

L. PIAZZI (*), D. BALATA (**), F. CINELLI (*)

COLONIZZAZIONE DI ALGHE INTRODOTTE NELL'AREA DI CALAFURIA (LIVORNO) E CONSEGUENZE SUI POPOLAMENTI NATIVI

Riassunto - Lo scopo del presente studio è quello di confrontare la struttura e i *patterns* di biodiversità di popolamenti macroalgali invasi dalle due alghe introdotte *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* e *Womersleyella setacea* con quelli di popolamenti non invasi. I risultati hanno mostrato che i popolamenti invasi presentavano una struttura significativamente differente rispetto a quella dei popolamenti non invasi. I valori del ricoprimento totale e del numero di specie erano più bassi nei popolamenti invasi che in quelli non-invasi e i rapporti tra gli strati vegetazionali apparivano profondamente modificati. *C. racemosa* sembra influenzare maggiormente le forme incrostanti rispetto a *W. setacea*. La colonizzazione di *W. setacea* sembra avere effetti più importanti a 25 metri, mentre *C. racemosa* appare più invasiva negli habitat superficiali.

Parole chiave - Biodiversità, inquinamento biologico, *Caulerpa racemosa*, *Womersleyella setacea*, Mar Ligure.

Abstract - *Spread of introduced seaweeds in the area of Calafuria (Leghorn) and effects on native assemblages.* The aim of the study is the comparison between the structure and biodiversity of macroalgal assemblages invaded by the introduced seaweeds *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* and *Womersleyella setacea* and those of non-invaded assemblages. Results showed that structure of invaded assemblages significantly differed from that of non-invaded assemblages. Values of total percentage cover and species number were lower in invaded assemblages than in non-invaded assemblages. The abundances of vegetative layers differed among conditions. *C. racemosa* seems to influence mostly encrusting forms in comparison with *W. setacea*. *W. setacea* colonization appeared more severe at 25 m of depth, while the influence of *C. racemosa* invasion was more relevant in shallower habitats.

Key words - Biodiversity, biological pollution, *Caulerpa racemosa*, *Womersleyella setacea*, Ligurian Sea.

INTRODUZIONE

L'introduzione di specie alloctone rappresenta ovunque nel mondo un fenomeno in rapida crescita, specialmente in ambiente marino, in relazione all'incremento importanti vettori di introduzione di organismi, quali il traffico marittimo, l'acquicoltura e l'acquariologia (Rueness, 1989; Carlton & Geller, 1993). Fortunatamente, solo una piccola parte delle specie introdotte sono risultate responsabili di importanti invasioni biologiche (10%, Boudouresque & Verlaque, 2002), che hanno comunque determinato gravi conseguenze sia ecologiche che economiche. Le invasioni biologiche

rappresentano una delle principali minacce per il mantenimento della naturalità e della biodiversità degli ecosistemi costieri (Vitouseck *et al.*, 1996; Bax *et al.*, 2003), una componente fondamentale di cambiamento globale (Vitouseck *et al.*, 1997; Occhipinti-Ambrogi & Savini, 2003) e una delle principali cause di omogeneizzazione biologica (McKinney & Lockwood, 1999; McKinney, 2004).

In ambiente marino, le invasioni biologiche più spettacolari sono legate all'espansione di macroalghe alloctone (Ribera & Boudouresque, 1995). La Chlorophyta *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Sonder) Verlaque, Huisman *et Boudouresque* e la Rhodophyta *Womersleyella setacea* (Hollenberg) R.E. Norris sono considerate tra le principali alghe invasive in Mediterraneo (Boudouresque & Verlaque, 2002). Le due specie sono apparse nel Bacino tra gli anni '80 e '90 dello scorso secolo ed hanno rapidamente colonizzato ampie aree costiere, mostrando preoccupanti caratteristiche di invasività (Piazzi *et al.*, 2005b; Piazzi & Balata, 2009). *Caulerpa racemosa* presenta una struttura stolonifera che le consente di accrescersi rapidamente su tutti i tipi di substrato e di coprire la maggior parte degli organismi bentonici mediterranei, causandone il soffocamento (Piazzi *et al.*, 2001). *W. setacea* è una specie filamentosa che può costituire densi feltri, che possono intrappolare il sedimento, incrementando la propria competitività nei confronti delle specie native (Airoldi & Virgilio, 1998). La colonizzazione di un'area da parte delle due alghe può causare la scomparsa di molte specie mediterranee, importanti cambiamenti nella struttura dei popolamenti bentonici e un'erosione della biodiversità (Airoldi *et al.*, 1995; Piazzi & Balata, 2008, 2009).

Nell'area di Calafuria (Livorno), entrambe le specie sono presenti ed hanno colonizzato ampie porzioni di fondale, soprattutto nella fascia batimetrica tra i 10 e i 25 metri. Gli effetti dell'invasione delle due specie sui popolamenti di Calafuria sono stati ampiamente studiati (Airoldi *et al.*, 1995; Balata *et al.*, 2004) ed è stata valutata la loro interazione con gli alti tassi di sedimentazione dell'area (Airoldi *et al.*, 1996; Airoldi, 1998; Piazzi *et al.*, 2005a, 2007a).

Il presente lavoro si propone di confrontare la struttura e i *patterns* di biodiversità di popolamenti invasi dalle due specie con quelli di popolamenti non invasi. Un disegno multifattoriale è stato utilizzato per confrontare popolamenti algali di due differenti profondità sottoposti a differenti condizioni di invasione.

(*) Dipartimento di Biologia, Università di Pisa, via Volta 6, 56126 Pisa, Italy. E-mail: lpiazzi@biologia.unipi.it

(**) School of Biological and Environmental Sciences, University College Dublin, Dublin, Ireland.

MATERIALI E METODI

Lo studio è stato effettuato lungo la costa rocciosa di Calafuria, dove sono state campionate le profondità di 10 e i 25 metri. Nel primo caso, il popolamento è principalmente costituito da alghe fotofile, mentre popolamenti coralligeni caratterizzano la porzione più profonda.

Nel mese di ottobre, momento di massimo sviluppo delle due specie, in ciascuna delle due profondità, sono state campionate 2 aree per ciascuna condizione, separate tra loro di circa 1 km. In ogni area sono stati prelevati 3 campioni su substrato roccioso. Ciascun campione era rappresentato dal grattugio completo, mediante martello e scalpello, di superfici rocciose di 400 cm². Il materiale raccolto è stato esaminato in laboratorio, dove sono state determinate le specie algali ed è stata valutata l'abbondanza di ciascuna specie come ricoprimento percentuale.

I dati sono stati analizzati mediante PERMANOVA a 3 vie (Anderson, 2001), con i fattori Condizione (3 livelli fissi, aree invase da *C. racemosa* vs. aree invase da *W. setacea* vs. aree non invase), Profondità (2 livelli fissi e ortogonali, 10 m vs. 25 m) ed il fattore Sito (2 livelli) come random e gerarchizzato nell'interazione Condizione x Profondità. L'indice di similarità di Bray-Curtis è stato calcolato sui valori non trasformati. Il Pair-wise test è stato utilizzato per discernere tra livelli di fattori risultati significativi. Il SIMPER test è stato utilizzato per determinare le specie che maggiormente erano responsabili delle eventuali differenze tra condizioni. Un'analisi univariata (ANOVA) a 3 vie è stata utilizzata per analizzare i dati di ricchezza di specie per campione, ricoprimento totale, ricoprimento degli strati vegetazionali con gli stessi fattori e livelli utilizzati nell'analisi multivariata. Il Cochran's C test è stato utilizzato per verificare l'omogeneità delle varianze e i valori sono stati trasformati quando necessario. Il test SNK è sta-

to utilizzato per discernere tra livelli di fattori risultati significativi (Underwood, 1997).

RISULTATI

L'analisi multivariata (PERMANOVA) ha mostrato significativa l'interazione Profondità x Condizione. Il pair-wise test ha evidenziato differenze significative tra condizioni ad entrambe le profondità, mostrando che l'interazione è legata solo a differenze nella significatività, più elevata nel popolamento superficiale (Tab. 1). Il SIMPER test ha mostrato che le principali specie che diminuiscono nei popolamenti invasivi sono *Flabellia petiolata*, *Osmundea pelagosae*, *Peyssonnelia* spp., *Tricleocarpa fragilis* e *Zanardinia typus* nei popolamenti profondi e *F. petiolata*, *Halimeda tuna*, *Peyssonnelia* spp., *Sphaerococcus coronipifolius* e *Laurencia obtusa* in quelli superficiali. Le corallinacee incrostanti diminuiscono nelle aree invase da *C. racemosa* ma non in quelle colonizzate da *W. setacea* (Tab. 2).

ANOVA e il test SNK hanno mostrato che i valori di ricoprimento totale, del ricoprimento delle specie erette e del numero di specie erano significativamente più bassi nei popolamenti invasivi rispetto a quelli non invasivi (Tab. 3). Il numero di specie ed il ricoprimento delle specie erette presentavano valori inferiori nelle aree invase da *C. racemosa* a 10 metri e nelle aree invase da *W. setacea* a 25 metri. Le specie incrostanti avevano un ricoprimento inferiore nelle aree invase da *C. racemosa* rispetto alle altre ad entrambe le profondità (Fig. 1).

DISCUSSIONE

I risultati del presente studio hanno mostrato che i popolamenti invasivi da *Caulerpa racemosa* e da *Womersleyella setacea* presentavano una struttura significativa-

Tab. 1 - Risultati di PERMANOVA. C = controllo, R = *C. racemosa*, W = *Womersleyella setacea*. In grassetto è espressa la significatività (P(perman) < 0,05).

Source	df	MS	Pseudo-F	P(perman)
Profondità = P	1	9585,6	26,605	0,001
Condizione = C	2	9632,2	26,734	0,001
P x C	2	5397,3	14,98	0,001
Sito (P x C)	6	360,29	1,127	0,325
Residuo	24	319,68		
Totale	35			
P-W test (P x C)		-25	C vs. R	0,014
			C vs. W	0,009
			R vs. W	0,008
		-10	C vs. R	0,001
			C vs. W	0,001
			R vs. W	0,001

Tab. 2 - Risultati del SIMPER test che mostrano le specie che contribuiscono a separare le differenti condizioni.			
Species	R%	R%	Contrib%
-30 m			
	Non invasivi	<i>C. racemosa</i>	
Corallinacee incrostanti	100,00	38,75	42,59
<i>Flabellia petiolata</i>	33,08	5,92	19,36
<i>Osmundea pelagosae</i>	12,75	9,83	7,11
<i>Peyssonnelia</i> spp.	9,00	1,38	5,20
<i>Halimeda tuna</i>	5,88	0,00	4,05
<i>Halopythis incurva</i>	0,13	5,58	3,71
<i>Jania adhaerens</i>	3,80	5,47	2,12
<i>Zanardinia typus</i>	2,18	0,30	1,35
	Non invasivi	<i>W. setacea</i>	
<i>Flabellia petiolata</i>	33,08	0,00	36,19
<i>Osmundea pelagosae</i>	12,75	0,37	13,61
<i>Peyssonnelia</i> spp.	9,00	0,00	9,78
<i>Halimeda tuna</i>	5,88	0,00	6,41
<i>Haliptilon virgatum</i>	3,80	0,58	3,50
<i>Zanardinia typus</i>	2,18	0,00	2,41
<i>Tricheocarpa fragilis</i>	1,62	0,00	1,75
<i>Halopteris filicina</i>	1,45	0,00	1,58
-10 m			
	Non invasivi	<i>C. racemosa</i>	
Corallinacee incrostanti	81,67	34,11	33,89
<i>Flabellia petiolata</i>	37,13	1,31	25,03
<i>Halimeda tuna</i>	23,21	1,05	15,50
<i>Peyssonnelia</i> spp.	11,28	1,11	7,67
<i>Laurencia obtusa</i>	3,89	3,46	3,08
<i>Sphaerococcus coronopifolius</i>	4,63	0,36	3,06
<i>Cladophora prolifera</i>	0,43	3,04	2,00
	Non invasivi	<i>W. setacea</i>	
<i>Flabellia petiolata</i>	37,13	6,12	18,12
<i>Halimeda tuna</i>	23,21	4,25	11,06
<i>Peyssonnelia</i> spp.	11,28	0,37	6,83
<i>Laurencia obtusa</i>	3,89	10,40	5,20
<i>Sphacelaria cirrosa</i>	0,08	7,55	4,54
<i>Haliptilon virgatum</i>	1,69	7,17	3,22
<i>Sphaerococcus coronopifolius</i>	4,63	0,00	2,68
<i>Botryocladia botryoides</i>	1,87	0,00	1,09

Source	df	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
		Num. specie		Ricoprim.		Sp. incrostanti		Sp. erette		Feltro	
Profondità = P	1	1,7	0,4	0,88	74,9	12543,3	224,6	5,31	57,2	0,06	0,43
Condizione = C	2	500,6	128,7	3,20	272,6	12087,1	216,4	17,68	190,6	0,35	2,48
P x C	2	3,8	0,8	0,01	0,8	55,836	1,8	0,09	0,6	0,14	0,73
Sito(P x C)	6	148,3	38,1	0,15	13,4	5296,7	94,8	12,23	131,8	3,08	21,65
Residuo	24	4,5		0,01		29,4		0,14		0,19	
Totale	35										
Cochran's C		0,297		0,228		0,187		0,205		0,352	

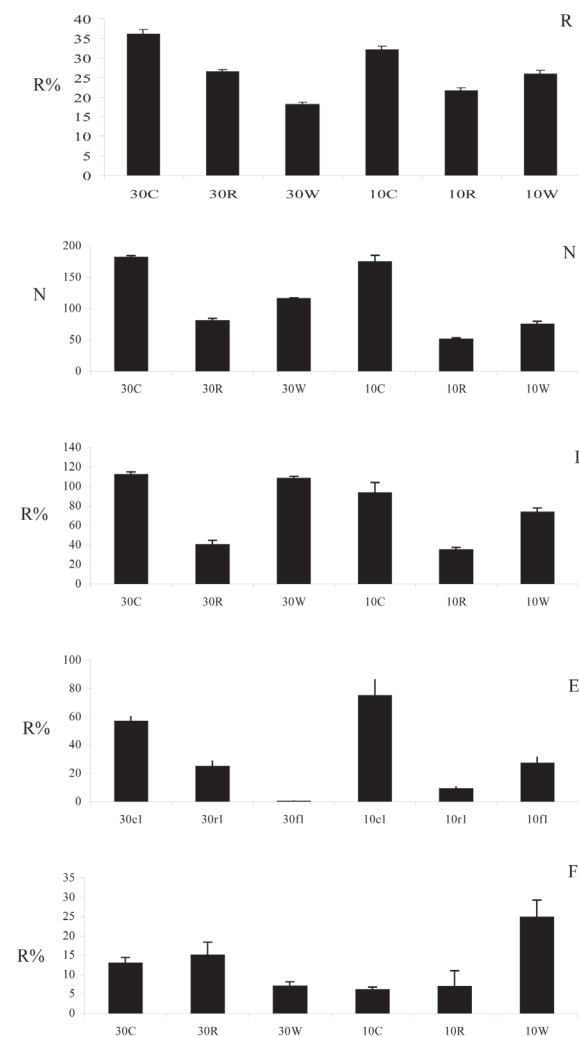


Fig. 1 - Ricoprimento percentuale totale (R), numero di specie (N), ricoprimento percentuale delle specie incrostanti (I), erette (E) e del feltro algale (F) nei popolamenti invasi da *C. racemosa* (R), da *W. setacea* (W) e nei popolamenti non invasi (C), a 10 e 30 metri di profondità.

mente differente rispetto a quella dei popolamenti non invasi. In particolare, nei popolamenti invasi, i valori di ricoprimento totale e del numero di specie erano più bassi che nei controlli e i rapporti tra gli strati vegetazionali apparivano profondamente modificati. Inoltre, le caratteristiche dei popolamenti invasi cambiavano in rapporto alla specie presente.

Valori inferiori del numero di specie e del ricoprimento nelle aree invase rispetto a quelle non invase conferma un pattern già osservato in precedenti studi (Airoldi *et al.*, 1995; Piazzini *et al.*, 2001; Balata *et al.*, 2004). L'invasione di entrambe le specie può causare una riduzione della biodiversità, danneggiando le specie sensibili e portando ad una dominanza delle specie tolleranti (Piazzini & Cinelli, 2003; Piazzini & Balata, 2008, 2009). I meccanismi di competizione delle due specie introdotte sono simili e si basano sia su una competizione diretta attraverso il sovraccrescimento e conseguente soffocamento degli organismi invasi, sia su meccanismi indiretti, in quanto i popolamenti delle due alghe sono capaci di monopolizzare il substrato impedendo il reclutamento di organismi che si riproducono mediante spore o propagali (Airoldi, 2000a; Piazzini *et al.*, 2001). Infatti, la maggior parte delle alghe erette, che presentano tale tipo di riproduzione, diminuiscono fortemente nelle aree invase. Inoltre, sia i feltri di *W. setacea* che gli strati di stoloni di *C. racemosa* possono intrappolare il sedimento, incrementando tali meccanismi di competizione (Airoldi, 1998; Piazzini *et al.*, 2005a). In un'area come Calafuria, soggetta ad alti tassi di sedimentazione (Airoldi *et al.*, 1996), tale meccanismo può rappresentare un'importante sinergia tra differenti alterazioni ambientali, che può aggravare gli effetti di entrambe (Airoldi & Virgilio, 1998; Piazzini *et al.*, 2007b).

Nonostante questi meccanismi comuni, importanti differenze caratterizzavano i popolamenti invasi. *C. racemosa* sembra influenzare maggiormente le forme incrostanti rispetto a *W. setacea*. Le Corallinales appaiono resistenti all'invasione di *W. setacea*, probabilmente in relazione alla loro capacità di sopportare la copertura da parte dei feltri (Airoldi, 2000b). Gli stoloni di *C. racemosa*, al contrario, possono costituire spessi strati che determinano la presenza di sedimento ridotto portando alla morte gli organismi degli strati inferiori (Piazzini *et al.*, 2007b). In relazione alla profondità, la colonizzazione di *W. setacea* sembra avere effetti più importanti a 25 metri,

mentre *C. racemosa* appare più invasiva negli habitat superficiali. *W. setacea* è una specie sciafila, che riesce a svilupparsi meglio a profondità maggiori, dove costituisce feltri più spessi, con conseguenti effetti sui popolamenti colonizzati (Piazzi *et al.*, 2007a). *C. racemosa*, nonostante l'alto grado di adattabilità alle differenti condizioni ambientali, è tuttavia una specie fotofila che raggiunge il massimo sviluppo nelle aree più superficiali (Capiomont *et al.*, 2005).

In conclusione, la presenza delle due specie invasive sembra influenzare profondamente i popolamenti macroalgali nell'area di Calafuria. Fortunatamente la distribuzione discontinua delle due alghe introdotte permette ai popolamenti nativi di continuare a svilupparsi e a mantenere valori di diversità elevati all'interno dell'area. È tuttavia importante monitorare la distribuzione delle due specie, specialmente di *C. racemosa*, la cui comparsa nell'area è più recente e che mostra di essere ancora in fase di espansione.

BIBLIOGRAFIA

- Airoldi L., 1998. Roles of disturbance, sediment stress and substratum retention on spatial dominance in algal turf. *Ecology* 79: 2759-2770.
- Airoldi L., 2000a. Responses of algae with different life histories to temporal and spatial variability of disturbance in subtidal reefs. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 195: 81-92.
- Airoldi L., 2000b. Effects of disturbance, life-history and overgrowth on coexistence of algal crusts and turfs. *Ecology* 8: 798-814.
- Airoldi L., Virgilio M., 1998. Response of turf-forming algae to spatial variations in the deposition of sediments. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 165: 271-282.
- Airoldi L., Rindi F., Cinelli F., 1995. Structure seasonal dynamics and reproductive phenology of a filamentous turf assemblage on a sediment influenced, rocky subtidal shore. *Bot. Mar.* 38: 227-237.
- Airoldi L., Fabiano M., Cinelli F., 1996. Sediment deposition and movement over a turf assemblage in a shallow rocky coastal area of the Ligurian Sea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 133: 241-251.
- Anderson M.J., 2001. A new method for a non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral. Ecol.* 26: 32-46.
- Balata D., Piazzi L., Cinelli F., 2004. A comparison among macroalgal assemblages in areas invaded by *Caulerpa taxifolia* and *C. racemosa* on subtidal Mediterranean reefs. *PSZNI Mar. Ecol.* 25: 1-13.
- Bax N., Williamson A., Aguero M., Gonzales E., Geeves W., 2003. Marine invasive alien species: a threat to global biodiversity. *Mar. Pollut.* 27: 313-323.
- Boudouresque C.F., Verlaque M., 2002. Biological pollution in the Mediterranean Sea: invasive versus introduced macrophytes. *Mar. Pollut. Bull.* 44: 32-38.
- Capiomont A., Breugnot E., Den Haan M., Meinesz A., 2005. Phenology of a deep water population of *Caulerpa racemosa* in the northwestern Mediterranean Sea. *Bot. Mar.* 48: 80-83.
- Carlton J.T., Geller J.B., 1993. Ecological roulette: the global transport of non-indigenous marine organisms. *Science* 261: 78-82.
- McKinney M.L., 2004. Measuring floristic homogenization by non-native plants in North America. *Global Ecol. Biogeogr.* 13: 47-53.
- McKinney M.L., Lockwood J.L., 1999. Biotic homogenisation: a few winners replacing many losers in the next mass extinction. *Trends Ecol. Evol.* 14: 450-453.
- Occhipinti-Ambrogi A., Savini D., 2003. Biological invasion as a component of global change in stressed marine ecosystems. *Mar. Pollut. Bull.* 46: 542-551.
- Piazzi L., Balata D., 2008. The spread of *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* in the Mediterranean Sea: an example of how biological invasions can influence beta diversity. *Mar. Env. Res.* 65: 50-61.
- Piazzi L., Balata D., 2009. Invasion of alien macroalgae in different Mediterranean habitats. *Biol. Inv.* 11: 193-204.
- Piazzi L., Cinelli F., 2003. Evaluation of benthic macroalgal invasion in a harbour area of the western Mediterranean Sea. *Eur. J. Phycol.* 38: 223-231.
- Piazzi L., Ceccherelli G., Cinelli F., 2001. Threat to macroalgal diversity: effects of the introduced green alga *Caulerpa racemosa* in the Mediterranean. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 210: 161-165.
- Piazzi L., Ceccherelli G., Balata D., Cinelli F., 2003. Early patterns of *Caulerpa racemosa* recovery in the Mediterranean Sea: the influence of algal turfs. *J. Mar. Biol. Ass. UK* 83: 27-29.
- Piazzi L., Balata D., Ceccherelli G., Cinelli F., 2005a. Interactive effect of sedimentation and *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* invasion on macroalgal assemblages in the Mediterranean Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sc.* 64: 467-474.
- Piazzi L., Meinesz A., Verlaque M., Akçali B., Antolić B., Argyrou M., Balata D., Ballesteros E., Calvo S., Cinelli F., Cirik S., Cossu A., D'Archino R., Djellouli S.A., Javel F., Lanfranco E., Mifsud C., Pala D., Panayotidis P., Peirano A., Pergent G., Petrocelli A., Ruitton S., Žuljević A., Ceccherelli G., 2005b. Invasion of *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Caulerpales, Chlorophyta) in the Mediterranean Sea: an assessment of the early stages of spread. *Cryptogamie Algol.* 26: 189-202.
- Piazzi L., Balata D., Cinelli F., 2007a. Invasions of alien macroalgae in Mediterranean coralligenous assemblages. *Cryptogamie Algol.* 28: 289-301.
- Piazzi L., Balata D., Foresi L., Cristaudo C., Cinelli F., 2007b. Sediment as a constituent of Mediterranean benthic communities dominated by *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea*. *Sci. Mar.* 71: 129-135.
- Ribera M.A., Boudouresque C.F., 1995. Introduced marine plants, with special reference to macroalgae: mechanisms and impact. *Progr. Phycol. Res.* 11: 187-268.
- Rueness J., 1989. *Sargassum muticum* and other introduced Japanese macroalgae: biological pollution of European coasts. *Mar. Pollut. Bull.* 20: 173-176.
- Underwood A.J., 1997. *Experiments in ecology. Their logical design and interpretation using analysis of variance.* Cambridge University Press, Cambridge.
- Verlaque M., Durand C., Huisman J.M., Boudouresque C.F., le Parco Y., 2003. On the identity and origin of the Mediterranean invasive *Caulerpa racemosa* (Caulerpales, Chlorophyta). *Eur. J. Phycol.* 38: 325-329.
- Vitousek P.M., D'Antonio C.M., Loope L.L., Westbrooks M., 1996. Biological invasions as global environmental change. *Amer. Sci.* 84: 468-478.
- Vitousek P.M., D'Antonio C.M., Loope L.L., Rejmànek M., Westbrooks M., 1997. Introduced species: a significant component of human-caused global change. *NZ J. Ecol.* 21: 1-16.

