZ è comunque quello di ottenere risultati confrontabili tra i diversi sistemi e quindi di non modificare la procedura di calcolo sino ad ottenere un modello tagliato per un certo ecosistema ma che dia risultati, anche se più accurati, difficilmente confrontabili con gli altri. I diversi percorsi suggeriti sono quindi elaborati in modo da ottenere sempre delle stime di funzioni dell'ecosistema con significato analogo. Per sistemi profondi e stratificati è possibile applicare il modello **multi-layers** in cui il sistema viene diviso in più strati che scambiano materiali tra loro. Nel caso di lagune estese ed arealmente separate è possibile applicare il modello **multi-boxes** in cui il sistema è diviso in diverse zone comunicanti tra di loro. Tutti questi modelli si basano sull'approccio generale descritto in questo documento e sono descritti in dettaglio nel sito web LOICZ (<http://data.ecology.su.se/MNODE/Methods/TOC.HTM>).

### Regole generali per una corretta applicazione del modello LOICZ:

1. Il limite superiore degli apporti fluviali ( $V_Q$ ) è dato dal prodotto della precipitazione annua media ( $m$ ) per l'area del bacino di raccolta ( $m^2$ ); la differenza è imputabile all'evapotraspirazione e alle acque sotterranee.
2.  $V_R$  è di solito negativo in sistemi con clima temperato ma può essere positivo, indicando un flusso netto di acqua marina alla laguna, in ambienti aridi e con elevate evaporazioni.

3. E' buona norma che  $S_{sys}$  sia diverso da  $S_{sea}$  di almeno 1 psu, soprattutto in sistemi di piccole dimensioni e con elevate oscillazioni di salinità. Altrimenti  $V_X$  non è calcolabile con sufficiente precisione. In questi sistemi i bilanci di massa di acqua e sale devono essere calcolati in altro modo, ad esempio con il metodo di Yanagi  
(<http://data.ecology.su.se/MNODE/Methods/YanagiMixing/Yanagi.htm> )
4.  $V_X$  per definizione deve sempre essere positivo. Valori negativi sono imputabili a una scarsa rappresentatività delle medie utilizzate, di solito della salinità. Valori di  $V_X$  negativi (e quindi errati) vengono di solito osservati in casi in cui  $V_R$  è positivo. In questo caso la salinità all'interno della laguna deve essere maggiore di quella del mare e quindi  $V_X$  deve risultare comunque positivo.
5. Una buona regola che conferma l'applicabilità del modello è quella in cui  $\Delta Y$  (dell'intera laguna, quindi espresso in mol  $d^{-1}$ ) sia ragionevolmente elevato rispetto agli input di Y, il rapporto tra  $\Delta Y$  e  $\Sigma input Y$  deve essere maggiore di 0.25. Valori inferiori sono comunque accettabili ma meno significativi.
6. La produzione primaria in ambienti dominati da fitoplancton è in generale tra 25 e 250 mmol C  $m^{-2} d^{-1}$ . Valori esterni a questo intervallo sono possibili ma vanno considerati con attenzione. Sistemi dominati da macroalghe o macrofite possono avere tassi di produzione primaria 2-3 volte superiori. La respirazione dell'ecosistema è dello stesso ordine di grandezza. Tipicamente la differenza tra p e r è del 10%, quindi NEM oscilla tra +0.1p e -0.1p anche se esistono eccezioni, soprattutto in sistemi che ricevono elevati input di nutrienti o di sostanza organica labile. Comunque valori di NEM oltre  $\pm 0.25 p$  devono essere considerati con cautela.
7. Valori tipici e con pochissime eccezioni, di azoto fissazione minori di 1 mmol  $m^{-2} d^{-1}$  mentre i valori tipici di denitrificazione sono compresi tra 0.5 e 2 mmol  $m^{-2} d^{-1}$  con picchi anche superiori a 10 mmol  $m^{-2} d^{-1}$  in sistemi con elevati tassi di respirazione bentica. Questi due processi non sono necessariamente legati come p e r e quindi (nfix-denit) può oscillare tra il massimo di azotofissazione (1 mmol  $m^{-2} d^{-1}$ ) e il massimo di denitrificazione (-10 mmol  $m^{-2} d^{-1}$ ) anche se tipicamente l'intervallo è tra +1 e -2 mmol  $m^{-2} d^{-1}$ .

## 9. Esempio di applicazione del modello LOICZ one box – one layer.

Sistema: *Golfo di Lingayen (Filippine)*

Area: 2100 Km<sup>2</sup>

Profondità media: 46 m

Volume medio =  $46 \times 2.1 \times 10^9 = 96.6 \times 10^9 m^3$

Dati utilizzati:

$V_Q = 27 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$	$\text{DIN}_Q = 16.2 \text{ mmol m}^{-3}$	$\text{DIP}_Q = 3.5 \text{ mmol m}^{-3}$
$V_G = 3 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$	$\text{DIN}_G = 88.0 \text{ mmol m}^{-3}$	$\text{DIP}_G = 1.2 \text{ mmol m}^{-3}$
$V_P = 13 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$	$\text{DIN}_{\text{sys}} = 0.81 \text{ mmol m}^{-3}$	$\text{DIP}_{\text{sys}} = 0.12 \text{ mmol m}^{-3}$
$V_E = 8 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$	$\text{DIN}_{\text{sea}} = 0.51 \text{ mmol m}^{-3}$	$\text{DIP}_{\text{sea}} = 0.05 \text{ mmol m}^{-3}$
$S_{\text{sys}} = 34.04 \text{ psu}$	$S_{\text{sea}} = 34.41 \text{ psu}$	

Malgrado la differenza di salinità media tra il mare e la laguna sia minore di 1 si è deciso comunque di utilizzare il metodo sopra descritto in quanto non sono state osservate ampie oscillazioni di salinità e il sistema è di notevoli dimensioni .

### Bilancio di massa dell'acqua:

$$V_R = -V_Q - V_P - V_G - V_O + |V_E| = -27 \times 10^6 - 3 \times 10^6 - 13 \times 10^6 + 8 \times 10^6 = -35 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$$

### Bilancio di massa del sale:

$$S_R = (S_{\text{sys}} + S_{\text{sea}})/2 = (34.41 + 34.04)/2 = 34.23 \text{ psu}$$

$$V_X = \frac{V_R S_R}{(S_{\text{sys}} - S_{\text{sea}})} = (-35 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \times 34.23 \text{ psu}) / (34.04 - 34.41) = 3238 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$$

### Tempo medio di residenza:

$$\tau = \frac{V_{\text{sys}}}{(V_X + |V_R|)} = (97 \times 10^9 \text{ m}^3) / (3238 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} + 35 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}) = 30 \text{ d}$$

### Bilancio di massa del fosforo inorganico:

$$\text{DIP}_R = (\text{DIP}_{\text{sea}} + \text{DIP}_{\text{sys}})/2 = (0.12 + 0.05)/2 = 0.09 \text{ mmol m}^{-3}$$

$$\Delta \text{DIP} = -(V_Q \text{DIP}_Q + V_P \text{DIP}_P + V_G \text{DIP}_G + V_O \text{DIP}_O + V_E \text{DIP}_E + V_R \text{DIP}_R + V_X (\text{DIP}_{\text{sea}} - \text{DIP}_{\text{sys}})) = - (27 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \times 3.5 \text{ mmol m}^{-3} + 3 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \times 1.2 \text{ mmol m}^{-3} - 35 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \times 0.09 \text{ mmol m}^{-3} + 3238 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} (0.05 \text{ mmol m}^{-3} - 0.12 \text{ mmol m}^{-3})) = 132 \times 10^6 \text{ mmol d}^{-1}$$

su  $\text{m}^2$ :

$$\Delta \text{DIP} = 132 \times 10^6 \text{ mmol d}^{-1} / (2.1 \times 10^9 \text{ m}^2) = 63 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

### Bilancio di massa dell'azoto inorganico:

$$\text{DIN}_R = (\text{DIN}_{\text{sea}} + \text{DIN}_{\text{sys}})/2 = (0.51 + 0.81)/2 = 0.66 \text{ mmol m}^{-3}$$

$$\Delta\text{DIN} = -(V_Q\text{DIN}_Q + V_P\text{DIN}_P + V_G\text{DIN}_G + V_O\text{DIN}_O + V_E\text{DIN}_E + V_R\text{DIN}_R + V_X(\text{DIN}_{\text{sea}} - \text{DIN}_{\text{sys}})) = -(27 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \times 16.2 \text{ mmol m}^{-3} + 3 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \times 88 \text{ mmol m}^{-3} - 35 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \times 0.66 \text{ mmol m}^{-3} + 3238 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \times (0.51 \text{ mmol m}^{-3} - 0.81 \text{ mmol m}^{-3})) = 293 \times 10^6 \text{ mmol d}^{-1}$$

su  $\text{m}^2$ :

$$\Delta\text{DIN} = 295 \times 10^6 \text{ mmol d}^{-1} / (2.1 \times 10^9 \text{ m}^2) = 140 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

### Calcoli stechiometrici usando C:N:P = 106:16:1

$$\text{NEM} = (p-r) = -\Delta\text{DIP (C:P)} = -63 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1} \times 106 = -6678 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1} = -6.7 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

$$(\text{nfix-denit}) = \Delta\text{DIN} - \Delta\text{DIN}_{\text{exp}} = \Delta\text{DIN} - \Delta\text{DIP (N:P)} = 140 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1} - (63 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1} \times 16) = -868 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1} = -0.87 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

Piccole variazioni nei calcoli sono dovute all'arrotondamento dei risultati. Il grado di approssimazione è legato alle dimensioni del sistema e alla rappresentatività dei dati utilizzati.

### Conclusioni:

Il golfo di Lingayen è un sorgente sia di DIP che di DIN poiché sia  $\Delta\text{DIP}$  che  $\Delta\text{DIN}$  sono positivi. Per entrambi i nutrienti, gli input sono minori degli output e quindi entrambi vengono mobilizzati all'interno del sistema. NEM è negativo, quindi la respirazione prevale sulla produzione ed il sistema è definibile come eterotrofico. Il valore negativo di (nfix-denit) ottenuto indica che nel sistema prevalgono processi dissimilatori dell'N quali la denitrificazione.

Per la verifica finale  $V_X$  è positivo,  $\Delta\text{DIP}/\Sigma\text{inputDIP}=1.34$  e  $\Delta\text{DIN}/\Sigma\text{inputDIN}=0.41$ , NEM è nell'ordine di grandezza corretto (6.7 è il 25% di 26.8  $\text{mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) e (nfix-denit) è compreso tra 1 e -2  $\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ .



## **10. Riferimenti bibliografici**

Atkinson, M.J. and Smith, S.V. 1983. C:N:P ratios of benthic marine plants. *Limnology and Oceanography* 28:568-574.

Duarte C.M., 1992. Nutrient concentrations of aquatic plants: patterns across species. *Limnology and Oceanography* 37:882-889.

Gordon, Jr., D. C., P. R. Boudreau, K. H. Mann, J.-E. Ong, W. L. Silvert, S. V. Smith, G. Wattayakorn, F. Wulff and T. Yanagi, 1996. LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. LOICZ Reports & Studies No 5, 1-96.

Shuttleworth, W.J. 1993. Evaporation, Ch.4, In D.R. Maidment (ed.), *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, various pagings.