

P. Berbenni, L. Tagliabue
Politecnico di Milano, Diar

La rapida riduzione della biodiversità marina, dovuta in particolare all'inquinamento, agli impatti del cambiamento climatico, ad una pesca indiscriminata e all'introduzione di numerose specie alloctone nei mari di tutto il mondo, è un segnale d'allarme che non si può ignorare. La globalizzazione dei commerci ha aumentato notevolmente le possibilità di trasferimento degli organismi viventi da una zona all'altra del pianeta, riducendo l'eterogeneità della distribuzione delle specie nel globo e favorendo l'estinzione di molte specie native. Il commercio navale è ritenuto il principale responsabile dell'introduzione, attraverso le acque di zavorra, di specie invasive nocive per l'ambiente marino. Più del 90% del commercio estero mondiale di merci avviene via mare [1]. Le navi utilizzano acqua di zavorra per bilanciare la distribuzione dei carichi a bordo e per raggiungere un livello di affondamento ottimale alla navigazione. L'acqua è caricata a bordo delle navi durante le operazioni di sca-

rico delle merci sulla banchina. Insieme ad essa vengono però trasferiti a bordo anche molti organismi che vivono nelle acque portuali. Le navi ripartono quindi verso un nuovo porto e, arrivate a destinazione, effettuano nuovamente le operazioni di carico delle stive liberandosi dell'acqua di zavorra. I rischi di questa pratica sono connessi al rilascio degli organismi presenti nell'acqua di zavorra in un ecosistema diverso da quello originario. L'International Maritime Organization (Imo) stima che, globalmente, le navi trasferiscano 10 miliardi di tonnellate di acqua di zavorra all'anno e che, nei serbatoi di zavorra delle navi di tutto il mondo, possano essere presenti fino a 7.000 specie acquatiche diverse [1, 2]. La maggior parte degli organismi non sopravvive alle turbolente operazioni di carico e scarico e alle difficili condizioni che si presentano nei serbatoi di bordo; solo gli organismi più forti sono in grado sopravvivere fino al porto di destinazione.

Vengono perciò introdotte in un nuovo ambiente le specie più resistenti, che, in assenza di predatori e in presenza di condizioni ambientali favorevoli, possono diventare invasive, mettere a rischio l'esistenza delle specie autoctone ed alterare profondamente l'ecosistema.

Tutto ciò ha notevoli implicazioni ambientali, socio-economiche e sanitarie.

Introduzione invasiva

L'esempio più famoso di danni causati dall'introduzione di una nuova specie invasiva è forse quello dei Grandi Laghi del Canada. Il mitilo di origine europea *Dreissena polymorpha*, noto anche come Zebra Mussel, è stato riscontrato per la prima volta nei Grandi Laghi canadesi nel 1988 e si è poi rapidamente diffuso in tutta l'America settentrionale fino al Golfo del Messico. La specie è estremamente invasiva e può raggiungere concentrazioni molto elevate (fino a 750.000 ind./m²)[3]. Il mitilo è un organi-

TRATTAMENTO DELLE E PROBLEMATICHE

Tutte le navi utilizzano acqua di zavorra per bilanciare la distribuzione dei carichi a bordo e per raggiungere un livello di affondamento ottimale alla navigazione. Il carico dell'acqua di zavorra da una parte del mondo e il suo scarico altrove può introdurre specie acquatiche invasive, come Zebra mussel, in un ambiente dove esse rischiano di sopraffare le specie autoctone. Si stima che, globalmente, le navi trasferiscano 10 miliardi di tonnellate di acqua di zavorra all'anno e che, nei serbatoi di zavorra delle navi di tutto il mondo, possano essere presenti fino a 7.000 specie acquatiche diverse. L'International Maritime Organization (Imo) ha sviluppato e adottato la Convenzione Internazionale per il controllo e la gestione dell'acqua di zavorra e dei sedimenti provenienti dalle navi che, quando in vigore, richiederà a tutte le navi di espletare le procedure di gestione delle acque di zavorra in base a un dato standard.

All ships need to carry ballast water to keep them stable in the water. The taking up of ballast water from one part of the world and discharging it elsewhere can introduce invasive aquatic species, such as zebra mussel, into an environment where they can overrun natural local species. It is estimated that shipping transfers approximately 10 billion tonnes of ballast water around the world every year and that at least 7.000 different species are being carried in ships' ballast tanks. The International Maritime Organization (Imo) has developed and adopted the International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments which, when in force, will require all ships to carry out ballast water management procedures to a given standard.

simo filtratore, la sua presenza in concentrazioni così elevate comporta la rimozione di notevoli quantità di plankton e, quindi, gravi alterazioni della catena trofica e dell'intero habitat naturale. L'impatto economico dovuto alla presenza della Zebra Mussel negli Stati Uniti è stimato in 78,5 miliardi di dollari l'anno [4], mentre si stima che il costo associato alla presenza di tutte le specie invasive presenti negli Usa superi il valore di 138 miliardi di dollari annui [5]. Nelle acque di zavorra possono essere presenti anche diversi agenti patogeni, fra cui il vibrione del Colera e numerose alghe tossiche. Alcune specie di dinoflagellati (per esempio, *Gymnodinium catenatum*, *Alexandrium minutum* [6]) producono un pericolosa tossina; quando sono troppo numerosi provocano il fenomeno delle maree rosse, responsabile della morte di molti pesci e causa della contaminazione di mitili e vongole, il cui consumo da parte dell'uomo può essere fatale.

Provvedimenti nazionali

Molti Paesi hanno deciso di affrontare il pericolo dell'introduzione di nuove specie pericolose a scala nazionale, adottando misure più o meno efficaci.

Rilasciare in mare aperto l'acqua di zavorra prima che la nave arrivi a destinazione, sostituendola con nuova acqua di mare (Ballast Water Exchange), è attualmente l'opzione di trattamento maggiormente applicata [7]. L'efficacia del Ballast Water Exchange (Bwe) si basa sul presupposto che, scaricando l'acqua, siano trascinati fuori bordo anche gli organismi in essa contenuti. A causa della grande diluizione che avviene in alto mare, gli organismi rilasciati non dovrebbero costituire un problema per l'ecosistema in cui vengono scaricati, mentre si presume che l'acqua di mare nuovamente caricata a bordo sia sufficientemente sicura, dal punto di vista dell'inquinamento biologico, perché possa essere tranquillamente rilasciata nel porto di destinazione. L'esperienza ha pe-

rò dimostrato che le ipotesi alla base del Bwe non sono sempre verificate e alcuni biologi marini ritengono che la stessa pratica possa costituire un ulteriore mezzo di dispersione delle specie marine. Inoltre, esistono oggettivi limiti pratici che rendono il ricambio in alto mare una soluzione che non è sempre possibile applicare: il Bwe può comportare rischi per la stabilità della nave e delle sue strutture e, per esempio, non può essere eseguito in presenza di avverse condizioni meteorologiche. È quindi necessario considerare il Bwe come una soluzione transitoria ed investire nella ricerca di nuove e più efficaci soluzioni.

Convenzioni internazionali

La globalizzazione delle rotte commerciali suggerisce che il modo migliore per affrontare il problema sia quello di adottare una strategia internazionale comune. È così che la Imo, il 13 Febbraio 2004, ha adottato l'International Convention for

ACQUE DI ZAVORRA AMBIENTALI



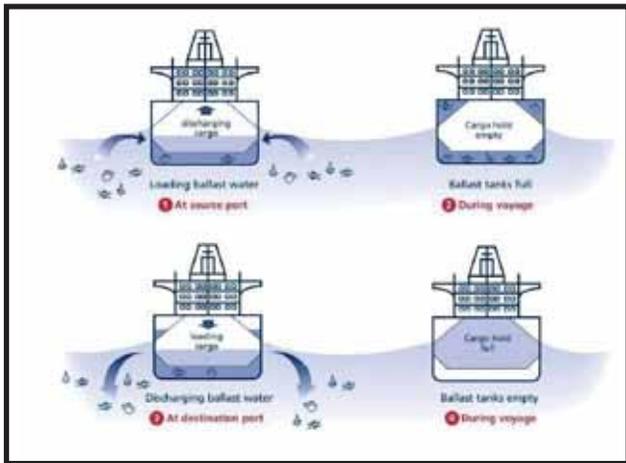


Figura 1 - Prelievo e rilascio dell'acqua di zavorra durante le operazioni di scarico e carico della nave [1].

the Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediments [8]. La Convenzione entrerà in vigore 12 mesi dopo la ratifica di 30 Paesi membri della Imo, rappresentanti almeno il 35% del tonnellaggio navale mondiale. Al 31 Agosto 2008, la Convenzione risulta ratificata da 14 Parti, la cui flotta di bandiera costituisce il 3,62% del tonnellaggio mondiale (Barbados, Egitto, Kiribati, Maldive, Nigeria, Norvegia, Saint Kitts and Navis, Spagna, Tuvalu, Siria, Sierra Leone, Kenya, Messico, Sud Africa). La Convenzione stabilisce

due diversi Standard, D-1 e D-2: il primo fa riferimento al Bwe, il secondo, più restrittivo, richiederà l'utilizzo di impianti di trattamento a bordo. Nel rispetto dello Standard D-1, le navi devono condurre il Bwe quando si trovano ad una distanza dalla costa maggiore di 200 miglia nautiche e in acque profonde almeno 200 m. Se ciò non fosse possibile le 200 mn di distanza possono essere ridotte fino a 50 mn. In molte regioni, però, le rotte delle navi non incontrano lungo il viaggio queste condizioni. In Europa la maggior parte delle navi, durante il viaggio, supera raramente le 50 mn di distanza dalla costa e quasi nessuna si spinge oltre le 200 mn. Le navi non possono essere obbligate ad effettuare deviazioni di rotta per rispettare le condizioni fissate dalla Convenzione. In questi casi, i singoli Stati devono identificare zone alternative di scambio, considerate a basso rischio d'invasione da parte dei nuovi organismi che vi saranno introdotti. La Imo considera il Bwe come una soluzione temporanea: nella seconda fase di applicazione della Convenzione, le navi dovranno attenersi allo Standard D-2,

che fissa le concentrazioni limite allo scarico dei diversi organismi soggetti a regolamentazione (Tabella 1). Per rispettare questi limiti, i sistemi di trattamento devono garantire efficienze di rimozione maggiori del 99,99% nei confronti di organismi di dimensioni maggiori di 50 µm e del 99% nel caso di organismi di dimensioni comprese fra 10 e 50 µm.

Sistemi di trattamento

Il processo di approvazione delle tecnologie di trattamento dell'acqua di zavorra è piuttosto complesso nel caso in cui la tecnologia proposta faccia uso di sostanze attive. Per questi sistemi la Imo ha istituito un'apposita commissione di valutazione, il Gesamp Ballast Water Working Group on Active Substances (Gesamp Bwwg), il cui compito è quello di accertare la compatibilità ambientale dei sistemi che utilizzano sostanze chimiche e la sicurezza del personale di bordo che si troverà ad operare con tali composti. I sistemi che effettuano la disinfezione senza l'utilizzo di sostanze attive non sono soggetti alla valutazione del Gesamp Bwwg. L'approvazione è affidata alle autorità nazionali, che generalmente si avvalgono di società di certificazione per verificare l'adempimento degli Standard D-2 nel rispetto delle condizioni fissate dalla Imo. Sono stati proposti diversi sistemi di trattamento dell'acqua di zavorra, anche se non tutti sono in grado di garantire il rispetto degli standard D-2, mentre alcuni sono di difficile applicazione a bordo delle navi. Le difficoltà maggiori che le tecnologie di trattamento a bordo devono superare sono legate ai ristretti spazi disponibili sulle navi, alle enormi quantità di acqua che è necessario trattare in tempi brevi, ai costi operativi e all'elevata efficienza di disinfezione richiesta, da raggiungere senza che il trattamento comporti rischi per l'ambiente e per il personale di bordo. I trattamenti si possono suddividere in due principali categorie: processi di separazione solido-liquido e di disinfezione (chimica o fisica). Si possono individuare 16 unità di trattamento dell'acqua di zavorra [9] (Tabella

Tabella 1 - Standard D-2 per il rilascio dell'acqua di zavorra.

Organismi tipo	Standard D-2	
Plankton, dimensione	> 50 µm	<10 ind/m ³
Plankton, dimensione	10-50 µm	<10 ind/ml
Vibrio cholera (O1 e O139)	<1 CfU/100 ml	
Escherichia coli	<250 CfU/100 ml	
Enterococchi intestinali	<100 CfU/100 m	

Figura 2 - Zebra mussel beach (courtesy of Noaa Great Lakes Environmental Research Lab) [4].



2); le tecnologie esistenti differiscono principalmente nella scelta del metodo di disinfezione e, quindi, nella configurazione dell'impianto. Quasi tutti i sistemi prevedono una fase di separazione solido-liquido (filtrazione, idrocycloni) seguita da una fase disinfezione (ozono, cloro, acido peracetico, vitamina K3, raggi UV, deossigenazione, ultrasuoni...). Alcuni sistemi si basano invece solo sul trattamento di disinfezione.

Disinfezione a lampade fotoelettriche

Il Gesamp Bwwg ha finora concesso l'approvazione iniziale (Basic Approval) a sei sistemi di trattamento che fanno uso di sostanze attive, mentre solo il sistema PureBallast, realizzato dalla società AlfaLaval, ha già ottenuto l'approvazione finale [8]. Nell'impianto PureBallast [10] il trattamento di disinfezione avviene, senza l'utilizzo di sostanze chimiche, nell'unità brevettata Wallenius Aot, appositamente sviluppata da AlfaLaval in collaborazione con la società Wallenius Water. L'unità di trattamento è costituita internamente da lampade fotoelettriche circondate da griglie di acciaio ricoperte da diossido di titanio. Il diossido di titanio, colpito dai raggi UV emessi dalle lampade, funge da catalizzatore nella scissione delle molecole d'acqua in radicali ossidrilici e protoni. I radicali OH⁻ reagiscono istantaneamente con i microrganismi sottraendo alle loro membrane cellulari il protone di cui necessitano per ricostituire la molecola d'acqua. La creazione dei radicali nell'unità di ossidazione avanzata è indipendente dai livelli di torbidità o altre caratteristiche dell'acqua.

Questa proprietà rende il sistema certamente più efficace della disinfezione a raggi UV, che risulta di difficile applicazione in que-

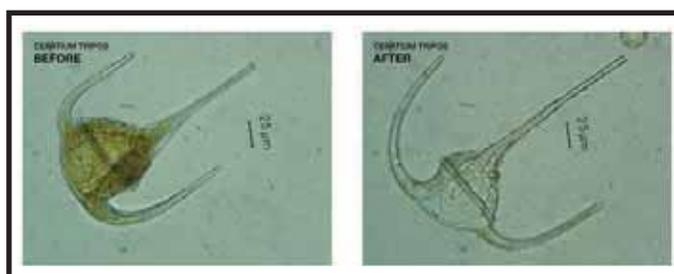
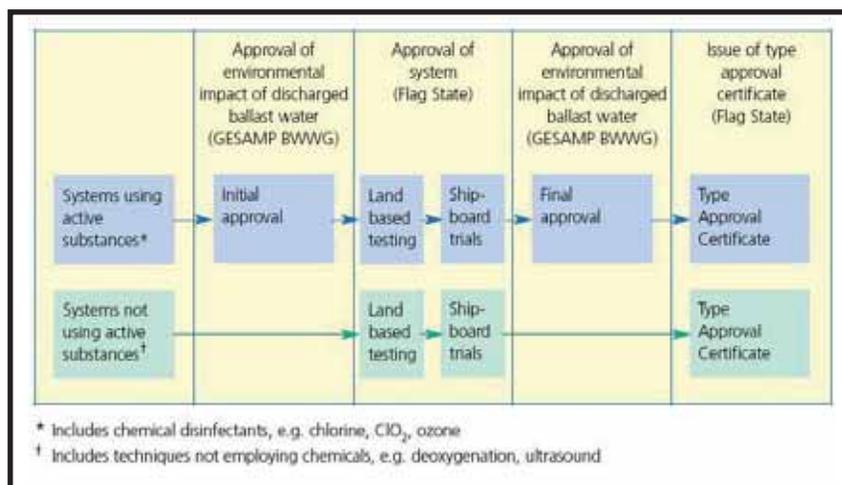
sto settore: l'acqua di zavorra viene prelevata dalle navi in zone portuali ed è generalmente molto torbida. L'acqua è inizialmente sottoposta ad un trattamento di filtrazione di 50 µm. Successivamente è inviata alle unità di ossidazione avanzata, ognuna delle quali è in grado di trattare 250 m³/h di acqua. Le unità Aot possono essere combinate in parallelo, fino a raggiungere la portata massima trattabile di 5.000 m³/h. Il trattamento si completa durante le operazioni di carico dell'acqua di zavorra ed una seconda disinfezione è effettuata al momento dello scarico. Il sistema PureBallast riesce così a soddisfare le richieste degli Standard D-2 della Convenzione. Il funzionamento ottimale delle unità Aot è salvaguardato da un sistema automatico di pulizia Cleaning-in-Place che, utilizzando una soluzione biodegradabile, effettua automaticamente le operazioni di pulizia al termine di ogni trattamento. Il design modulare dell'impianto PureBallast consente di ridurre al minimo l'ingombro planimetrico a bordo della nave. Il sistema è disponibile sul mercato dall'inizio del 2007 ed è già operativo a bordo di tre navi. In virtù dell'ac-

cordo firmato il 17 Dicembre 2007 fra AlfaLaval e la linea navale Wallenius, tutte le navi Wallenius in costruzione saranno dotate del sistema PureBallast, sviluppato in collaborazione dalle due società. Sono previste installazioni anche a bordo delle nuove imbarcazioni della compagnia navale tedesca ER Schiffahrt.

Disinfezione chimica

Fra i sistemi che applicano la disinfezione chimica, di particolare interesse è l'impianto BalPure, realizzato dal gruppo Severn Trent De Nora [11]. Il sistema Balpure genera ipoclorito di sodio per elettrolisi dell'acqua di mare. L'acqua caricata a bordo viene inizialmente filtrata con un filtro di 500 µm; una parte della portata sollevata è poi inviata al generatore di ossidanti ed è quindi reinserita nella linea principale diretta ai serbatoi. Durante il viaggio un cloro-analizzatore monitora l'andamento dei disinfettanti nei serbatoi di zavorra. La concentrazione del cloro residuo si riduce nel tempo fino al valore di circa 1 ppm. Tale residuo, oltre ad essere un positivo indicatore dell'efficacia del trattamento di disinfezione, impedisce la ricrescita microbologica. Per

Figura 3 - Procedura di certificazione Imo dei sistemi di trattamento dell'acqua di zavorra [9].



evitare di rilasciare nell'ambiente acqua di zavorra contenente ossidanti residui, al momento dello scarico il disinfettante in eccesso viene neutralizzato con aggiunta di bisolfito di sodio. Nel processo di approvazione dei sistemi di trattamento, grande attenzione è rivolta alla questione del rilascio delle sostanze attive residue nel-

Figura 4 - Dinoflagellati prima e dopo il trattamento nell'unità Wallenius Aot. La membrana cellulare è distrutta e l'organismo non è più in grado di trattenere al proprio interno i pigmenti essenziali alla vita della cellula [10].

ID Manufacturer	Active substance	Solid-liq separation				Chemical disinfection and dechlorination							Physical disinfection				AOP
		HC	Filt	None	Coag	O3	Cl	EL/EC	PAA	ClO2	SK	Red	UV	Deox	Cav	US	
1 Alfa Laval AB	X ¹		X										X				TiO ₂
2 Ecochlor Inc	X			X						X							
3 Electrochlor Inc	X		X					X									
4 FWO Marine	X ¹		X					X									
5 Environmental Technologies Inc	X			X		X										X	
6 Gauss			X										X				
7 Greenship	X	X						X									
8 Hamann AG	X	X	X						X								
9 Hitachi	X		X		X ¹												
10 Hyde Marine Inc	X ³		X							X ³		X ³					
11 Mitsui Engineering & Shipbuilding	X		X			X								X			
12 JFE Engineering Corporation	X		X				X				X				X		
13 Marengo Technology Group Inc			X									X					
14 Oceansever AS			X										X	X			
15 MH Systems Inc				X									X				
16 Mitsubishi Heavy Industries	X		X					X									
17 NEI Treatment Systems LLC				X									X	X			
18 Nutech O3	X			X		X											
19 Optimarin AS			X									X					
20 Qwater			X													X	
21 Resource Ballast Technology	X		X					X							X		
22 Severn Trent De Nora	X		X					X			X						
23 Techross	X			X				X									
24 ATG Willand			X ²	X								X					
25 Sincerus Water Treatment	X	X						X									
26 DNV Maritime Solution	X		X						X			X					

¹Technology may be considered as using 'active substances'. ²Physical pre-treatment options under consideration. ³Two disinfection options offered.

HC Hydrocyclone; Filt Filtration; Coag Coagulation (with magnetic particles); US Ultrasound; AOP Advanced oxidation;
 Deox Deoxygenation; O₃ Ozonation; Cl Chlorination; UV Ultraviolet irradiation; PAA Peracetic acid (as Peraclean);
 ClO₂ Chlorine dioxide; SK Seakleen; Red Reduction; Cav Cavitation; EL/EC Electrolysis/Electrochlorination.

Tabella 2 - Produttori di tecnologie di trattamento dell'acqua di zavorra e unità di processo di cui si compongono i rispettivi impianti [9].

l'ambiente e ai rischi associati allo stoccaggio e al trasporto di sostanze chimiche a bordo delle navi. Attualmente, solo due tecnologie che effettuano il trattamento chimico prevedono una fase di neutralizzazione degli ossidanti residui prima dello scarico: l'impianto BalPure di Severn Trent De Nora e il Jfe-Ballast Water Management System proposto dalla compagnia giapponese Jfe Engineering Corporation (Tabella 2). Diversamente da quanto avviene nel il sistema BalPure, che produce gli ossidanti a bordo della nave, la tecnologia Jfe effettua la disinfezione dosando una soluzione commerciale di ipoclorito di sodio, che deve essere

stoccato e trasportato a bordo, cercando di limitare i rischi che comporta il trasporto di sostanze chimiche sulle navi. Il piano di gestione della sostanza attiva, completo delle misure di sicurezza da adottare, deve essere comunicato al Gesamp Bwwg. Il sistema BalPure è stato testato nei laboratori dell'università di Washington sotto il controllo della Guardia Costiera Statunitense (Uscg). I risultati mostrano efficienze di rimozione >99% su microrganismi e batteri, in linea con gli standard dell'attuale legislazione dello Stato di Washington, che differisce però dalla Convenzione Internazionale sia nei valori delle percentuali di

rimozione da raggiungere, sia nelle condizioni da rispettare nell'eseguire i test. La disinfezione effettuata per via chimica genera inevitabilmente sottoprodotti di disinfezione. Né la Imo né la Epa statunitense hanno ancora fissato concentrazioni limite di DBPs allo scarico dell'acqua di zavorra trattata. Test tossicologici effettuati su diverse specie acquatiche confermano l'assenza di tossicità residua dell'acqua trattata con il sistema BalPure.

L'impianto è disponibile sul mercato dal 2007 e, sulla base dei risultati positivi ottenuti dalla prima installazione a bordo, la società ha avviato partnership con i maggiori armatori statunitensi per installare un impianto BalPure da 2.000 m³/h su una delle proprie navi. BalPure è un sistema certificato dalla società di classificazione navale American Bureau of Shipping (Abs).

Conclusioni

Gli Usa non hanno attualmente aderito alla Convenzione Internazionale Imo ma la Uscg ha avviato un proprio programma di valutazione e approvazione delle nuove tecnologie di trattamento dell'acqua di zavorra. Severn Trent De Nora, che finora ha seguito il programma della Uscg, non ha ancora avviato la procedura di certificazione Imo ma ha intenzione di sottoscrivere l'application per la Basic Approval entro il 2008 e confida di ottenere la Final Approval nel 2009. Diversi Stati membri della Imo hanno riconosciuto la necessità di lottare contro l'introduzione, attraverso le acque di zavorra, di specie invasive dannose per l'ambiente marino. Nell'ambito dei progetti del Quinto programma quadro sul trattamento delle acque di zavorra, l'Unione Europea ha coadiuvato la Imo nell'attuazione del Global Ballast Water Management Programme, destinato a sensibilizzare al problema i Paesi in via di sviluppo, a monitorare la situazione e a preparare l'attuazione della Convenzione. È ora necessario proseguire in questa direzione e fare il possibile perché la Convenzione Internazionale possa entrare in vigore al più presto. ■

BIBLIOGRAFIA

[1] <http://globallast.imo.org/>
 [2] Imo-Bbc "Invaders from the sea", Documentary film, Bbc Worldwide-Imo production, 2006.
 [3] L. Mari, "Biforcazioni e caos in un modello demografico per le dinamiche del mitilo Dreissena polymorpha", Politecnico di Milano, Dei, 2008.
 [4] Tip of the Mitt Watershed Council, "Aquatic Invasive Species", Michigan, <http://www.watershedcouncil.org/AquaticInvasiveSpecies.html>
 [5] D. Pimental et al., *BioScience*, 2000, **50**, 53.
 [6] Global Invasive Species Database, <http://www.issg.org/database/welcome/>
 [7] Det NorskeVeritas Report No. 2005-0638, "Ballast Water Scoping Study North Western Europe".
 [8] <http://www.imo.org/>
 [9] Lloyd's Register, "Ballast Water Treatment Technology: Current Status", United Kingdom, 2007.
 [10] AlfaLaval (Comunicazioni personali), Monza, Italia. www.alfalaval.com
 [11] Severn Trent De Nora (Comunicazioni personali), Milano, Italia. www.severntrentdenora.com