



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

FLORE

Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

La microflora simpagica bioindicatrice di condizioni ambientali estreme nell'ecosistema pack-ice.

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

Original Citation:

La microflora simpagica bioindicatrice di condizioni ambientali estreme nell'ecosistema pack-ice / L. LAZZARA; NARDELLO I. E GALLO C.. - In: BIOLOGIA MARINA MEDITERRANEA. - ISSN 1123-4245. - STAMPA. - 11:(2004), pp. 242-254.

Availability:

The webpage <https://hdl.handle.net/2158/213511> of the repository was last updated on

Terms of use:

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

Publisher copyright claim:

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)

L. LAZZARA, I. NARDELLO, C. GALLO

LA MICROFLORA SIMPAGICA BIOINDICATRICE DI CONDIZIONI
AMBIENTALI ESTREME NELL'ECOSISTEMA *PACK-ICE*(*)

*SYMPAGIC MICROALGAE AS BIOINDICATOR OF EXTREME CONDITIONS
IN THE PACK- ICE ECOSYSTEM*

Estratto da:

BIOLOGIA MARINA MEDITERRANEA, Periodico edito dalla Società Italiana di Biologia Marina
Vol. 11 - fasc. 2 - 2004 (PARTE PRIMA) - *SOUSSE* (31 Maggio - 6 Giugno 2003)

L. LAZZARA, I. NARDELLO, C. GALLO

Dipartimento di Biologia Animale e Genetica, Università di Firenze, Via Romana, 17 - 50125 Firenze, Italia.
luigi.lazzara@unifi.it

LA MICROFLORA SIMPAGICA BIOINDICATRICE DI CONDIZIONI AMBIENTALI ESTREME NELL'ECOSISTEMA PACK-ICE^(*)

SYMPAGIC MICROALGAE AS BIOINDICATOR OF EXTREME CONDITIONS IN THE PACK- ICE ECOSYSTEM

Abstract

The Antarctic pack-ice system represents an extreme environment for life. During the Austral springs of 1997 and 1999, we recorded a high concentration of sympagic microalgae in the bottom and platelet-ice layers, where temperatures ranged between -4 and -7 °C. Only 19% of surface visible irradiance (PAR) reached the bottom-ice layer, further attenuating to 0.8% just below it. The ecology and physiology of phytoplankton communities in the pack-ice system were largely influenced by these factors. The bottom and platelet layers were dominated by two species of pennate diatoms (*Entomoneis kjellmannii* and *Nitschia* cf. *stellata*) which showed adaptation to low levels of irradiance in the specific absorption coefficient of chlorophyll *a* ($0.015 > a_{676}^* > 0.007$) and presence of xanthophylls and chlorophyll-C. Spatial distribution and taxonomic composition of phytoplankton assemblages also showed variations, according to changes in the environmental and ice conditions.

Key-words: phytoplankton, antarctic, irradiance, shading, acclimation, *Entomoneis kjellmannii*.

Introduzione

Le condizioni ambientali concorrono in modo determinante alla caratterizzazione della nicchia ecologica degli organismi viventi. I bioindicatori sono organismi in grado di subire variazioni facilmente rilevabili e quantificabili delle condizioni ambientali a cui sono adattati, quindi generalmente hanno una nicchia ecologica ben definita e caratteristiche stenoece. L'uso di indicatori biologici per valutare o monitorare le condizioni ambientali è una pratica affermata ed una prospettiva sempre più promettente in ecologia.

Il ghiaccio marino annuale o *pack-ice*, rappresenta un habitat ideale per una varietà di microrganismi, alcuni dei quali sono solo ospiti occasionali, mentre altri svolgono all'interno del ghiaccio il loro intero ciclo vitale. Esistono vari modi in cui le comunità simpagiche possono insediarsi e svilupparsi nel ghiaccio, tutti sono legati ai processi fisici di formazione e scioglimento del ghiaccio marino stesso (Ackley e Sullivan, 1994). Nel ghiaccio colonnare ad esempio, lo sviluppo delle comunità simpagiche dipende soprattutto dalla presenza dei *brine* (canali e tasche salmastre presenti all'interno del ghiaccio colonnare) e dalle leggi fisiche che regolano l'apporto di salinità lungo la colonna di ghiaccio (Arrigo *et al.*, 1991). I *brine*, infatti oltre a regolare gli scambi con la colonna d'acqua sottostante, rappresentano anche l'habitat per le comunità dello strato intermedio e quanto più sono numerosi ed espansi e ciò avviene quando il ghiaccio inizia a sciogliersi e i canali si allargano, tanto maggiore è la probabilità che vi crescano microrganismi. La parte inferiore del ghiaccio colonnare, che viene indicata come *bottom-ice*, rappresenta invece la porzione di ghiaccio dove si ha la più alta stabilità e probabilità di colonizzazione dovuta essenzialmente

(*) Ricerca svolta con i finanziamenti del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide

ai liberi scambi di nutrienti con la colonna d'acqua sottostante. Nel *bottom-ice*, che spesso è ridotto a 10-20 cm, si può arrivare ad un accumulo di biomassa estremamente alta che supera anche 1000 mg chl a m⁻³ (Palmisano e Sullivan, 1983). A questo livello, le maggiori fioriture, limitate essenzialmente dal fattore luce, si hanno in piena estate australe (Dieckmann *et al.*, 1998). Queste comunità, caratteristiche soprattutto del ghiaccio costiero, sono spesso associate a quelle dello strato di ghiaccio a scaglie o *platelet-ice* sottostante il *bottom-ice*. Anche nel *platelet* il primo fattore di limitazione per la crescita di fitoplancton simpagico è la luce, la cui attenuazione dipende soprattutto dalla natura del ghiaccio e dallo spessore di neve soprastante. Non manca invece, di solito, l'apporto dei nutrienti, essendo il contatto con la colonna d'acqua sottostante diretto: il *platelet* infatti è formato per il 25% da ghiaccio e per il 75% da acqua marina. Quindi la disponibilità di nutrienti, del maggiore spazio per la crescita e la presenza del ghiaccio come elemento di protezione dall'azione di pascolo da parte di bentos e zooplancton, fanno di questa struttura un habitat ideale per molti microrganismi. Per quanto differenziati, i popolamenti del ghiaccio marino sono costituiti principalmente da diatomee, in particolare gli strati di *bottom*, sono dominati da *Entomoneis* sp., *Nitzschia* cfr *stellata*, *Berkeleya* cfr *rutilans*, *Pleurosigma* sp. (Palmisano e Sullivan, 1983; Lazzara *et al.*, 1995; Guglielmo *et al.*, 2000). Soprattutto negli strati superficiali e a concentrazioni molto minori si possono ritrovare dinoflagellate o primnesiofitee come *Phaeocystis* (Ackley e Sullivan, 1994).

Ci si può attendere dunque che le specie dominanti nelle comunità simpagiche abbiano caratteristiche eco-fisiologiche particolari e connesse con le condizioni ambientali estreme del sistema *pack-ice*. Questo lavoro intende verificare l'esistenza e quantificare tali caratteristiche, indicando la loro corrispondenza con le particolari condizioni ambientali.

Materiali e metodi

Nel corso delle due spedizioni italiane in Antartide del 1997 (XIII) e del 1999 (XV) durante la primavera australe, sono stati indagati la distribuzione spaziale e temporale, di composizione e abbondanza dei popolamenti microalgali simpagici in Baia Terra Nova, tramite lo studio delle loro proprietà ottiche e l'analisi della penetrazione dell'irradianza in acqua e nel ghiaccio. Per le varie misure e analisi sono state prelevate carote di ghiaccio come descritto in Guglielmo *et al.* (2000), ogni due-tre giorni e in una stessa area (100 m²): nel 1997 la stazione 5t (74° 41.72' S; 164° 11.63' E) e nel 1999 il campo A (74° 41.2' S; 164° 10.73' E) ed il campo B (74° 42.15' S; 164° 14.60' E).

Nelle carote prelevate sono stati individuati diversi orizzonti e strati, per la XIII spedizione: il superficiale (0-80 cm); l'intermedio (80-130 cm); il *bottom* (130-140 cm) ed il *platelet ice*. Per la XV spedizione: il superficiale (0-110 cm); l'intermedio (110-220 cm); il *bottom* (220-240 cm suddiviso nei due strati 220-230 cm e 230-240 cm a partire dal 17 novembre) ed il *platelet ice*. Le diverse sezioni di ghiaccio sono state quindi utilizzate per le varie misure bio-ottiche di assorbimento, attenuazione e fluorescenza *in vivo*; per le analisi di pigmenti e fitoplancton per la stima della biomassa. A metà del mese di novembre '99, una carota di ghiaccio del campo A, suddivisa in 18 sezioni, è stata usata per ottenere misure dettagliate di temperatura e salinità del *pack-ice*. La salinità è stata ricavata da misure di conducibilità e temperatura sulle sezioni di carota disciolte, la temperatura *in situ* è stata misurata con sonda a termocoppia, immediatamente dopo il prelievo dello strato di ghiaccio soprastante.

Dati meteorologici ed ottici in aria

Le misure atmosferiche di temperatura, umidità relativa e irradianza, sono state realizzate tramite la centralina meteo-radiometrica CARM (prototipo) dotata di un sensore quantico LI-193SA (LICOR), per la misura della radiazione PAR discendente alla superficie del *pack-ice*, di un sensore di irradianza energetica globale CM6B (Kipp e Zonen), di due sensori energetici per la misura di irradianze in due bande dell'ultravioletto UV2/AP e UV2/BP (Delta-T; 373 ± 2 nm; 313 ± 2 nm) del sensore HMP35AC (Vaisala) per la misura della temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e dell'umidità relativa. Le misure acquisite sono state memorizzate tramite il data logger CR10X (Campbell Scientific) ogni 5 minuti. Per confrontare le acquisizioni dei sensori quantici ed energetici nelle diverse bande spettrali, sono state utilizzate le seguenti relazioni: per la conversione di PAR quantica in PAR energetica (Morel e Smith, 1974): $\text{PAR} (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}) = 4.46 \text{ PAR} (\text{Wm}^{-2})$; per la conversione di irraggiamento globale del sole in PAR quantica: $\text{PAR} (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}) = 2.30 \text{ Eglob} (\text{Wm}^{-2})$.

Dati ottici in acqua e su ghiaccio

Per le misure di irradianza, fluorescenza e temperatura in acqua e nel ghiaccio è stata utilizzata la sonda spettroradiometrica PUV 500/510 (Biospherical) costituita da due unità per la misura contemporanea di irradianza sottomarina e superficiale. Entrambe le unità, sono dotate di un sensore quantico PAR e di quattro sensori energetici, per la misura dell'irradianza UV (305, 320, 340, 380 nm), di sensore di radianza a 687 nm per la misura della fluorescenza naturale della clorofilla *in vivo*, di sensori di temperatura e di pressione. Le misure di irradianza sottomarina in profilo verticale sono state realizzate, calando la sonda PUV rivolta verso l'alto, sia attraverso un foro nel *pack-ice* (1 m \varnothing , interno alla *fish-hut*), sia attraverso un foro avente un diametro di 40 cm, all'esterno della *fish-hut*.

Per mezzo di una struttura appositamente realizzata detta "ASTICE", alla quale viene appesa la sonda PUV, è stato possibile effettuare anche la misura dell'irradianza discendente in acqua, proprio al di sotto del *pack-ice* e del *platelet-ice*, allontanando lo strumento dall'asse longitudinale del foro, in modo da evitare l'effetto del cono di luce proveniente dallo stesso. Misure con il PUV sono state realizzate anche su sezioni di ghiaccio: prelevando una carota di ghiaccio tagliata in sezioni di diversa altezza, così come su strati di neve di diversa altezza. Le diverse sezioni di ghiaccio e/o strati di neve sono poste direttamente sopra i sensori di luce della sonda PUV, all'interno di tubi in PVC opaco, aperti alle due estremità, indirizzando gli stessi verso la luce diffusa della volta celeste. Le misure di attenuazione dell'irradianza nella carota di ghiaccio sono state realizzate con la sonda PUV il 26, 27 e 29 novembre 1999 su carotaggi eseguiti nel campo A. Le sezioni della carota sono state tagliate in modo da esaminare diversi strati: 0-20 cm, 25-55 cm, 70-100 cm, 110-140 cm, 170-200 cm, 220-250 cm, 250-260 cm. Gli strati di neve corrispondono invece a diverse altezze: 3.5, 8, 11 e 14 cm. Dai valori di irradianza PAR e UV, dopo le correzioni con gli opportuni valori di offset, sono stati calcolati i coefficienti di attenuazione diffusa dell'irradianza discendente (K_d) per i giorni considerati, secondo la relazione: $K_d = 1/(z_2 - z_1) * \ln [E_d(z_1)/E_d(z_2)]$; dove $E_d(z_1)$ e $E_d(z_2)$ rappresentano rispettivamente l'irradianza discendente in aria e l'irradianza discendente al di sotto dello strato di ghiaccio, mentre la differenza ($z_2 - z_1$) rappresenta l'altezza della sezione di carota considerata.

Su campioni di acqua di mare filtrata, e campioni prelevati dagli strati di *platelet* e *bottom* delle carote di ghiaccio, sono state inoltre fatte misure di assorbimento ed

attenuazione (AC-9, Wetlabs) a nove lunghezze d'onda nel visibile 412, 440, 488, 510, 630, 650, 676, 715 nm. Tutti i campioni sono stati anche filtrati (0.22 μm) e le relative misure fatte sia sul "tal quale" che sul filtrato, in modo da separare i valori di assorbimento e attenuazione del particolato da quelli della sostanza organica disciolta colorata (gilvina). La fluorescenza spettrale *in vivo* è stata misurata con spettrofluorimetro (LS-50, PE) come dettagliato in Lazzara *et al.* (1997). La concentrazione dei pigmenti clorofilliani intesi come clorofeopigmenti per la stima della biomassa autotrofa, è stata determinata entro pochi giorni dal prelievo, con dosaggio spettrofotometrico (Uvikon 930, Kontron) su estratti acetonicici al 90%, seguendo Lazzara *et al.* (1997). Per alcuni estratti relativi a campioni della XV spedizione dopo il 20 novembre, è stato utilizzato il metodo spettrofluorimetrico (Neveux J. e Panouse, 1987) riportando però, per omogeneità, i valori misurati a quelli equivalenti del metodo spettrofotometrico, mediante una regressione condizionale ($R=0.97$, $n=61$) su campioni analizzati con entrambi i metodi. I campioni di fitoplancton per l'analisi al microscopio sono stati conservati e fissati con formalina neutra (soluzione finale 4%). L'osservazione al microscopio per il conteggio ed il riconoscimento tassonomico, è stata fatta utilizzando il metodo Utermhol (Hasle, 1978) ed i microscopi ottici invertiti IM-35 (Zeiss), Diaphot (Nikon) ed OPTTECH, con obiettivi 40 \times ed uso del contrasto di fase. I testi utilizzati per il riconoscimento sono: Balech (1976), Hasle (1964), Hasle (1965a), Hasle (1965b), Manguin (1960), Medlin e Priddle (1990), Priddle e Fryxell (1985), Round *et al.* (1990).

Risultati

L'analisi delle variazioni dell'energia solare globale giornaliera (Fig. 1a) mostra un irraggiamento costantemente elevato per tutto il periodo in esame nel 1999, rivelando una condizione di copertura nuvolosa mediamente minore rispetto al 1997. Per motivi di bilancio radiativo quest'andamento potrebbe essere in accordo con i valori medi giornalieri di temperatura dell'aria più elevati, osservati nella seconda metà del mese di novembre 1997. Da notare che i valori di irraggiamento giornaliero in entrambi gli anni sono più bassi mediamente del 10-20% rispetto ai massimi misurati a Baia Terra Nova nello stesso periodo per gli anni 1987, 1989 e 1994 (Lazzara *et al.*, 2000). L'andamento della temperatura media giornaliera dell'aria nel 1997 (Fig. 1b) mostra un decremento negli ultimi giorni di ottobre e fino al 2 novembre, passando da -10 a -14 $^{\circ}\text{C}$ (minimo mensile) e successivamente un forte innalzamento raggiungendo il 20 di novembre il valore massimo di -0.32 $^{\circ}\text{C}$. Nello stesso periodo del 1999 la temperatura è stata generalmente più bassa: parte da -16 $^{\circ}\text{C}$ ed anche questa volta presenta un forte incremento nella prima settimana di novembre, raggiungendo i -4 $^{\circ}\text{C}$. La maggiore differenza tra i due anni si osserva a partire dalla seconda metà di novembre, infatti nel 1997 la temperatura non scende oltre i -4 $^{\circ}\text{C}$ mentre nel 1999 la temperatura dopo il 14 novembre oscilla tra -10 $^{\circ}\text{C}$ e -6 $^{\circ}\text{C}$.

Nel mese di novembre di entrambi gli anni, nei diversi strati di ghiaccio marino, ma particolarmente nel *bottom* e nel *platelet* si osserva un forte aumento della fitomassa. Nel 1997 nel *bottom-ice* (Fig. 1c) si ha un incremento della concentrazione di clorofeopigmenti da 680 a 2480 mg m^{-3} , valore massimo raggiunto il 21 di novembre, per poi diminuire fino al valore di 1000 mg m^{-3} alla fine del mese. Nel *platelet* invece (Fig. 1d) le concentrazioni variano tra 748 e 248 mg m^{-3} , in questo caso non è stato possibile seguire l'andamento delle concentrazioni oltre il 22 di novembre. Nel 1999 la concentrazione pigmentaria non raggiunge mai valori elevati come nel 1997

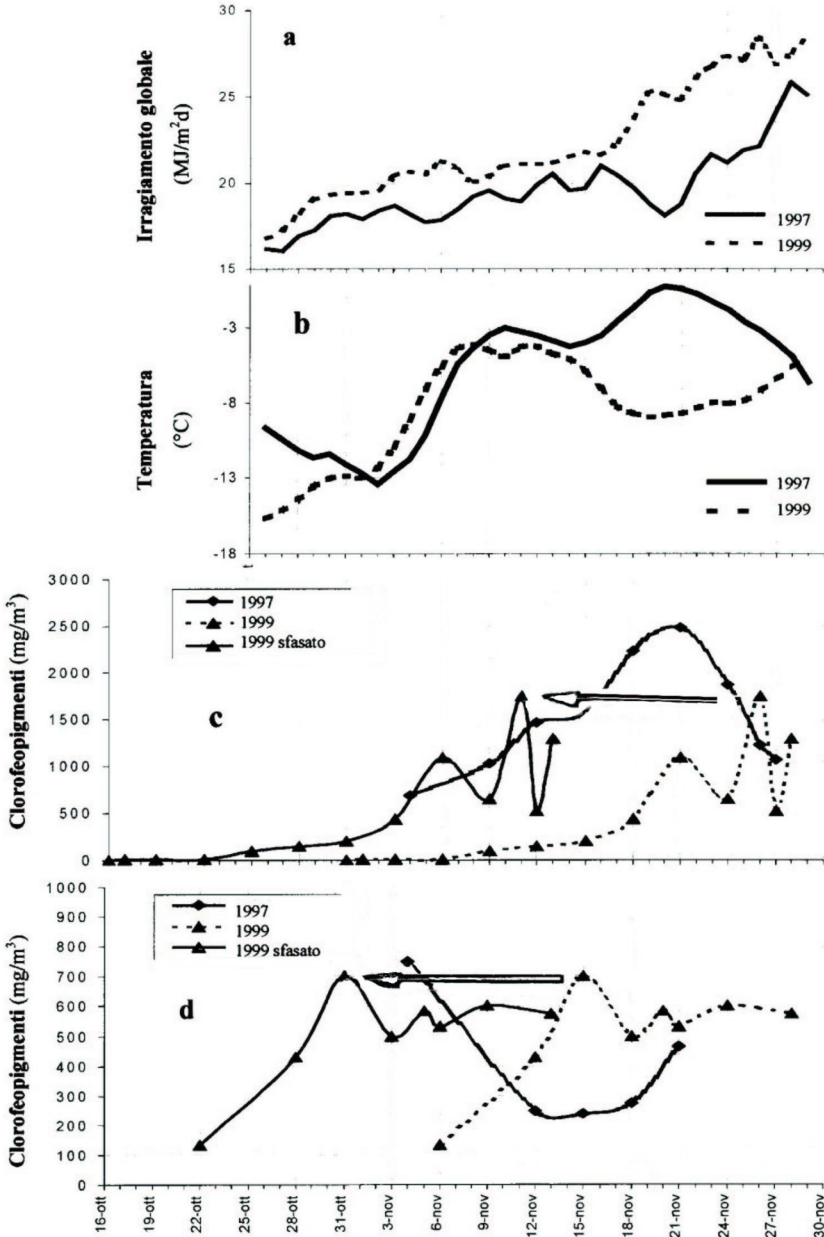


Fig. 1 - Andamenti temporali (media mobile) di: a- irradianza globale giornaliera ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$); b- temperatura media giornaliera ($^{\circ}\text{C}$); c- concentrazione dei clorofeopigmenti (mg/m^3) nel bottom-ice e d- nel platelet-ice. La freccia in c e in d rappresenta l'ipotesi di uno sfasamento di 15 giorni, nel raggiungimento dei valori massimi, tra 1997 e 1999.

Temporal variations of a- global daily irradiance ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$); b- mean daily temperature ($^{\circ}\text{C}$); c- chlorophaeopigments concentration (mg/m^3) in the bottom-ice and d- in the platelet-ice. The arrow in c and d represents an hypothetical 15-days shift, between 1997 and 1999, in the maximum values.

sia nel *bottom*, dove si ha un massimo a fine mese pari a 1740 mg/m^3 , che nel *platelet* dove il massimo si raggiunge invece a metà novembre (716 mg/m^3). L'andamento temporale della densità fitoplanctonica si trova in accordo con quanto osservato nei profili temporali dei clorofeopigmenti: nel 1997 si passa da $95 \cdot 10^6 \text{ cell/l}$ il 10 di novembre a $156 \cdot 10^6 \text{ cell/l}$ il 22 di novembre, nel 1999 invece si osserva un graduale aumento della densità passando da $2 \cdot 10^6 \text{ cell/l}$ a inizio mese a $70 \cdot 10^6 \text{ cell/l}$ a fine mese. Le osservazioni dei campioni di fitoplancton prelevati nel corso della XIII e XV spedizione, mostrano una dominanza di diatomee pennate all'interno delle comunità microalgali simpagiche; in particolare due sono le specie dominanti, *Entomoneis kjellmannii* (ex *Amphiprora* sp.) e *Nitschia* cfr. *stellata*. Altre specie ritrovate nell'intera colonna di ghiaccio, anche se con molta minore abbondanza, sono *Coscinodiscus* cfr. *furcatus*, *Fragilariopsis* cfr. *curta*, e varie specie del genere *Nitschia* tra cui frequentemente *N.* cfr. *taeniformis* e *N.* cfr. *cylindrus*. Un carattere citomorfologico generale delle cellule osservate è costituito dalla abbondanza e visibilità dei cloroplasti.

Il principale risultato dell'indagine è dunque la rilevazione di un'abbondante comunità microalgale simpagica, presente sia nel *pack-ice* che nel *platelet* a Baia Terra Nova, in primavera. In particolare, tra i diversi orizzonti della colonna di ghiaccio si osserva una differenza di biomassa di tre ordini di grandezza, con strati superficiali piuttosto poveri e strati di fondo molto concentrati. La crescita di biomassa autotrofa nel *bottom ice* nel 1997 comporta un aumento di circa 5 volte nell'arco di tre settimane e sembra essere in fase con il primo aumento dell'irradianza, mentre il suo declino inizia dopo un periodo di alta temperatura e un aumento di irradianza. Questa situazione è causa probabile del progressivo scioglimento del pack annuale, che insieme all'aumento della fotoinibizione, induce la fase finale della fioritura delle comunità microalgali simpagiche. Nel 1999 invece, sia la radiazione solare che la biomassa del *bottom ice* mostrano una tendenza a crescere durante tutto il mese di novembre, mentre la temperatura non va mai al di sopra di $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Ciò può essere posto in relazione con la presenza di un *pack-ice* di circa 1 metro più spesso di quello del 1997, cosa che sicuramente ha la conseguenza di ridurre l'effetto fotoinibitorio che l'aumento dell'energia radiante provoca sulla biomassa. Da notare dunque che la stagione nel 1999 appare in ritardo rispetto al 1997, ed infatti con un arretramento ipotetico di 15 giorni si possono porre in fase i rilievi dei due anni (Figg. 1c, 1d).

I coefficienti di attenuazione diffusa dell'irradianza PAR discendente, ricavati da profili effettuati dal 3 al 29 novembre del 1999, sono espressi in Fig. 2. In particolare sono stati distinti tre diversi strati: da 3 a 5 m comprendenti lo strato del *platelet*; 5-10 m appena sotto il *platelet* e infine dagli 8 m fino alla profondità massima raggiunta. In generale si può osservare il Kd relativo alla PAR presenta un incremento temporale da 2 a 4 volte dall'inizio alla fine del mese di novembre, coerentemente con la variazione della biomassa. Valori massimi si raggiungono nello strato 3-5 m (0.78 m^{-1}) già a metà novembre (come per la biomassa nel corrispondente *platelet*) e minimi negli strati più profondi (fino a 0.05 m^{-1}).

Su di una carota di ghiaccio prelevata a metà del mese di novembre (XV Spedizione), nel campo A, sono stati misurati i profili di temperatura e salinità (Fig. 3) lungo tutto lo spessore del ghiaccio annuale e della neve soprastante. Nel ghiaccio si osservano tre strati principali ben differenziati: il primo fino a ca. 100 cm con temperature minime e salinità più elevate, il secondo fino a 240 cm con minimi di salinità e temperature crescenti, il terzo cioè gli ultimi 10-20 cm corrispondente al *bottom-ice*, con incremento sia di temperatura che di salinità. Da notare che, come di seguito descritto, le separazioni intorno ai 100 e ai 240 cm corrispondono anche a forti variazioni delle proprietà ottiche del ghiaccio (attenuazione diffusa dell'irra-

dianza). Si tratta dunque di almeno due tipi di ghiaccio assai diversi, corrispondenti probabilmente a eventi successivi di formazione del pack annuale.

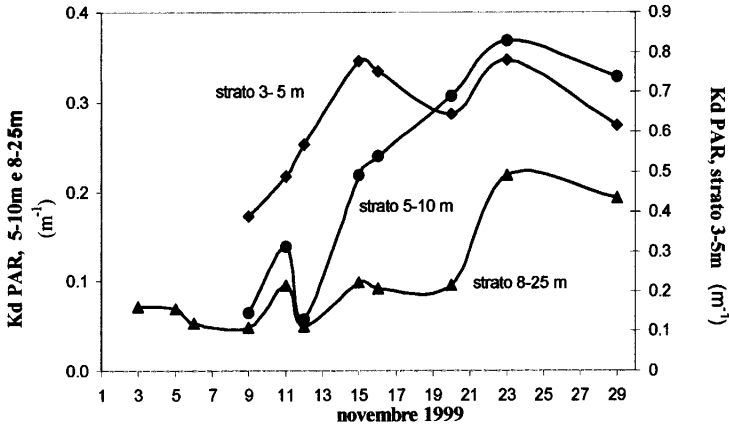


Fig. 2 - Andamento temporale dei coefficienti di attenuazione diffusa (K_d ; m^{-1}) in tre diversi strati di acqua, ottenuti da misure di irradianza con PUV applicato ad "ASTICE".

Temporal variations of the mean diffuse attenuation coefficient (K_d ; m^{-1}) measured at three depth, by PUV probe and "ASTICE".

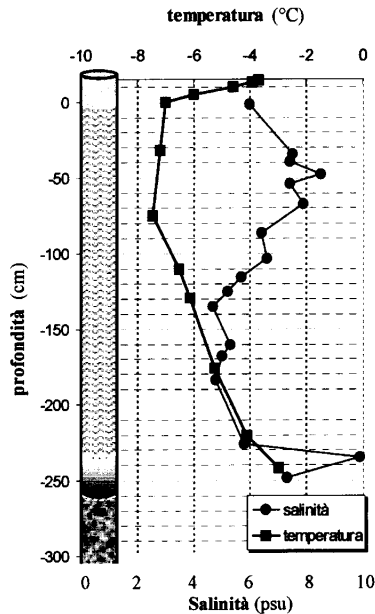


Fig. 3 - Profili batimetrici di temperatura ($^{\circ}C$) e salinità (psu), misurate lungo la carota di ghiaccio, nella neve sovrastante e all'interfaccia acqua-ghiaccio.

Bathymetric profiles of temperature ($^{\circ}C$) and salinity (psu), measured along an ice carrot, in the snow layer above, and at the ice-water interface.

Come si può osservare dalla Fig. 4a, il coefficiente di attenuazione diffusa dell'irradianza (K_d) nello strato di neve è di gran lunga maggiore rispetto a quello misurato nelle diverse sezioni della carota di ghiaccio (Fig. 4b). Nella neve il K_d per la PAR varia tra 65 e 32 m^{-1} mentre per gli UV si passa da 56 a 80 m^{-1} con una tendenza a diminuire con l'aumento della lunghezza d'onda considerata. Nel ghiaccio invece i valori di K_d sono molto più bassi e relativamente costanti (5 m^{-1} per la PAR e mediamente 15 m^{-1} per gli UV), solo nello strato colorato a livello del *bottom* (250-260 cm) si ha un forte aumento del K_d sia per la PAR (22 m^{-1}) che per la UVR (45 m^{-1}), dovuto alla presenza dei popolamenti microalgali. Inoltre si osserva che nello strato nevoso il K_d diminuisce all'aumentare dello spessore, probabilmente a causa del compattamento e conseguente riduzione della quantità di aria presente tra i cristalli, mentre nel ghiaccio si hanno valori minimi nello strato intermedio (110-220 cm) e massimi nel *bottom*.

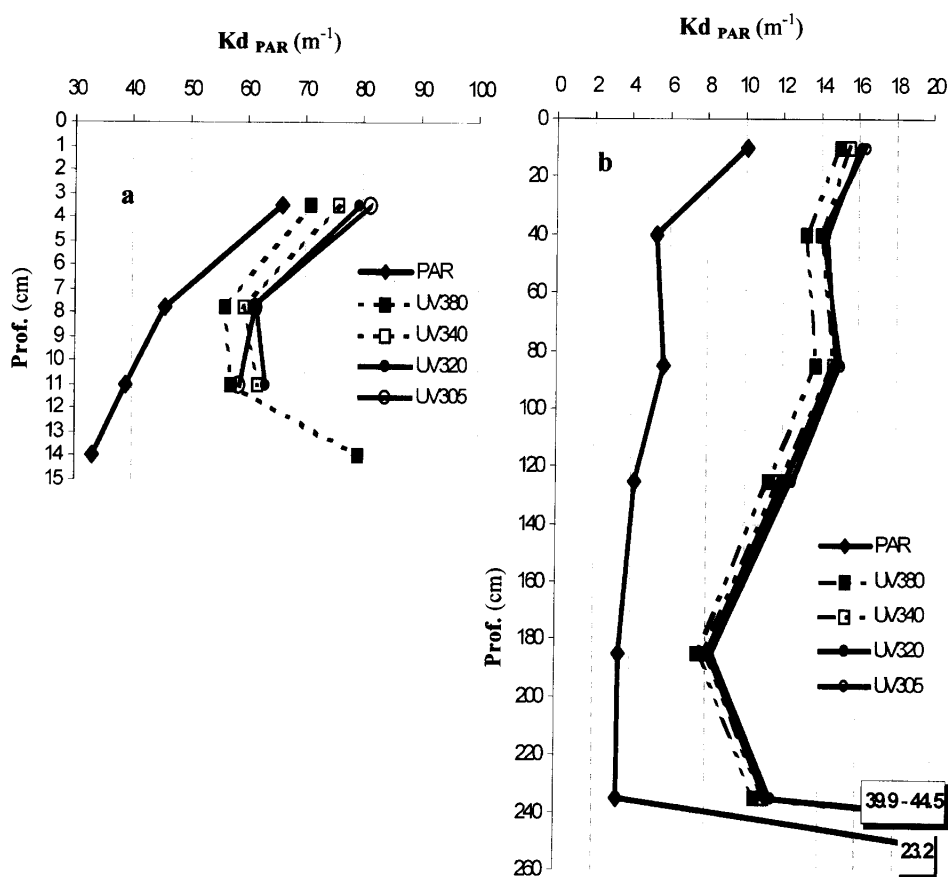


Fig. 4 - Stima del coefficiente di attenuazione diffusa (K_d ; m^{-1}) di irradianza PAR e UVR; a- lungo uno spessore di neve che varia tra 3.5 e 14 cm; b- lungo una carota di ghiaccio di 260 cm. Estimates of PAR and UV radiation mean diffuse attenuation coefficient (K_d ; m^{-1}); a- across layers of snow (3.5-14 cm); b- across an ice carrot (length 260 cm).

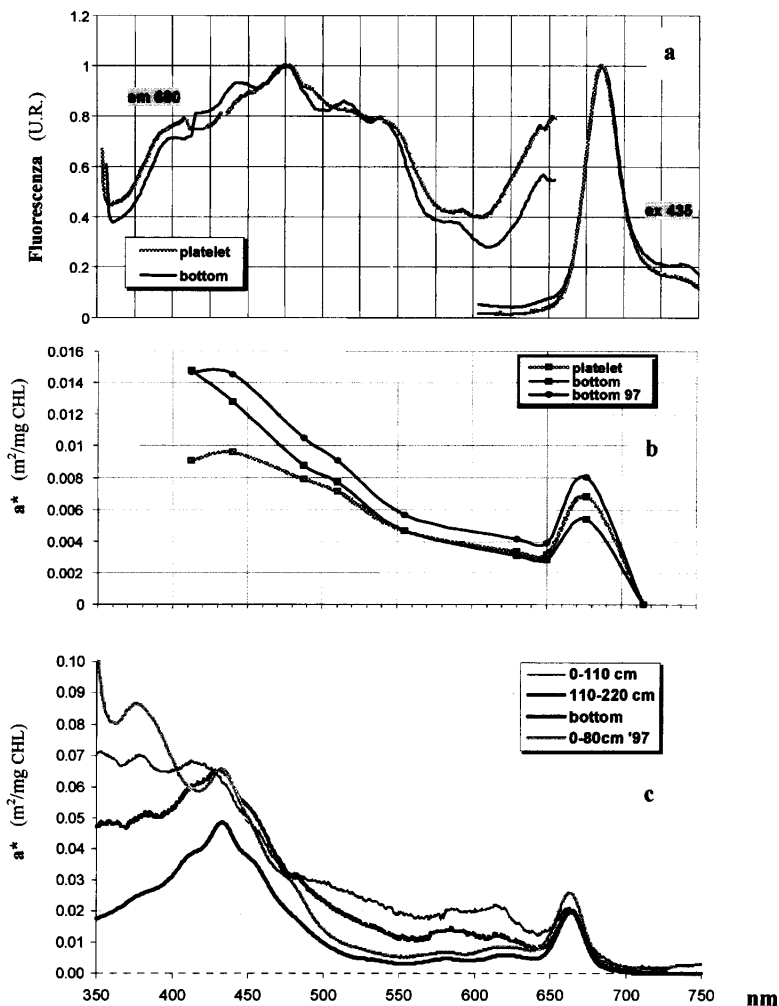


Fig. 5 - a- Spettro di eccitazione (em 680 nm) e di emissione (ex 435 nm) di fluorescenza *in vivo* (u.r.) realizzate su campioni di *platelet* e *bottom-ice*, normalizzati per il valore massimo; b- Spettri di assorbimento specifico ($\text{m}^2/\text{mg Chl } a$) *in vivo* misurato con sonda AC9 (Wetlabs) su campioni di *platelet* e *bottom-ice*; c- Spettri di assorbimento specifico ($\text{m}^2/\text{mg Chl } a$) di estratti acetonicici, relativi a tre diversi strati della carota di ghiaccio (0-110 cm, 110-120 cm, *bottom*).

a- Excitation and emission spectra (em 680 nm and ex 435 nm, respectively) of *in vivo* fluorescence (u.r.) on *platelet* and *bottom-ice* samples (normalized); b- *In vivo* measurements of spectral specific absorption ($\text{m}^2/\text{mg Chl } a$), on *platelet* and *bottom-ice* samples; c- Spectral specific absorption of acetone-extracted chlorophyll ($\text{m}^2/\text{mg Chl } a$) from three layers of the pack-ice (0-110 cm, 110-120 cm, *bottom* and 0-80 cm).

Partendo dalle misure ottiche effettuate sulla carota di ghiaccio e dalle misure al di sotto del *pack* e del *platelet* con il dispositivo ASTICE, si sono potute effettuare

delle stime dei valori di irradianza sperimentati dai popolamenti simpagici. Si è così calcolato che attraversati i 240 cm di ghiaccio arriva al *bottom-ice* ca. il 19% della PAR(0+) e al di sotto di questo lo 0.8%; mentre sotto il *platelet* giungono dallo 0.4 allo 0.9% di PAR(0+) cioè al massimo da 6 a 13 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Per gli UVB secondo le analoghe misure arriva nel *bottom* ca. il 7.8% del valore di superficie (uno dei più elevati misurati è stato di 9.2 W m^{-2} per 40 nm di banda) al di sotto del *bottom* arriva lo 0.17% e sotto il *platelet* dallo 0.04 allo 0.1% (cioè 9 mW m^{-2}). Da notare che il massimo valore di PAR superficiale misurato è stato di 1.486 ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

La Fig. 5a mostra gli spettri di fluorescenza *in vivo* di due campioni provenienti da una carota di ghiaccio del 30/11/99 e riferiti ai campioni di *bottom* e di *platelet*. Gli spettri di eccitazione mostrano un picco di emissione a 682 nm e uno di eccitazione a 472 nm, che corrisponde al massimo di assorbimento della clorofilla *c*, maggiore in valore assoluto di quello della clorofilla *a* a 435 nm. Lo spettro di emissione, con eccitazione a 435 nm, mostra oltre al principale picco a 682 nm un secondo a 735 nm. La clorofilla *c* è un pigmento accessorio che partecipa direttamente al processo fotosintetico, assorbendo energia luminosa e convogliandola con elevata efficienza ai centri di reazione. L'attività di questo pigmento, evidenziata dagli spettri di eccitazione, aumenta l'energia luminosa a disposizione della fotosintesi, nelle condizioni di fotolimitazione del sistema *pack-ice*.

Gli spettri di assorbimento specifico *in vivo* (normalizzati cioè per le concentrazioni di clorofilla *a*) in Fig. 5b si riferiscono, a titolo di esempio, a due prelievi uno di *platelet* e uno di *bottom-ice*: in entrambi i casi si osservano i picchi accentuati a 440 e 676 nm, che corrispondono ai massimi caratteristici della clorofilla *a*. Mentre nel campione di *platelet* il valore di assorbimento specifico a 676 nm (circa 0,007 $\text{m}^2/\text{mg chl}$) è leggermente superiore a quello del campione di *bottom*, in quest'ultimo il picco dell'assorbimento specifico a 440 nm è meno evidente ma in valore assoluto maggiore (circa 0,013 $\text{m}^2/\text{mg chl}$). Si evidenzia inoltre una variazione di pendenza a 510 nm che corrisponde all'assorbimento di xantofille come la fucoxantina delle diatomee (con funzione fotosintetica, cfr. spettri fluorescenza, Fig. 5a). I valori di assorbimento specifico a 676 nm misurati anche in altri campioni si mostrano compresi tra 0,007 e 0,015 $\text{m}^2/\text{mg chl}$, ovvero valori bassi come atteso in organismi fotolimitati a causa delle elevate concentrazioni pigmentarie e del conseguente *package effect* (Mitchell B.G. e Holm-Hansen O., 1991). In definitiva dunque le caratteristiche biotiche e fisiologiche delle comunità simpagiche del ghiaccio marino annuale ed in particolare i popolamenti del *bottom* e del *platelet*, sono caratterizzate primariamente dalla condizione di limitazione luminosa. Si tratta di popolamenti fortemente sciafili, che si sono adattati a basse intensità luminose, aumentando il contenuto cellulare di pigmenti fotosintetici e selezionandone la qualità. Tale sciafilia infatti, risulta anche dalle curve *P vs E* misurate sugli stessi popolamenti da Guglielmo *et al.* (2000), con valori di E_k compresi tra 15 e 21 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Spettri di assorbimento specifico sono stati ottenuti anche da misure su estratti acetonicici (Fig. 5c): per gli strati di *bottom* e di *platelet*, si osserva in generale la forma tipica degli estratti da diatomee, con un massimo per l'assorbimento della clorofilla *a* a 664 nm (0.02 $\text{m}^2/\text{mg chl}$), il massimo a 435 nm ed un aumento a 410 nm dovuto alla presenza di feopigmenti. L'aspetto più interessante, tuttavia, sta nell'aumento generale dello assorbimento tra 350 e 400 nm (spesso con un picco a 370-380 nm) che si ritrova particolarmente nei campioni superficiali 0-110 cm e, con valori più bassi, nello strato sottostante (110-220 cm). Questo picco di assorbimento, mai osservato negli strati di fondo né nei campioni di acqua sottostante, può essere legato

alla presenza di Mycosporine-Like Amino Acids, ovvero sistemi proteici che rappresentano un mezzo di difesa naturale contro l'esposizione alle radiazioni UV elevate (Karsten, 1998). Le stesse caratteristiche di assorbimento sono già state osservate a Baia Terra Nova, ma esclusivamente nei campioni superficiali della colonna d'acqua nei mesi di gennaio e febbraio (Lazzara *et al.*, 1996; Lazzara *et al.*, 1997).

Conclusioni

La luce viene considerata il primo fattore limitante per la crescita degli organismi fototrofi marini e a maggior ragione lo è per le comunità simpagiche al fondo del ghiaccio annuale. Ci si può attendere che le variazioni dell'intensità luminosa nei diversi strati di ghiaccio siano strettamente connesse con l'instaurarsi e l'evolversi delle comunità fitoplanctoniche. Sebbene la radiazione PAR sia l'unica componente disponibile per l'attività fotosintetica, anche radiazioni a lunghezze d'onda non visibili, sono importanti nel determinare lo stato fisiologico delle cellule. In particolare le radiazioni UV (200-400 nm) hanno effetti deleteri sugli organismi fitoplanctonici, comportando danni cellulari a livello di DNA, degradando i pigmenti fotosintetici, riducendo il tasso di crescita, la mobilità cellulare e l'efficienza fotosintetica (Herrmann *et al.*, 1997). La stima della quantità di radiazione UV che penetra in acqua e nel ghiaccio, riveste quindi una grande importanza sia dal punto di vista biologico che ecologico, tanto più che le alghe simpagiche rappresentano circa il 30% della produzione primaria nelle regioni coperte dal ghiaccio dell'oceano antartico (Trodahl e Buckley, 1990). Se da un lato la copertura del ghiaccio e della neve attenuano molto la radiazione solare, sia PAR che UV, costituendo un limite alla crescita delle comunità simpagiche fototrofe, dall'altro tale copertura può avere un ruolo fondamentale nella protezione degli organismi che vivono in questo particolare habitat.

In sintesi, le principali osservazioni realizzate in questo studio sono:

- la microflora simpagica presenta un elevato sviluppo nel ghiaccio marino costiero di Baia Terra Nova, soprattutto negli strati di *bottom* e di *platelet-ice*. In questi strati la fitomassa raggiunge, nella piena primavera, valori fino a tre ordini di grandezza maggiori che negli strati superficiali e nella colonna d'acqua sottostante;

- le condizioni luminose misurate nel ghiaccio, il basso assorbimento specifico, gli evidenti e numerosi cloroplasti contenuti nelle cellule, l'alto contenuto di pigmenti accessori, dimostrano che siamo in presenza di popolamenti fortemente sciafili;

- il ghiaccio e lo strato nevoso soprastante pur essendo causa di condizioni fotolimitanti, vanno visti anche come elementi di protezione dall'irradiazione UV, tanto che solamente negli strati più superficiali si sviluppano sistemi di potenziale fotoprotezione;

- la microflora simpagica è caratterizzata essenzialmente da diatomee pennate bentoniche. In particolare gli strati di *bottom* e di *platelet-ice* sono dominati dalle specie *Entomoneis kjellmanni* e *Nitzschia* cfr. *stellata*, che perciò vanno considerate "specie bioindicatrici" di condizioni fortemente oligofotiche.

Summary

Antarctic sea waters are one of the most dynamic ecosystem of the world. The process of ice formation and melting implies changes of light intensity, temperature, salinity, nutrients and particulate concentration. During the Austral spring of 1997 and 1999 (XIII and XV Italian Expedition in Antarctica) we investigated the effect of these changes on the spatial and temporal distribution of sympagic micro-algae communities at Terra Nova Bay, in relation to the variations of the physical proprieties of the pack-ice ecosystem. The

collected samples were examined for taxonomical classification of sympagic micro-algae and for spectrophotometric analysis of photosynthetic pigment concentration. Bio-optical properties of sea-ice (spectral absorption and attenuation coefficients, spectral fluorescence) were measured in the UVR and visible range. Also assessed were variation of global and spectral irradiance at the sea surface, and attenuation of PAR and UVR by the water, ice and snow.

The pack-ice coverage in 1999 was up to 240 cm thick attenuating surface PAR irradiance up to 80%. The visible light was further attenuated up to 99% at the platelet-ice level. Surface UVB radiation was reduced to 7.8% through the snow layer, and to 0.17% below the bottom-ice layer. The mean vertical attenuation coefficient of PAR irradiance ($K_{d,PAR}$) was at a maximum in the snow stratum ($K_{d,PAR} = 32-65 \text{ m}^{-1}$; $K_{d,UVR} = 56-80 \text{ m}^{-1}$) while K_d values were much lower along the ice section ($K_{d,PAR} = 5 \text{ m}^{-1}$ and $K_{d,UVR} = 15 \text{ m}^{-1}$). They remained constant until radiation reached the intensely pigmented layer of the bottom-ice.

Chlorophaeopigment analysis revealed very high biomass concentration, reaching 2400 mg m^{-3} in the bottom-ice in 1997 and 1700 mg m^{-3} in 1999. Despite variations in the taxonomic composition of the sampled communities, this biomass was exclusively composed of diatoms, mainly *Entomoneis kjellmannii* and *Nitzschia* cfr. *stellata*. These species showed characteristics of typical shade-adapted phototrophic organisms.

The specific absorption coefficient of chlorophyll a (a_{676}^*) was as low as $0.007 \text{ m}^2/\text{mg chl}$ ($0.015 < a_{676}^* > 0.007$) and the relevant presence of accessory light-harvesting pigments, such as xanthophylls and chlorophyll c, indicated a physiological adaptation to low-light conditions. UV-protecting pigments resulted from samples of the pack-ice surface communities. In addition, biomass at the pack-ice surface was 10^3 times lower than at the bottom-ice level where it grew according to irradiance variation with time.

While the reported environmental conditions are apparently unsuitable to phytoplankton growth, limitation of light, especially UVB radiation, may have resulted in a favourable environment for a few adapted species. Changes in the physics of the system strongly affected the physiology, and therefore the whole life cycle of the Antarctic phytoecosis.

Bibliografia

- ACKLEY S.F., SULLIVAN C.W. (1994) - Physical controls on the development and characteristics of Antarctic sea ice biological communities: a review and synthesis. *Deep-Sea Res.*, **41**: 1583-1604.
- ARRIGO K.R., SULLIVAN C.W., KREMER J.N. (1991) - A bio-optical model of Antarctic Sea Ice. *J. Geophys. Res.*, **96**: 10581-10592.
- BALECH E. (1976) - Clave ilustrada de Dinoflagelados Antarticos. *Publ. Inst. Antart. Argent.*, **11**: 1-99.
- DIECKMANN G.S. *et al.* (1998) - A compilation of data on sea ice algal standing crop from the Bellingshausen, Amundsen and Weddell seas from 1983 to 1994. In: Lizotte M.P., Arrigo K.R. (eds), *Antarctic Sea Ice, biological processes, interactions and variability*. Antarctic Research Series, **73**: 85-92.
- GUGLIELMO L., CARRADA G.C., CATALANO G., DELL'ANNO A., FABIANO M., LAZZARA L., MANGONI O., PUSCEDDU A., SAGGIOMO V. (2000) - Structural and function properties of sympagic communities in the annual sea ice at Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica). *Polar Biol.*, **23**: 137-146.
- HASLE G.R. (1964) - Nitzschia and Fragilariopsis species studied in the light and electron microscopes. I. Some marine species of Nitzschia and Lanceolatae. *Skr. Nor. Vidensk. Akad. Oslo Mat. Naturvidents*, K1 NS, **16**: 1-48.
- HASLE G.R. (1965a) - Nitzschia and Fragilariopsis species studied in the light and electron microscopes. II. The group Pseudonitzschia. *Skr. Nor. Vidensk. Akad. Oslo Mat. Naturvidents*, K1 NS, **18**: 1-45.
- HASLE G.R. (1965b) - Nitzschia and Fragilariopsis species studied in the light and electron microscopes. III. The genus Fragilariopsis. *Skr. Nor. Vidensk. Akad. Oslo Mat. Naturvidents*, K1 NS, **21**: 1-49.
- HASLE G.R. (1978) - Using the inverted microscope. In: A. Sournia (ed), *Phytoplankton manual. Monographs on Oceanographic methodology*. UNESCO, Paris: 191-196.
- HERMANN H., HADER D.P., GHETTI F. (1997) - Inhibition of photosynthesis by solar radiation in *Dunaliella salina*: relative efficiencies of UV-B, UV-A and PAR. *Plant Cell and Environment*, **20**: 359-365.

- KARSTEN U., SAWALL T., HANELT D., BISCHOF K., FIGUEROA FL., FLORES-MOYA A., WIENCKE C. (1998) - An Inventory of UV-Absorbing Mycosporine-Like Amino Acids in Macroalgae from Polar to Warm-Temperate Regions. *Botanica Marina*, **41**: 443-453.
- LAZZARA L., NUCCIO C., MASSI L., INNAMORATI M. (1995) - Le microalghe simpagiche di Baia Terra Nova (Antartide), nell'estate 1994/1995. *Giornale Botanico Italiano*, **129** (1): 425.
- LAZZARA L., INNAMORATI M., MASSI L., MORI G., NUCCIO C. (1996) - Irradiance control of phytoplankton biomass and production in Terra nova Bay (Western Ross Sea). *EOS Trans. AGU*, **76** (3). *Ocean Sciences Meet. (Suppl.)*, **144**, OS41C-5.
- LAZZARA L., MASSI L., NUCCIO C., BIONDI N., INNAMORATI M. (1997) - Phytoplankton ecology: irradiance, particles, gilvin, pigments, absorption, fluorescence, production and species density in Terra Nova Bay, Ross Sea. In: Faranda F., Guglielmo L. (eds), *National Scientific Commission for Anctartica Oceanographic Campaign 1994-1995*, Data Rep. Part I, Genova: 229- 279.
- LAZZARA L., SAGGIOMO V., INNAMORATI M., MANGONI O., MASSI L., MORI G., NUCCIO C. (2000) - Photosynthetic parameters, Irradiance, Biooptical Properties and Production Estimates in the Western Ross Sea. In: F. Faranda, L. Guglielmo and A. Ianora (eds), *Ross Sea Ecology. ItaliAntartide Expeditions (1987-1995)*, Springer Verlag, Berlin.
- LORENZEN C.J. (1967)- Determination of chlorophyll and phaeopigments spectro-photometric equation. *Limnology Oceanography*, **22** (4): 709-722.
- MANGUIN E. (1960) - Les diatomées de la Terre Adélie. Campagne du «Commandant Charcot» 1949-1950. *Ann. Sci. Nat. (Bot.)*, **12** (1): 223-262.
- MEDLIN L.K., PRIDDLE J. (1990) - Polar marine diatoms. *British Antarctic Survey*, Cambridge.
- MITCHELL B.G., HOLM-HANSEN O. (1991) - Bio-optical properties of Antarctic Peninsula waters: differentiation from temperate ocean models. *Deep-Sea Res.*, **38**: 1009-1028.
- MOREL A., SMITH R.C. (1974) - Relation between total quanta and total energy for aquatic photosynthesis. *Limnology Oceanography*, **19**: 591-600.
- NEVEUX J., PANOUSE L. (1987) - Spectrofluorimetric determination of chlorophylls and pheophytins. *Archiv. für Hydrobiologie.*, **109**: 567-581.
- PALMISANO A.C., SULLIVAN C.W. (1985) - Physiological Response of Micro-Algae in the Ice-Platelet Layer to Low-Light Conditions. *Mar. Biol. Res.*: 85-88.
- PALMISANO A.C., SULLIVAN C.W. (1983) - Sea ice Microbial Communities (SIMCO). 1. Distribution, Abundance and Primary Production of Ice Microalgae in McMurdo Sound, Antarctica in 1980. *Polar Biol.*, **2**: 171-177.
- PRIDDLE J., FRYXELL G. (1985) - Handbook of the common plankton diatoms of the Southern Ocean: centrales except the genus Thalassiosira. *British Antarctic Survey*, Cambridge.
- ROUND F.E., CRAWFORD R.M., MANN D.G. (1990) - The Diatoms. *Biology & Morphology of the Genera*. Cambridge University Press. Cambridge.
- TRODAHL H.J., BUCKLEY R.G. (1990) - Enhanced ultraviolet transmission of Antarctic sea ice during the Austral spring. *Geophys. Res. Lett.*, **17**: 2177-2179.