

STIME DI BIOMASSA E PRODUZIONE PRIMARIA NEL CANALE DI SICILIA, ATTRAVERSO MISURE DI FLUORESCENZA IN VIVO DELLA CLOROFILLA A.

Nardello Ilaria*, Marcelli Marco^o, Lazzara Luigi*

*Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Biologia Animale e Genetica, Via Romana 17, 50125 Firenze, Italia

^o Dipartimento di Ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile, Università della Tuscia/Viterbo, Via delle Boccelle, Civitavecchia (Rm).

Abstract

La misura della fluorescenza in vivo della clorofilla-a è diffusamente utilizzata come stima della biomassa fitoplanctonica, mentre dalla differenza tra emissione massima e minima del PS2 (fluorescenza variabile, FV), si può ricavare una stima della capacità di produzione primaria (PP) del fitoplancton. I dati sperimentali sono stati raccolti in situ nel periodo primaverile, durante due campagne oceanografiche realizzate nel Canale di Sicilia (aprile '96 e marzo '98). La fluorescenza in vivo è stata misurata con spettrofluorimetro e batisonda fluorimetrica (PrymProd). Le misure di FV sono state utilizzate per la stima della PP, congiuntamente alle misure di irradianza PAR subacquea e di concentrazione di clorofilla-a in un modello analitico articolato in due espressioni (eliofilia e sciafila) secondo lo stato di fotoadattamento del campione. I valori di biomassa rivelano popolamenti fitoplanctonici in fioritura primaverile, con concentrazioni di clorofilla integrata nello strato 0-100 m, che vanno da 14 a 60 mg/m². La distribuzione della PP evidenzia zone più produttive nella porzione settentrionale e neritica del Canale di Sicilia, con valori di produzione potenziale sino a 564 mg C/ m² d, e minimi di 218 nella porzione a SE, oceanica. Con stime alternative ricavate dalla applicazione di un modello bio-ottico per dati telerilevati (Morel et Berthon, 1989), è stato realizzato un confronto che ha mostrato buona concordanza.

1.0 Introduzione

La produzione primaria marina (PP), ovvero la quantità di carbonio organicato per unità di tempo e superficie attraverso la fotosintesi algale, gioca un ruolo chiave nel ciclo globale del carbonio. I produttori primari marini, principalmente il fitoplancton, costituiscono solo l'1% della biomassa terrestre ma contribuiscono al 40% del globale processo di assimilazione di carbonio inorganico (Falkowski et al., 2002), risultando potenzialmente rilevanti negli studi di cambiamento climatico.

La fotosintesi acquatica dipende essenzialmente dalla disponibilità di luce, di nutrienti, e dalla stessa biomassa, intesa come concentrazione di clorofilla-a. La radiazione luminosa fotosinteticamente attiva e disponibile per il processo fotosintetico (PAR), in mare, diminuisce esponenzialmente con la profondità e costituisce il principale fattore limitante la PP. Infatti, la PP è generalmente descritta in termini analitici dalla relazione fotosintesi/luce (curva P/I), come una funzione di PAR e biomassa. L'interesse di questo studio risiede nella possibilità di effettuare una stima quantitativa della produzione primaria marina, a carico del fitoplancton, utilizzando alcuni parametri della relazione P/I (Ik, I_{max}), e l'efficienza di fotosintesi risultante da misure in vivo di fluorescenza della clorofilla-a. L'emissione di fluorescenza da parte del fotosistema II (PSII), a 690nm, permette di stimare la concentrazione della clorofilla-a senza estrazione, in intervalli di concentrazione da 0.01 a 10 mg m⁻³.

Attraverso l'impiego di fluorimetri di tipo pump&probe (PrymProd, FRRF), a impulsi modulati (PAM), o spettrofluorimetri tradizionali e l'uso di particolari composti organici (DCMU), è possibile discriminare tra emissioni minime e massime di fluorescenza (effetto Kautsky), e da queste stimare indirettamente l'efficienza fotosintetica di un organismo fotoautotrofo. L'intensità dell'emissione è condizionata dallo stato fisiologico degli organismi fotoautotrofi, dall'intensità luminosa e da altri fattori ambientali.

Nell'area del Canale di Sicilia, le immagini satellitari di colore dell'oceano SeaWiFS e di temperatura superficiale del mare NOAA hanno evidenziato la presenza ricorrente di strutture idrologiche caratterizzate da un grado di trofismo elevato (Bohm et al., 1998). Il fenomeno è stato indagato nella stagione primaverile di fioritura del fitoplancton, attraverso le campagne oceanografiche Symplex96 e Symplex98.

2.0 Materiali e metodi

Scopo della ricerca e schema delle operazioni in mare

Le campagne oceanografiche Symplex96 (12 aprile-12 maggio 1996) e Symplex98 (27 marzo-20 aprile 1998) sono state realizzate a bordo della R/V Urania (CNR). Le stazioni di campionamento sono state effettuate in aree differenziate (neritica ed oceanica), con un campionamento più fitto delle acque a Sud di Capo

Passero, per la presenza di una particolare struttura idrodinamica (filamento). Le stazioni campionate durante le campagne Symplex96 e Symplex98 sono rispettivamente 41 e 36. I campioni sono stati raccolti generalmente a 5-7 quote comprese tra 0-200 m, scelte sulla base dei profili batimetrici di fluorescenza, temperatura e salinità, in modo da rappresentare la variazione verticale della distribuzione ed efficienza fotosintetica del fitoplancton. Le misure bio-ottiche e i tradizionali dosaggi dei pigmenti fotosintetici sono stati realizzati congiuntamente per la definizione di relazioni affidabili tra misure di fluorescenza in vivo e concentrazione della clorofilla-a, e per la validazione delle stime di produzione primaria marina da misure di fluorescenza variabile.

Misure di fluorescenza in vivo

Le misure di efficienza di fluorescenza sono state effettuate in vivo a bordo della nave tramite uno spettrofluorimetro da banco Perkin Elmer LS5 su campioni discreti prelevati a quote note. Durante la sola campagna Symplex96 l'efficienza di fluorescenza del fitoplancton è stata indagata anche con il profilatore subacqueo PrymProd. Lo spettrofluorimetro LS5 Perkin Elmer permette di analizzare la fluorescenza in vivo (e in estratti) selezionando sia la lunghezza d'onda incidente sul campione (eccitazione) sia quella in uscita dal campione (emissione), con un'ampiezza spettrale tra i 5 e i 10 nm consentendo una notevole precisione nella misura. Le misure sono inoltre effettuate in assenza di fonti attiniche. I campioni sono stati analizzati secondo uno schema di coppie di eccitazione e di emissione in base ai massimi di assorbimento ed emissione di fluorescenza dei singoli pigmenti (430-435/680-682 nm, per la clorofilla-a). Ogni campione è stato poi trattato con 50 µl di DCMU (3 (3-4 diclorofenil)-1,1-dimetilurea): questo composto organico inibisce il trasporto elettronico nella catena fotosintetica (Slovacech et Hannan, 1977), determinando un aumento dell'energia dissipata sotto forma di fluorescenza. I valori di fluorescenza misurati prima e dopo l'aggiunta dell'erbicida (rispettivamente F_n e F_d) ci permettono di calcolare l'indice di rendimento di fluorescenza ($[FRI=(F_d-F_n)/F_d]$), strettamente connesso alla capacità di fotosintesi del campione (Samuelson et Oquist, 1977). Le misure sono state ripetute 3-5 volte su ogni campione, mediate, e corrette dai valori medi dell'acqua di mare filtrata con Nucleopore 0.22 µm (bianco).

Il fluorimetro a doppio impulso Primprod 1.08, realizzato dall'Istituto di Biofisica dell'Università di Mosca (Antal et al., 1999; Antal et al., 2001), permette di misurare concentrazioni di clorofilla-a tra 0.03 e 50 µg/l, ed effettua misure di efficienza fotosintetica in situ. Il metodo si basa sulla misura della fluorescenza indotta da una rapida successione di tre impulsi luminosi: sondaggio - pompaggio - sondaggio (pump&probe). Durante il primo impulso (sondaggio) viene determinata l'intensità di fluorescenza della clorofilla-a con i centri di reazione aperti (F_0). Dopo un breve intervallo si produce un impulso luminoso di

intensità saturante (pompaggio), che trasforma tutti i centri di reazione in stato chiuso. Il secondo sondaggio misura l'intensità massima di fluorescenza (F_m). Così, in ogni ciclo di misurazione vengono determinati i valori F_0 e F_m . L'efficacia della ripartizione delle cariche del centro di reazione è determinata come rapporto $(F_m-F_0)/F_m$. Dal valore di F_0 , attraverso i coefficienti di calibrazione, viene determinata la concentrazione del fitoplancton.

Estrazione e dosaggio dei pigmenti liposolubili

Direttamente in nave, è stata eseguita la filtrazione su filtri in fibra di vetro Whatmann GF/F (diametro 47 mm) di volumi compresi tra 3000 a 5000 ml tramite una pompa a vuoto, (depressione non superiore a 150 mm Hg). I filtri, posti in provette da centrifuga con 5 ml di acetone al 100% disidratato, sono stati conservati in frigo a -20 °C per evitare la degradazione dei pigmenti. In laboratorio, è stata completata l'estrazione del pigmento, tramite omogeneizzazione del filtro, aggiunta di 5 cm³ di acetone 80% e centrifugazione per la separazione del filtro dal soprannatante (4000 giri/min.; 15 minuti). La concentrazione dei pigmenti fotosintetici e accessori del fitoplancton è stata determinata sull'estratto acetone utilizzando la misura spettrofotometrica di densità ottica (Jeffrey & Humphrey, 1975). I campioni con una misura di densità ottica a 664 nm inferiore a 0.080, per 5 cm di cammino ottico, sono stati dosati con tecniche fluorimetriche (Lazzara et al., 1997). In entrambi i casi è stata determinata la concentrazione di pigmento fotosintetico attivo (clorofilla *a*) e dei feopigmenti, tramite acidificazione (Lorenzen, 1967).

Misure di irradianza in acqua e in aria

Per la misura del campo radiante subacqueo è stata utilizzata una fotobatisonda prototipo del Laboratorio di Ecologia dell'Università degli Studi di Firenze (Innamorati et al., '94), provvista di: due quantometri coseno PAR (LI192A), per la misura dell'irradianza discendente (E_d) e ascendente (E_u); un quantometro a collettore sferico per la misura dell'irradianza scalare (E_s); sensori di pressione, temperatura e tilt; un quantometro PAR a sensibilità coseno è atmosferico e ha misurato l'irradianza discendente in superficie. Un altro sensore di questo stesso tipo acquisiva inoltre in continuo misure di irradianza PAR ogni 1-2 min. La centralina meteorologica della nave ha restituito dati di irradianza energetica globale (E_{glob} :300-2500 nm) acquisendo ogni 2-10 minuti. Dalla regressione lineare indipendente tra queste due serie d'acquisizioni, è stata ricostruita l'escursione giornaliera della PAR alla superficie del mare per tutti i giorni di entrambe le campagne: $E_{(glob)} [W/m^2]=0.496 E_d(PAR 0+) - 167.823$ ($n=173$, $r=0.997$). Le parabole incomplete sono state interpolate con i punti ricavati dalla curva di massimo irraggiamento teorico, in base all'ora e alle coordinate geografiche dell'area (L. Massi, com. pers.), ipotizzando un'attenuazione atmosferica del 16%.

Le stime di profondità di zona eufotica (Zeu) sono state effettuate sulla base dei profili di irradianza PAR discendente misurata dai radiometri subacquei. Ove

mancanti il valore di Zeu è stato stimato sulla base delle relazioni (Morel et Berthon, 1989):

$$1) \text{Zeu} = 568.2 \text{ Chl tot}^{-0.746} \quad \text{if } \text{Zeu} < 102\text{m}$$

$$2) \text{Zeu} = 200.0 \text{ Chl tot}^{-0.293} \quad \text{if } \text{Zeu} > 102\text{m}$$

dove (Chl tot) = concentrazione di clorofeopigmenti integrata nello strato eufotico.

Questa variabile è a sua volta approssimata dalla relazione tra concentrazione media dei clorofeopigmenti nello strato di penetrazione ottica (CPD) e Chl tot.

Stime di produzione primaria

Per la stima della produzione primaria da misure di fluorescenza variabile è stato impiegato un modello derivato dagli algoritmi della batisonda Prymprod. Tale modello (Phyto_VFP) è stato realizzato appositamente per utilizzare i dati di efficienza fotosintetica raccolti con il metodo della fluorescenza attiva (Marcelli et al. 1997; Marcelli et al., 2003), attraverso una scomposizione della relazione P/I in tre regioni linearizzate, secondo il valore di PAR subacquea alle varie profondità (z):

$$1) \text{PAR}(z) > I_k \quad \text{PP}(z) = \text{FV}(z) \cdot \text{Cl}(z) \cdot 0.1 \cdot \text{PAR}(z)$$

$$2) I_k < \text{PAR}(z) < I_{\text{max}} \quad \text{PP}(z) = \text{FV}(z) \cdot \text{Cl}(z) \cdot 0.1 \cdot I_k$$

$$3) \text{PAR}(z) > I_{\text{max}} \quad \text{PP}(z) = \text{FV}(z) \cdot \text{Cl}(z) \cdot 0.1 \cdot \text{PAR}(z)$$

dove: I_k = intensità di irradianza PAR dove la relazione P/I passa da fotolimitata a saturata; I_{max} = valore di PAR a cui si attribuisce il massimo assoluto della relazione P/I; $\text{PP}(z)$ = produzione primaria ($\text{mg C/m}^3 \text{ h}$) alla profondità z; FV = Variable fluorescence $(F_{\text{max}} - F_0)/F_{\text{max}}$; Cl = concentrazione di clorofilla a stimata con metodo fluorimetrico (mg/m^3); 0.1 = coefficiente stechiometrico di rendimento fotosintetico massimo medio (mol C/mol fotoni), secondo Myers (1980); PAR = radiazione disponibile per la fotosintesi ($\mu\text{E/m}^2 \text{ s}$).

I valori di I_k e I_{max} impiegati sono teorici e riferiti a due tipologie di fotoadattamento fitoplanctonico: $I_k = 300 \mu\text{E/m}^2 \text{ s}$ e $I_{\text{max}} = 600 \mu\text{E/m}^2 \text{ s}$ per il modello *eliofilo*; $I_k = 60 \mu\text{E/m}^2 \text{ s}$ e $I_{\text{max}} = 300 \mu\text{E/m}^2 \text{ s}$ per il modello *sciafilo*.

Il modello è stato applicato alle misure effettuate in profilo dalla batisonda PrymProd (Symplex96). Tutti i profili di PP così ricavati sono stati integrati per lo spessore della zona eufotica e per la durata del periodo di illuminazione giornaliero (circa 13 ore), per ottenere stime di produzione primaria giornaliera per unità di superficie ($\text{mg C/m}^2 \text{ d}$).

La produzione primaria netta giornaliera integrata nella colonna d'acqua (PPn) è stata inoltre stimata con un modello biotico (Morel et Berthon, 1989):

$\text{PPn} = (1/39) \cdot \rho \cdot \text{Chl}(\text{tot}) \cdot \text{PAR}(0+) \cdot \Psi^*$ dove ρ = rapporto medio tra la clorofilla a e i clorofeopigmenti totali, $\text{Chl}(\text{tot})$ = concentrazione di clorofeopigmenti integrata nello strato eufotico (mg/m^2), $\text{PAR}(0+)$ = radiazione visibile alla superficie del mare ($\text{E/m}^2 \text{ d}$), Ψ^* = efficienza fotosintetica areale di una unità di biomassa algale espressa come clorofilla, per unità di superficie (g C/g Chl m^2). Dalle misure realizzate negli oceani di tutto il mondo, questo coefficiente risulta

effettivamente assai poco variabile (Morel, 1978; Platt, 1986; Falkowski et Raven, 1987), ed è stato pertanto considerato costante ($\Psi = 0.44$).

Per entrambe le campagne, le stime di PPn del modello biotico sono state distinte in

a) potenziali (PPn_pot.), quando i valori di $\text{PAR}(0+)$ inserite nel calcolo sono teorici (ricavate dalle curve di massimo irraggiamento teorico, in base all'ora e alle coordinate geografiche dell'area, ipotizzando un'attenuazione atmosferica del 16%;

b) effettive (PPn_eff.), quando i valori di $\text{PAR}(0+)$ utilizzati sono misurati dalle centraline meteorologiche.

3.0 Risultati

Relazioni fluorescenza/clorofilla

Le misure spettrofluorimetriche di fluorescenza naturale (F_n ; ex/em = 435/682 nm) e indotta dal DCMU (F_d) sono state messe in relazione con la concentrazione dei clorofeopigmenti (Chl) dagli estratti acetonicici. I coefficienti di correlazione si dimostrano elevati in entrambe le campagne (Tab.1), e sono relativamente stabili nel tempo le pendenze delle rette di regressione (Tab. 1).

Anche la relazione tra la fluorescenza massima (F_{max}) indotta dall'impulso saturante di PrymProd e la concentrazione di clorofeopigmenti risulta altamente correlata ($\text{Chl} = 0.073 F_{\text{max}} + 0.22$; $r = 0.894$, $n = 90$. Marcelli et al., 1997).

Tali correlazioni consentono di dedurre la concentrazione dei clorofeopigmenti da dati fluorimetrici. Poiché questi ultimi sono campionati con maggiore frequenza, le relazioni stabilite permettono un notevole miglioramento della risoluzione spaziale e temporale della distribuzione della biomassa.

	Relazione	N	r
Symplex96	$F_n = 1.43 \text{Chl} - 0.04$	143	0.939
Symplex96	$F_d = 1.72 \text{Chl} + 0.067$	143	0.929
Symplex98	$F_n = 1.80 \text{Chl} - 0.04$	94	0.821

Tab.1 - Relazioni tra misure spettrofluorimetriche (435/682 nm) di fluorescenza naturale di clorofilla-a (F_n) e fluorescenza indotta da DCMU (F_d) con la concentrazione di clorofeopigmenti.

Distribuzione della biomassa

Relativamente alla campagna Symplex96, il valore medio della clorofilla a integrata tra 0-100m è pari a 27.47 mg/m^2 , variando tra 11.76 e 58.78 mg/m^2 . Si evidenziano valori superiori a 30 mg/m^2 a ridosso della costa di Agrigento e, isolatamente, nella parte sud-occidentale del Canale di Sicilia; allo stesso ordine di grandezza appartengono i massimi relativi disposti con continuità lungo il margine orientale della piattaforma continentale. Le porzioni centrale ed occidentale dell'area indagata presenta invece estrema oligotrofia con un valore medio di clorofilla integrata pari a 15.35 mg/m^2 (stazioni 189, 168, 155, 143; d.s. = 3.64). Il

massimo assoluto, misurato in corrispondenza della stazione 197, al largo della costa di Agrigento, è pari a 58.78 mg/m^2 ; massimi relativi consistenti, ($43-49 \text{ mg/m}^2$) si rilevano nelle stazioni 41, 113, e 56, localizzate nella porzione orientale della piattaforma. Nella primavera del '98, il valore medio della concentrazione dei clorofeopigmenti integrata 0-100 è pari a 26.86 mg/m^2 , appena inferiore a quello riscontrato per la campagna del '96. La distribuzione delle stazioni campionate copre una porzione di bacino meno ampia, rispetto al '96; comunque, relativamente alle aree in cui è possibile effettuare una sovrapposizione spaziale, la zona a ridosso si notano alcune analogie nella distribuzione geografica dei massimi relativi di concentrazione in clorofeopigmenti. La zona a ridosso della scarpata orientale si conferma essere tra le più ricche, con valori massimi di clorofilla integrata fino a 84.49 mg/m^2 di clorofilla a in corrispondenza della stazione 04, variando mediamente tra 50 mg/m^2 , nella zona settentrionale (staz. 55, 57), e 43 mg/m^2 in prossimità del Banco di Medina (stazioni 07, 06).

Distribuzione dell'irradianza

L'integrale giornaliero medio dell'irradianza PAR effettivamente misurata alla superficie del mare risulta del 26% più elevato nella campagna del '98; in linea teorica, esso dovrebbe essere invece inferiore dell'8.5%. Nel 1996, la PAR reale è mediamente inferiore alla teorica (potenziale) di circa il 40%, e nelle giornate con cielo coperto tale differenza raggiunge il 70%. Nella campagna del '98, invece, la differenza è stata meno accentuata: l'integrale giornaliero effettivo raggiunge mediamente l'87% del valore teorico e nelle giornate più nuvolose supera comunque il 45%. Nella stazione 06 il valore di PAR effettiva è inferiore alla teorica di soli 0.7 punti percentuali.

In acqua, i profili della fotobatisonda hanno permesso di valutare la profondità della zona eufotica e il coefficiente di attenuazione verticale medio della PAR nelle stazioni campionate. La profondità media della zona eufotica è 65.75 m ($ds=17.56$) nella campagna del '96, e 63.10 m nel '98 ($ds= 11.49$). Il coefficiente di attenuazione verticale medio della PAR (K_d) risulta identico nelle due campagne (0.08 m^{-1} ; $ds=0.02$).

Con riferimento alla classificazione di Morel et Prieur (1977), tutti i punti della regressione tra i logaritmi dell'integrale di clorofilla-a nella zona eufotica (Chl tot) e la profondità della stessa zona eufotica sono risultati appartenenti al caso 1, ovvero acque limpide in cui l'attenuazione luminosa è principalmente dovuta alla concentrazione della biomassa fitoplanctonica ($\log \text{Chl tot} = -1.77 \log \text{Ze} + 2.58$; $n=31$, $r=0.84$).

Stime di produzione primaria

Dall'analisi dei profili di fluorescenza variabile indotta da DCMU, si evidenzia che il massimo dell'attività fotosintetica è generalmente localizzata nello strato superficiale, tra 2 e 20 m ($\text{FRI} > 0.5$) ed è invece minima in corrispondenza dei massimi di concentrazione di clorofilla ($\text{FRI} < 0.35$; Symplex96), mediamente rilevati intorno a 60 m. A profondità maggiori (70-120m),

l'attività fitoplanctonica può risultare più o meno alta rispetto alla superficie, e solitamente più elevata rispetto ai massimi di biomassa. I profili di FRI sono stati raggruppati in tipologie rappresentative (Fig. 1, Symplex96).

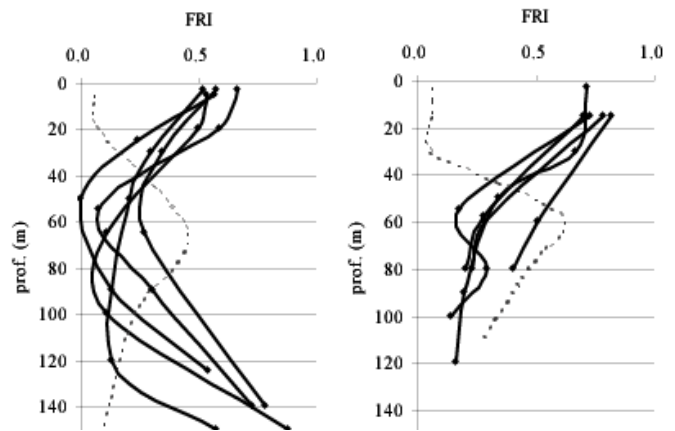


Fig. 1 - Symplex96. Profili di rendimento di fluorescenza da DCMU raggruppati in tipologie. Per ogni diagramma è rappresentato il relativo profilo medio di concentrazione di clorofeopigmenti (linea tratteggiata).

La distribuzione geografica della produzione primaria giornaliera potenziale per unità di superficie (PPpot.), risultante dall'applicazione del modello biotico (Morel et Berthon, 1989), è rappresentata in Fig. 2, per entrambe le campagne, con simboli proporzionali alla quota di produzione.

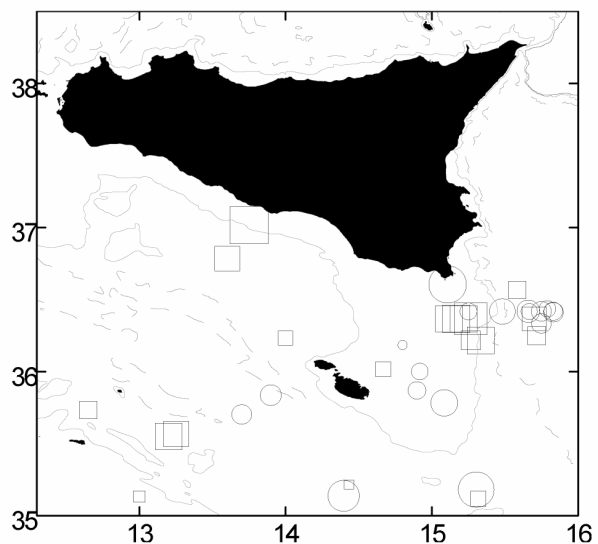


Fig. 2 - Distribuzione geografica della produzione primaria potenziale stimata con modello bio-ottico, per Symplex96 (quadrati), e Symplex98 (cerchi). Le aree dei simboli sono proporzionali all'intensità della PPn ($197 - 804 \text{ mg C / m}^2 \text{ d}$).

Nel periodo aprile-maggio 1996, la PPpot. varia tra 200 e $800 \text{ mg C / m}^2 \text{ d}$. Le zone più produttive sono situate sulla piattaforma continentale siciliana, in corrispondenza dei massimi di clorofilla integrata 0-100m, ovvero al largo della costa di Agrigento e nella zona nord-orientale della piattaforma continentale. La

stazioni oceaniche sono discretamente meno produttive, con valori intorno a 200 mg C/ m²d, con l'eccezione delle stazioni 21 e 175, ravvicinate, tra Malta e Lampedusa; il minimo assoluto è stato stimato nella stazione 155, a Sud di Malta. Complessivamente, si osserva un generale gradiente negativo in direzione Sud. Nel 1998, in una stagione primaverile meno avanzata (marzo-aprile), le stime di produzione giornaliera potenziale sono mediamente più basse (28%), comprese tra 164.1 e 564.6 mg C/m² d. In questo caso non emerge una distinzione sistematica tra la produttività delle stazioni neritiche e oceaniche, mentre si osserva un leggero gradiente positivo in direzione Sud.

La produzione primaria giornaliera effettiva risulta sempre minore della potenziale, del 35% nella primavera del '96 (PPeff. media= 294.7 mg C/m² d, st.dev=159) e del 20% nel '98 (PPeff. media= 275.41 mgC/m² d, st.dev=93).

La PP giornaliera risultante dall'integrazione dei profili di fluorescenza variabile di PrymProd nella zona eufotica è compresa tra 50.06 e 899.62 mg C/m² (Symplex96) quando è stato applicato il modello eliofilo, mediamente superiore del 35% rispetto alla produzione potenziale indicata dal modello biottico. Nell'ipotesi di un popolamento sciafilo, le stime variano invece tra 216.22 e 523.26 mg C/m² d, risultando mediamente appena superiori (9.8%) alle stime "effettive" del modello biottico.

I risultati delle stime calcolate sono riassunti in tab. 2.

Symplex 96	PAR (0+) effettiva	PPn. effettiva	PPn. potenziale	Phyto-VFP Mod. eliofilo	Phyto-VFP Mod. sciafilo
	E/m ² d	mg C/m ² d	mg C/m ² d	mg C/m ² d	mg C/m ² d
min	18.15	110.94	197.28	50.06	216.22
max	44.26	524.61	804.47	899.62	523.36
media	39.69	294.66	464.38	625.78	323.64
dev.st	6.76	121.66	158.69	203.02	85.43
cvar	17.0%	41.3%	34.2%	32.4%	26.4%

Symplex 98	PAR (0+) effettiva	PP_biott. Effettiva	PP_biott. potenziale
min	26.26	118.12	164.13
max	55.38	490.20	564.58
media	49.33	275.41	334.50
dev.st	8.05	92.97	96.96
cvar	16.3%	33.8%	29.0%

Tab.2 - Symplex96 e 98. Stime di produzione primaria giornaliera da indici fluorimetrici della batisonda PrymProd (PP_FVP),e dal modello biottico (Morel et Berthon, 1989). Sono riportati i valori integrali giornalieri di PAR(0+) misurata (effettiva).

4.0 Discussione e conclusioni

L'uso di misure e indici fluorimetrici ha prodotto relazioni biottiche affidabili. Le correlazioni tra fluorescenza massima, misurata da PrymProd nel '96, con la concentrazione dei clorofeopigmenti sono risultate elevate (Chl= 0.218 Fmax+0.073; r=0.894),

consentendo l'uso delle misure di fluorescenza variabile in modelli di stima della produzione primaria, in chiaro accordo con le stime fornite dall'applicazione di modelli validati, come il biottico di Morel e Berthon (1989), e coerenti con i valori attesi per sistemi oligomesotrofici in periodo primaverile, nel Mediterraneo. In un'area come l'Arcipelago toscano, con potenzialità produttive simili, la variazione annuale della PP giornaliera risulta tra 150 e 550 mg C/m² d (Innamorati et al. 1995). Antoine e Morel (1995) indicano per l'area del Canale di Sicilia una produzione compresa tra 200 e 500 mg C/m² d, che corrisponde all'intervallo di PPn del modello biottico, tra 110 e 524 mg C/m² d nel '96, e tra 118 e 490 mg C/m² d nel '98. Le stime realizzate per Symplex96 dall'applicazione del modello PrymProd con coefficienti sciafilo, sono superiori solo del 9.8% a quelle del modello biottico e rimangono perfettamente inserite negli stessi intervalli (tra 216 e 523 mg C/m² d). La produzione stimata dal modello biottico per il '98, benché mediamente inferiore, rimane compresa nello stesso ambito (120-500 mg C/m² d), confermando indirettamente le stime effettuate per il '96, sia dal modello biottico che dal modello Phyto-VFP a coefficienti sciafilo. L'applicazione delle misure di fluorescenza variabile in modelli differenziati (eliofilo e sciafilo) induce a ritenere che questi popolamenti di fitoplancton siano piuttosto adattati a basse intensità di irradianza PAR (sciafilia). Nelle relazioni tra la fluorescenza misurata in situ dal fluorimetro SeaTech e la concentrazione di clorofilla-a (Nardello, 1999), il coefficiente angolare della regressione risulta più basso nel sottogruppo fotosaturato (>800 µE/m²sec), indicando che il rendimento di fluorescenza è più basso in condizioni di fotosaturazione, come descritto dalla letteratura (Falkowski e Raven, 1997). Il coefficiente di correlazione è sempre più alto nel subset >800 µE/m²s (per Symplex96, r=0.934; Symplex98, r=0.948), rispetto al sottogruppo <800 µE/m²s (per Symplex96, r=0.81; Symplex98, r=0.928). Quest'ultimo appare quindi meno omogeneo, indicando probabilmente che la soglia individuata come fotosaturante debba essere riconsiderata e abbassata, in accordo con la probabile sciafilia dei popolamenti fitoplanctonici del Canale di Sicilia, in primavera.

Per i risultati ottenuti, riteniamo che l'algoritmo operativo della batisonda PrymProd (Marcelli et al, 1997) costituisca una valida base di partenza per lo sviluppo di un modello di calcolo per la stima della produzione primaria marina, basato sulla variazione spaziale (batimetrica), e temporale, sia dell'efficienza fotosintetica del fitoplancton, che della radiazione luminosa PAR (Zacchei, 2002), principale fattore limitante alla produzione primaria in mare. L'uso di un profilatore subacqueo, che misuri in continuo lungo la colonna d'acqua, presenta indubbi vantaggi circa la copertura spaziale e temporale della misura, con un notevole contributo all'agognata sinotticità nello studio dei complessi sistemi biologici, in mare.

5.0 Bibliografia

- Antoine, D., A. Morel and J. André, 1995: Algal pigment distribution and primary production in the Eastern Mediterranean sea derived from Coastal Zone color Scanner observations. *J. Geophys. Res.*, 100: 16193-16209.
- Antal T. K., Venediktov P. S., Konev Yu. N., Matorin D. N., Hapter R., Rubin A. B. (1999). Assessment of vertical profiles of photosynthesis of phytoplankton by fluorescent method. *Oceanologia (Russia)*, 39(2), 314-320.
- Antal T.K., Venediktov P.S., Matorin D.N., Ostrowska M., Wozniak B., Rubin A.B. (2001). Measurement of phytoplankton photosynthesis rate using a pump-and-probe fluorometer. *Oceanologia (Poland)*, 43(3), 291-313.
- Bohm E., B. Buongiorno Nardelli, C. Brunet, R. Casotti, F. Conversano, F. Corato, E. D'acunzo, F. D'ortenzio, D. Iudicone, L. Lazzara, O. Mangoni, M. Marcelli, S. Marullo, L. Massi, G. Mori, I. Nardello, C. Nuccio, M. Ribera d'Alcala, V. Saggiomo, R. Santoleri, M. Scardi, S. Sparnocchia, S. Tozzi, S. Zoffoli, 1998. SYMPLEX Experiment: first results on oceanic mesoscale dynamics and related primary production from AVHRR and SeaWiFS satellite data and field experiments. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 3496:137-149.
- Falkowski P.G., Raven J.A., 1997. *Acquatic photosynthesis*, Blackwell Science, 282:288.
- Falkowski, P.G. 2002. The Ocean's Invisible Forest. *Scientific American* 287:38-45.
- Jeffrey S.W., Humprey G.F., 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophyll-a, b, c, c2 in algae, phytoplankton and higher plants. *Biochem. Physiol. plants*: 167:191-194.
- Hartig P., Wolfstein K., Lippermeier S., Colijn F., 1998. Photosynthetic activity of natural microphytobenthos population measured by fluorescence (PAM) and ¹⁴C- tracer methods: a comparison. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Vol. 166 (53-62).
- Kolber, Z., Falkowski P.G., 1993. Use of active fluorescence to estimate phytoplankton photosynthesis in situ. *Limnol. Oceanogr.* 38: 1646-1665.
- Innamorati M., Massi L., Lazzara L., Cartei P., 1994. Biomassa fitoplanctonica e proprietà ottiche del mare. *Biol. Mar. Medit.*, 1 (1):83-88.
- Innamorati M., Lazzara L., Nuccio C., Mori G., Massi L., 1995. Nutrienti, biomassa e produzione fitoplanctonica nell'Alto Tirreno Toscano. *Atti della società toscana di Scienze Naturali. Mem serie A 102 (supp)*: 137-150.
- Lazzara L., Massi L., Nuccio C., Biondi N., Innamorati M., 1997. Phytoplankton ecology: irradiance, particles, chlorophyll, pigments, absorption, fluorescence, production and species density in Terranova Bay, Ross Sea. *Nat. Progr. Ant. Res.*, Data Report.
- Lorenzen C.J., 1967. Determination of chlorophyll and phaeopigments spectrophotometric equations. *Limnology Oceanography.*, 22(4)709-722.
- Marcelli M., Campana, O., Di Maio, A., Mangoni, O., Ribera, D' Acalà, M., Saggiomo, V., Tozzi, S., Fresi, E. 1997. Development of a new operative method to estimate primary production in the pelagic system with a quasi-synoptic space/time scale. *International Conference Progress in Oceanography of the Mediterranean Sea. Roma, Novembre 17-19 1997. Abstract volume pp. 309-310.*
- Marcelli M., Carlini L., Di Maio A., Lazzara L., Nardello I., Vellucci V., Ribera D'Alcalà M. Modello di stima della produzione primaria pelagica basato sulle variazioni circadiane dell'efficienza fotosintetica. XIII congresso SitE, Como, 08-10 settembre 2003.
- Myers J., 1980. On the algae: thoughts about physiology and measurements of efficiency. In "Primary productivity in the sea", ed. by P.J. Falkowski, Plenum Press, NY.
- Morel A., Prieur L., 1977. Analysis of variations of ocean colour. *Limnol. Oceanogr.* 22:709-722.
- Morel, A., 1978. Available, usable and stored radiant energy in relation to marine photosynthesis. *Deep-Sea Res.*, 25, 673-688.
- Morel, A. and J.-F. Berthon, 1989. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer : Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnol. Oceanogr.*, 34(8), 1545-1562.
- Nardello I., 1999. Analisi delle variazioni della fluorescenza in vivo della clorofilla per lo studio della distribuzione di biomassa e produzione primaria nel Canale di Sicilia, in primavera. Tesi di Laurea, SMFN, Università degli Studi di Firenze, pp.76.
- Platt T., 1986. Primary production of the ocean water column as a function of surface light intensity: Algorithms for remote sensing. *Deep-Sea Res.* 33: 14.9-163.
- Samuelsson G., Oquist G., 1977. A method for studying photosynthetic capacities of unicellular algae based on in vivo chlorophyll fluorescence. *Physiol. Plant.* 40, 315:319.
- Slovacech R., Hannah P.J., 1977. In vivo fluorescence determination of phytoplankton Chlorophyll-a. *Limnol. Oceanogr.*, 22(5):91+-9.927.
- Zacchei I., 2002. Variazioni circadiane della capacità fotosintetica nel fitoplancton, tramite misure di fluorescenza variabile. Tesi di laurea, Facoltà SMFN, Università Degli Studi di Firenze, pp. 117.