

Aspetti geochimici dei sedimenti della Sacca di Goro (Delta del Po, Adriatico settentrionale)

Stefano Covelli¹, Giorgio Fontolan¹, Loris Sartore²,
Umberto Simeoni³, Virginie Tesolin¹ e Andrea Zamariolo³

¹Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine,
Università degli Studi di Trieste, via E.Weiss, 2 - 34127 Trieste

²Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e Chimica Applicata,
Università degli Studi di Trieste, via A.Valerio, 2 - 34127 Trieste

³Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche,
Università degli Studi di Ferrara, C.so Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara

Riassunto

Lo studio prende in esame le caratteristiche geochimiche dei sedimenti, analizzate secondo la normativa vigente, di 21 carote prelevate nella laguna di Goro. Su un totale di 131 campioni sono state eseguite analisi del contenuto di alcuni elementi maggiori (Al, Fe, Ti) ed in tracce (P, Li, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg), insieme al contenuto di C organico, N totale ed oli minerali. L'elaborazione statistica dei dati chimici e tessiturali ha consentito una valutazione del grado di alterazione antropogenico dell'ambiente lagunare.

Pur essendo le concentrazioni di alcuni metalli pesanti relativamente basse rispetto ad altre aree lagunari dell'Adriatico, ciò nondimeno i valori significativi di arricchimento nei livelli superficiali (circa 70-90 cm) per Hg (> 5), Cd e Pb (> 4), Zn e Cu (> 2), indicano un palese deterioramento delle caratteristiche naturali dei sedimenti e, quindi, delle qualità ambientali, che potenzialmente potrebbe ripercuotersi sulla componente biologica della laguna.

Introduzione

L'elevato grado d'urbanizzazione e la concentrazione di siti industriali lungo i fiumi e nelle aree costiere ha inevitabilmente contribuito ad aumentare la presenza di sostanze contaminanti (metalli pesanti, PCB, idrocarburi, radionuclidi) nell'ecosistema marino (Förstner, 1977; Windom, 1992). La definizione degli obiettivi del risanamento ambientale e degli interventi da realizzarsi per raggiungere le condizioni ottimali di qualità delle acque non può prescindere da una conoscenza globale, e non settoriale, dell'ecosistema in cui i risultati degli studi delle singole componenti (chimiche, fisiche, biologiche, geologiche, idrauliche, ecc.) vengono tra loro integrate (Förstner, 1977; Salomons e Förstner, 1984).

La Sacca di Goro è un'area lagunare localizzata nel settore più meridionale del delta del Po e rappresenta un'importante fonte di ricchezza sia come bene naturalistico sia per l'attività di pesca (venericoltura e mitilicoltura). Per tali ragioni la sacca continua ad essere al centro di programmi di tutela e salvaguardia ambientali, ed è stata oggetto, nel recente passato, di numerose indagini ecologiche (Pugnetti et al., 1992; Viaroli et al., 1992) e di studi sullo stato e sulla qualità delle acque e dei sedimenti (Fagioli et al. 1991, 1994).

Lo scopo di questo lavoro è quello di analizzare lo stato di alterazione antropica dei sedimenti di fondo in relazione ad alcuni parametri geochimici significativi, per individuare eventuali aree di preferenziale accumulo di metalli pesanti.

Area di studio

La laguna di Goro presenta un'estensione di circa 2000 ettari (Idroser, 1994). La profondità media del battente d'acqua supera appena il metro, mentre i valori di escursione della marea variano da un minimo di - 40 cm ad un massimo di + 80 cm. La sacca fa parte dell'apparato deltizio del Po e deve la sua origine al protendimento dello stesso. La dinamica naturale è caratterizzata dalla presenza di bassi fondali e dalla distribuzione dei sedimenti determinata dal moto ondoso. Una forte subsidenza naturale, incrementata in tempi recenti da numerose attività antropiche, ha interessato ed interessa tuttora il bacino deltizio e l'area circostante (Caputo et al., 1970; Bondesan e Simeoni, 1983).

La sacca è alimentata principalmente dagli apporti solidi del Po di Goro e di Volano, e, subordinatamente, dal Po di Pila e di Tolle e dai materiali che risalgono la costa emiliano-romagnola. Le indagini sui sedimenti superficiali della Sacca di Goro (Dal Cin e Pambianchi, 1991; Simeoni et al., 1998; Tesolin, 1999) hanno evidenziato che i sedimenti argillosi e limosi sono i più rappresentativi dei fondali lagunari, mentre le sabbie sono presenti solo in prossimità della bocca principale e nella parte orientale della sacca. Poiché dalle caratteristiche tessiturali dei sedimenti dipende anche la capacità da parte delle particelle di intrappolare eventuali contaminanti (Frenet-Robin e Ottmann 1978; Ramamoorthy e Rust 1978; Fernex et al. 1986), sono proprio le zone più interne della sacca che presentano condizioni particolarmente favorevoli ad eventuali alterazioni ambientali.

Metodologie di analisi

Nell'estate del 1998 sono state prelevate 21 carote di sedimento (Fig. 1) e sottoposte ad analisi dettagliate, in accordo con i requisiti stabiliti dal Decreto del Ministero dell'Ambiente 24 gennaio 1996 (G. U. n. 31, pp. 9-29). Il subcampionamento dei sedimenti per le analisi fisiche e chimiche è stato eseguito applicando i criteri stabiliti dalle disposizioni legislative riportate nello stesso decreto (All. B/1):

per le carote di lunghezza < 150 cm sono state prelevate le porzioni di sedimento relative ai 20 cm superficiali e 20 cm di fondo;

per carote con lunghezza compresa tra 150 e 200 cm sono stati prelevati campioni relativi ai 20 cm superficiali, 20 cm intermedi e 20 cm di fondo;

per le carote con lunghezza >200 cm, oltre ai campioni indicati al punto precedente, è stato campionato uno spessore di 20 cm rappresentativo dei livelli più profondi di 200 cm.

Complessivamente sono state effettuate 131 analisi tessiturali: 3 campioni per le carote dalla G1 alla G19, ad eccezione della G15 con due soli campioni, 32 per la carota G18 e 45 per la G21. Queste ultime due per l'ubicazione, la lunghezza e le caratteristiche macroscopiche del sedimento sono state considerate le più adatte per uno studio di dettaglio, necessario per la taratura della metodologia d'indagine.

I subcampioni prelevati sono stati trattati con H₂O₂ (10 v/v) per l'eliminazione della sostanza organica. Tramite setacciatura ad umido si è separato il fango (< 63 µm) dalla sabbia. Una piccola aliquota di fango è stata successivamente diluita con l'antiflocculante Calgon (Na-esametafosfato allo 0.5 ‰), per poter eseguire l'analisi dimensionale mediante sedigrafo Micromeritics mod. 5100.

I sedimenti, calcolate le percentuali di ciascuna delle loro componenti fondamentali secondo la scala dimensionale di Udden-Wentworth (2000-62 µm sabbia, 62-4 µm silt e < 4 µm argilla), sono stati infine classificati per mezzo del diagramma di Shepard (1954). E' stata inoltre calcolata la percentuale del materiale con dimensioni minori di 2 µm necessaria per le tarature geochimiche e la determinazione dei grain-proxies (Loring 1990, 1991; Covelli e Fontolan, 1997).

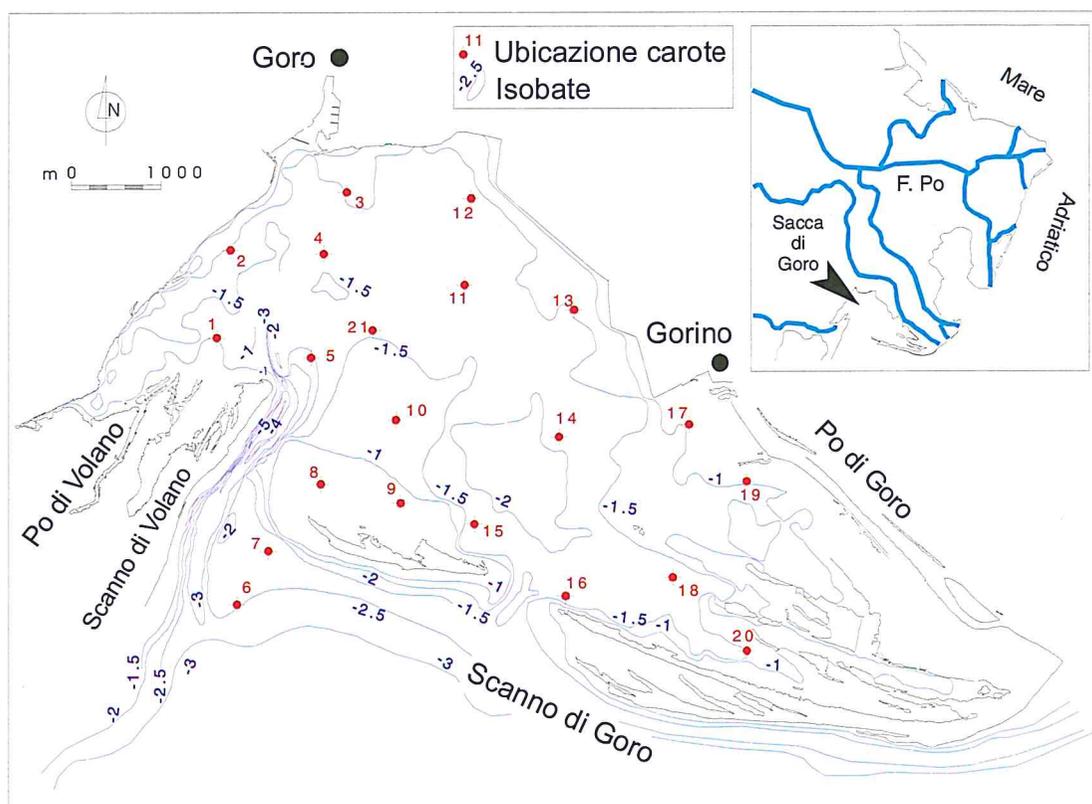


Figura 1 - Ubicazione dei punti di prelievo delle carote.

Per la determinazione del contenuto di alcuni elementi maggiori (Al, Fe, Mn, Ti) ed in tracce (P, Li, Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg), i campioni (131) prima liofilizzati (*freeze-drying*) e macinati ($< 420 \mu\text{m}$), poi solubilizzati in *teflon bomb* (aliquote di 0.200 g), con miscela di *acqua regia* e HF concentrato (Loring e Rantala, 1992), tramite mineralizzatore a microonde (Milestone MLS 1200), sono stati sottoposti ad analisi spettrofotometrica. Le determinazioni analitiche di gran parte degli elementi sono state eseguite in fiamma (AAS) mediante spettrofotometro Perkin Elmer 2380. Per quanto riguarda gli elementi Cd e Pb, si è utilizzato, viste le basse concentrazioni, uno spettrofotometro Perkin Elmer 5100, dotato di fornello a grafite HGA-600. Il fosforo totale (P) è stato determinato per via spettrofotometrica nel visibile (Perkin Elmer Lambda Bio 20), previa digestione a caldo con miscela di HNO_3 e HClO_4 , seguendo le procedure riportate in IRSA-CNR (1985).

Nella determinazione di Hg totale si è seguita la procedura standard dei vapori freddi (Mercury Hydride System), applicata alla spettrofotometria di assorbimento atomico (Perkin Elmer AAAnalyst 100), previa dissoluzione a caldo in miscela solfo-nitrica come suggerito in IRSA-CNR (1985). In quella di C organico e di N totale, un'aliquota del campione liofilizzato è stata acidificata in capsule d'argento con HCl, in concentrazioni progressivamente crescenti e con aggiunte multiple, fino a completa dissoluzione dei carbonati (Hedges e Stern, 1984; Van Iperen e Helder, 1985). L'analisi strumentale è stata effettuata successivamente con un CHN Elemental Analyzer Perkin Elmer 2400. Infine, la determinazione degli olii minerali è stata eseguita per via ponderale previa estrazione con freon, distillazione ed essiccazione (IRSA-CNR, 1985).

Risultati

Nel loro complesso i sedimenti delle carote presentano una marcata variabilità nei tenori degli elementi maggiori ed in tracce considerati. In tabella 1 vengono riportati i valori di concentrazione ri-

scontrati nei livelli superficiali delle 21 carote mentre nella tabella 2 sono evidenziati i tenori massimi, minimi e medi determinati considerando i campioni nella loro totalità. Nella tabella 3 è riportato un quadro riassuntivo dei dati di letteratura riguardanti l'area di Goro e di altri ambienti lagunari dell'Adriatico settentrionale.

Relativamente alla Sacca di Goro, Fagioli et al. (1991; 1994) avevano riscontrato, nei sedimenti argillosi e limosi dei settori interni della laguna, tenori elevati di Al e Fe in quanto costituenti principali della struttura dei minerali di origine detritica, dei minerali argillosi e degli ossidi idrati di ferro e manganese associati alle componenti più fini del sedimento (Loring, 1991). Globalmente anche i tenori dei metalli in tracce (Mn, Cr, Cu, Zn, Pb e Cd) rientrano nello stesso ordine di grandezza dei dati già noti per l'area ottenuti da Fagioli et al. (1991 e 1994) con una metodologia di analisi comparabile a quella utilizzata nel presente lavoro, mentre possono discostarsi, anche sensibilmente, dai risultati riportati da Guerzoni et al. (1984) forse per l'utilizzo dell'estrazione parziale (dissoluzione con HNO₃). Solo il nichel si presenta in concentrazioni più elevate di 0.5 volte rispetto ai dati di Fagioli et al. (1991, 1994) e almeno 2.5 volte superiori rispetto a quelli di Guerzoni et al. (1984). I tenori di mercurio riscontrati in questo studio sono invece dello stesso ordine di grandezza di quelli riportati da Guerzoni et al. (1984), ma più elevati di circa il 30 % rispetto a quanto osservato da Fagioli et al. (1991, 1994). Sempre al confronto con quanto riportato da questi ultimi Autori, per quanto concerne le concentrazioni di azoto totale, carbonio organico e fosforo totale, i valori riscontrati appaiono dello stesso ordine di grandezza per il primo elemento e mediamente dimezzati per gli altri due.

Le concentrazioni di olii minerali rinvenute sono decisamente trascurabili per una valutazione del grado di alterazione dei sedimenti per cause antropiche, risultando tra 3 e 4 ordini di grandezza inferiori a quanto recentemente riscontrato in aree portuali altamente contaminate (Furlan et al., 1999).

Per ciascun parametro analizzato si è deciso di procedere, dapprima limitatamente alla porzione superficiale delle carote, utilizzando una procedura di calcolo che prevede la suddivisione della sacca in settori delimitati da una griglia di zonazione (Fig. 2). Successivamente, sia la variabilità verticale sia i profili di concentrazione sono stati indagati in dettaglio per le due carote di taratura (G18 e G21), grazie alle quali è stato possibile determinare delle funzioni regionali di background naturale, indispensabili per una corretta definizione qualitativa dei sedimenti.

Discussione

Distribuzione areale delle concentrazioni delle variabili geochimiche

Le distribuzioni delle concentrazioni superficiali di Al, Fe, Mn, Li, Cu, Pb, Cd, Zn, Hg, Corg e Ntot, ottenute con la procedura precedentemente descritta, sono abbastanza simili tra di loro e presentano i valori più elevati nelle zone della sacca dove predominano i sedimenti più fini (Figg. 3 e 4). Per Zn, Cd e Pb (Fig. 3), in particolare, i tenori maggiori sono ubicati in corrispondenza delle carote G11 e G14 (Fig. 1), mentre per Hg (Fig. 4) sono le carote G11 e G13 che evidenziano le concentrazioni più elevate (> 0.40 ppm).

Nel caso del rame (Fig. 3), valori superiori a 75 ppm sono stati riscontrati nella parte centro-orientale (carota G14) e settentrionale della Sacca (carota G12); le minori concentrazioni (< 25 ppm) sono state riscontrate nelle aree delle bocche lagunari.

I tenori più bassi di titanio (< 0.35 ppm) caratterizzano tutta la zona occidentale e sud-orientale della sacca (Fig. 3), mentre nella zona centrale si concentrano quelli più elevati. Infine il fosforo totale è maggiormente concentrato (> 450 ppm) in corrispondenza del settore centrale e di quello più orientale (Fig. 4).

Considerando le griglie di distribuzione areale per il nichel ed il cromo (Fig. 4), si può notare come l'andamento sia più irregolare rispetto agli altri elementi. Tuttavia vale la pena osservare come, nel caso del Ni, i valori massimi siano localizzati nel settore settentrionale della sacca e nelle vicinanze

della G15, mentre il Cr presenta le concentrazioni più elevate nelle zone maggiormente sabbiose e nella zona settentrionale.

Tabella 1 - Tenori delle variabili geochimiche dei livelli sedimentari superficiali (0-20 cm) della Sacca di Goro.

SIGLA	Fe %	Mn %	Al %	Ti %	Ni ppm	Cr ppm	Li ppm	Cu ppm
G1	3.39	0.068	5.44	0.360	112	125	39	37
G2	3.13	0.075	4.89	0.362	128	139	47	49
G3	4.20	0.091	6.59	0.431	137	187	57	67
G4	3.82	0.077	6.20	0.421	137	182	49	51
G5	2.85	0.075	5.31	0.297	113	136	34	20
G6	2.70	0.072	4.78	0.328	130	181	29	11
G7	2.95	0.078	5.21	0.421	100	185	30	10
G8	2.75	0.069	5.00	0.290	117	158	32	10
G9	3.36	0.065	5.56	0.422	137	190	42	32
G10	3.42	0.074	5.69	0.426	127	156	43	31
G11	4.07	0.081	6.50	0.481	137	187	58	47
G12	4.15	0.078	6.68	0.431	152	165	57	109
G13	4.24	0.102	6.64	0.450	150	158	59	39
G14	4.16	0.085	6.77	0.506	125	176	59	96
G15	3.20	0.063	5.35	0.409	140	160	41	35
G16	2.80	0.071	4.80	0.287	130	163	30	16
G17	3.58	0.078	6.13	0.464	138	171	47	36
G18	4.16	0.085	6.77	0.506	125	176	59	96
G19	3.04	0.066	5.13	0.380	112	178	34	34
G20	3.33	0.071	5.68	0.388	137	160	41	41
G21	3.67	0.072	6.24	0.458	118	176	49	53
SIGLA	Zn ppm	Pb ppm	Cd ppm	Hg ppm	Corg %	Ntot %	Ptot ppm	Oli min. ppm
G1	134	7.25	0.42	0.09	1.14	0.15	857	4.82
G2	190	14.73	0.85	0.24	1.21	0.40	235	5.58
G3	238	19.43	1.03	0.51	1.25	0.27	265	0.85
G4	196	12.53	0.66	0.24	1.05	0.31	351	7.19
G5	110	5.53	0.46	0.10	0.88	0.24	374	1.12
G6	78	5.00	0.45	0.04	0.15	0.07	401	0.48
G7	77	5.18	0.32	0.04	0.16	0.07	421	1.21
G8	89	5.14	0.27	0.05	0.20	0.07	305	4.85
G9	160	12.13	0.62	0.18	0.75	0.11	382	1.69
G10	152	10.77	0.45	0.17	0.87	0.18	329	0.82
G11	252	28.75	1.34	0.54	1.28	0.18	462	0.77
G12	207	22.64	0.86	0.40	1.80	0.25	294	1.34
G13	202	20.19	0.58	0.54	1.37	0.19	149	14.73
G14	269	35.95	2.11	0.46	1.08	0.14	230	1.88
G15	142	13.89	0.83	0.22	0.74	0.15	409	1.00
G16	85	6.00	0.19	0.03	0.12	0.07	334	0.19
G17	148	14.49	0.94	0.18	0.77	0.13	484	1.25
G18	269	35.95	1.40	0.46	1.08	0.14	230	1.88
G19	135	12.31	0.91	0.23	0.35	0.09	363	0.34
G20	126	12.24	0.46	0.20	0.78	0.10	381	1.26
G21	169	11.31	0.46	0.29	1.11	0.17	379	2.48

Tabella 2 - Tenori medi, minimi e massimi delle variabili geochimiche nei sedimenti della Sacca di Goro.

	Fe %	Mn %	Al %	Ti %	Ni ppm	Cr ppm	Li ppm	Cu ppm
n	131	131	131	131	131	131	131	131
Max.	4.47	0.116	7.57	0.712	192	234	63	109
Min.	2.11	0.062	4.74	0.228	28	115	23	3
Medio	3.54	0.077	6.02	0.437	137	169	47	33
St.dv.	0.44	0.009	0.62	0.078	20	18	9	15

	Zn ppm	Pb ppm	Cd ppm	Hg ppm	Corg %	Ntot %	Ptot ppm	Oli min. ppm
n	131	80	80	80	80	80	80	60
Max.	323	35.95	2.11	0.54	1.8	0.4	500	14.73
Min.	49	2.75	0.09	0.02	0.09	0.03	111	0.1
Medio	119	9.17	0.45	0.15	0.61	0.12	312	1.93
St.dv.	44	5.57	0.33	0.13	0.38	0.08	93.4	2.78

Tabella 3 - Tenori medi, minimi e massimi degli elementi maggiori ed in tracce nei sedimenti della Sacca di Goro e di altre aree costiere e lagunari dell'Adriatico settentrionale ricavati dalla letteratura. Viene riportato il metodo di dissoluzione ove diverso da quello utilizzato nel presente lavoro.

	1 (a)	1 (b)	2	3	4	5 (a)	5 (b)	6 (b)	6 (c)	7 (a)	7 (b)	7 (c)	7 (d)
Fe (%)	2.35	3.65	1.2 0.33-1.89	-	-	0.06 0.04-0.09	0.07 0.06-0.09	-	-	21.3	14.1	14.2	15.6
Al (%)	-	-	4.42 3.30-7.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr (ppm)	150	179	202 147-257	56 47-85	57	43.7 28.0-62.0	50.5 32.0-56.0	57.32 6.8-151.60	28.32 18.40-42.7	16.3	12.3	14.6	11.4
Cd (ppm)	0.14	0.42	0.67 0.49-0.81	1.4 1.2-1.6	1.2	-	-	3.19 2.26-4.74	2.15 1.32-3.02	11.95	1.000	0.877	1.533
Cu (ppm)	16.4	49.4	34.0 9.2-48.6	58 46-65	58	92.3 56.0-183.0	97.6 76.0-123.0	22.84 5.3-46.57	21.7 13.8-30.0	135.6	13.9	14.4	18.7
Mn (ppm)	696	910	752 594-899	474 452-506	484	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni (ppm)	79.2	98.6	105 86.5-125	53 46-60	56	-	-	-	-	24.8	20.4	20.2	22.2
Pb (ppm)	8.5	25.1	16.8 9.2-21.6	72 59-81	59	77.2 48.0-132.0	76.9 60.0-130.0	39.79 31.47-56.05	41.75 31.10-74.10	99.2	25.9	24.4	43.3
Ti (ppm)	-	-	-	50 43-61	49	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn (ppm)	110	214	171 149-209	187 156-210	189	45.0 36.0-60.0	42.9 36.0-52.0	114.45 29.69-334.79	96.64 48.90-163.80	1655.1	45.7	64.7	49.5
Hg (ppm)	0.04	0.15	0.099 0.064-0.164	0.48 0.32-0.57	0.47	2.79 1.01-5.85	5.51 3.42-9.12	5.09 0.27-16.58	6.38 1.05-13.73	2.130	0.077	0.3	0.34

1 - Sacca di Goro (Fagioli *et al.*, 1991) (a) Stazione 7, (b) Stazioni 3, 4 e 8; 2 - Sacca di Goro (Fagioli *et al.*, 1994) 3 - Delta del Po (Guerzoni *et al.*, 1984); dissoluzione con HNO₃; 4 - Delta del Po (Frasconi *et al.*, 1984); dissoluzione con HNO₃; 5 - Laguna di Grado (a) e Marano (b) (Marocco, 1995); 6 - Laguna di Grado e Marano (Brambati, 1997): bennate (b) e carote (c); 7 - Laguna di Venezia (Basu e Molinaroli, 1994) (a) Porto Marghera, (b) Sud, (c) Centro, (d) Nord; dissoluzione con HNO₃.

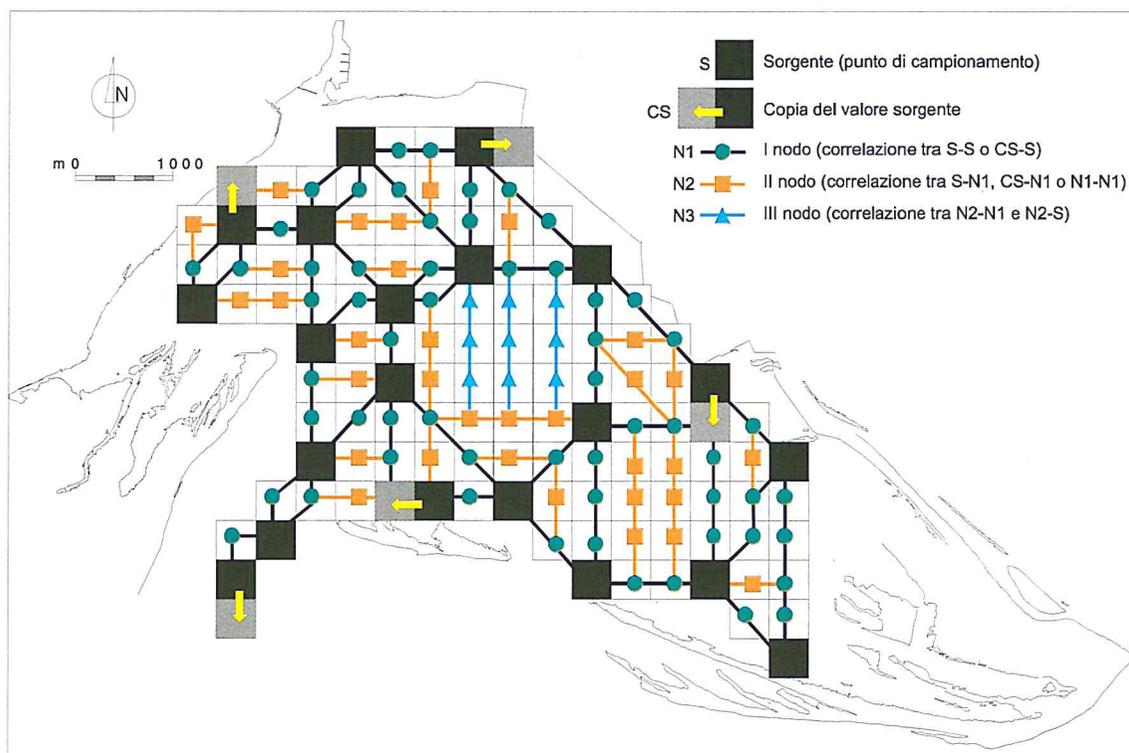


Figura 2 - Schema della griglia di suddivisione della Sacca di Goro, utilizzata per il calcolo delle distribuzioni areali dei singoli parametri. La sacca è rappresentata da 126 celle quadrate di 400 m di lato, di cui 21 (caselle nere) rappresentano le celle incentrate sui punti di campionamento. L'algoritmo di calcolo è dato da una serie di interpolazioni lineari, ponderate sulla distanza (assunta costante tra celle attigue) a partire dal collegamento tra i nodi sorgente (S) più vicini tra loro. Ad alcune celle (CS) è stato attribuito il valore sorgente, per l'estrema vicinanza del punto di campionamento. La correlazione sulla linea S-S o S-CS genera dei nodi (N1) che diventano sorgente per ulteriori correlazioni lungo le linee N1-N1, N1-S e N1-CS. La copertura è stata garantita fino al III ordine di nodi (N3) generati dall'interpolazione tra N2-N1 e N2-S nell'area centrale della sacca, a minor copertura di dati.

Per quanto riguarda la distribuzione degli oli minerali, i tenori più elevati in superficie si rinvennero in corrispondenza delle carote G1, G2, G4, G8 e G13 (Fig. 1), cioè nei settori settentrionale, occidentale ed orientale della sacca e nell'area della bocca principale (Fig. 4).

Profili verticali delle concentrazioni delle variabili geochimiche nelle carote G18 e G21

In Fig. 5 sono riportate le distribuzioni verticali di tutti gli elementi nelle due carote di taratura. Nella carota G18, le concentrazioni di Fe, Al, Ti, Mn, Li presentano alcuni picchi in profondità, talora piuttosto marcati, correlabili tra loro. Tali brusche variazioni sono dovute a netti cambiamenti tessiturali, legati alla percentuale della frazione siltosa (correlazione positiva, Fig. 6) a testimonianza di un'origine essenzialmente litogenica dei suddetti elementi in questa carota.

Contrariamente all'andamento piuttosto irregolare del nichel, le concentrazioni di Cu, Zn, Cd, Pb e Hg presentano, tendenzialmente, un incremento nella porzione superficiale della carota con alcuni picchi ben definiti, ma non correlabili a variazioni tessiturali. Nel caso del mercurio questo incremento è particolarmente marcato e progressivo dai livelli basali a quelli più superficiali.

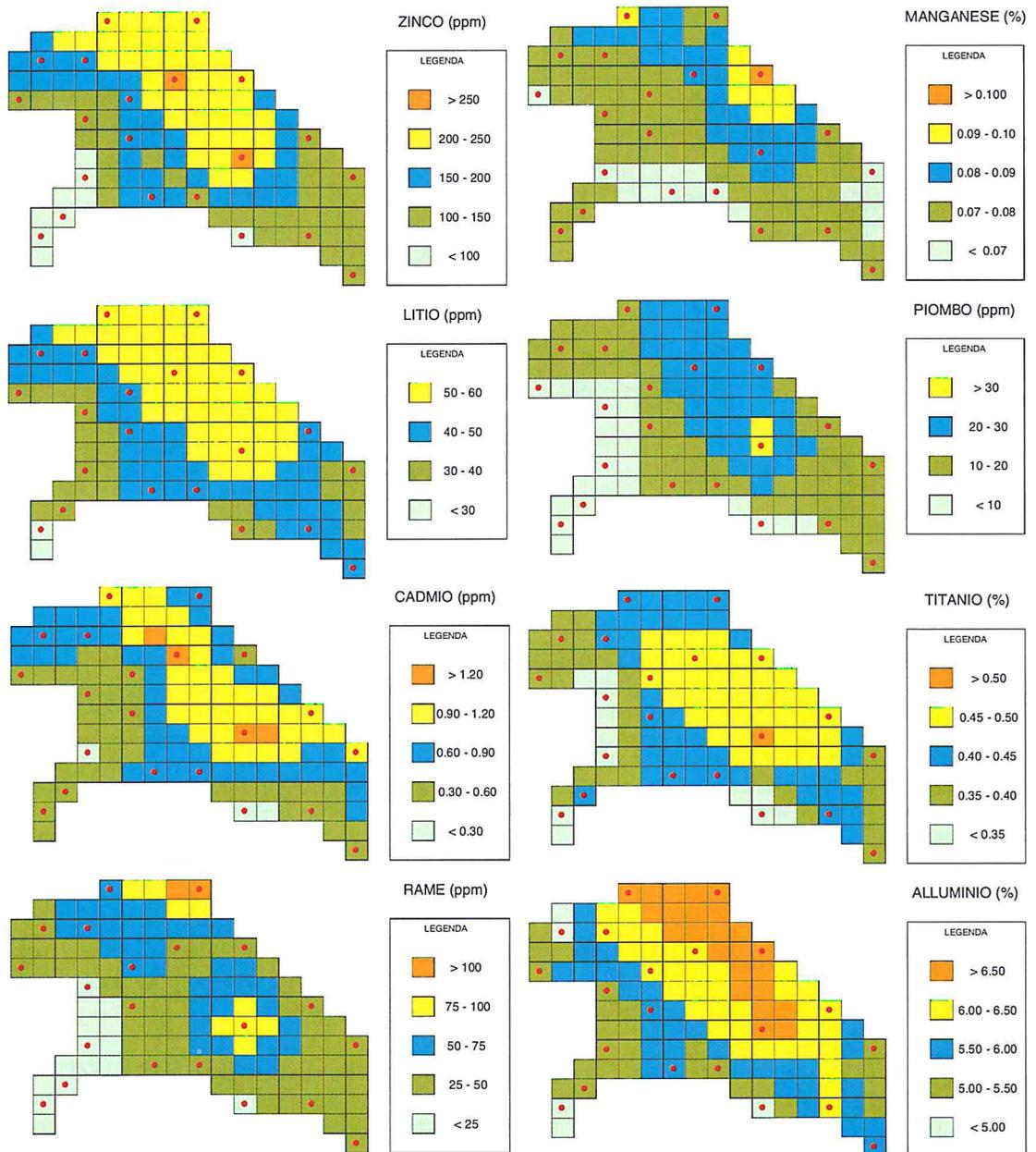


Figura 3 - Distribuzione areale delle concentrazioni delle variabili geochemiche investigate.

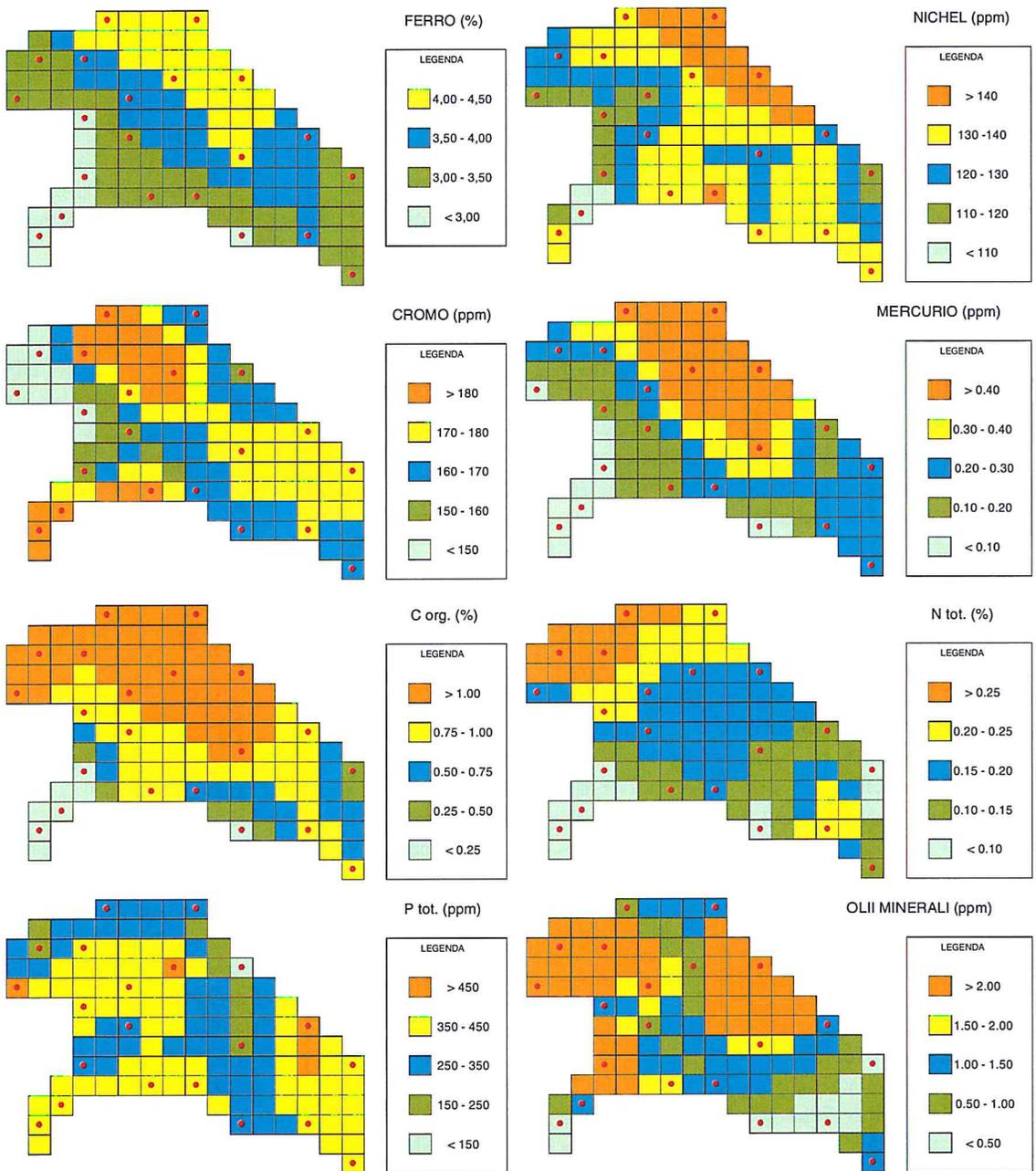


Figura 4 - Distribuzione areale delle concentrazioni delle variabili geochimiche investigate.

Sia il carbonio organico che l'azoto totale, seppur con modalità diverse, decrescono in profondità, in particolare al di sotto del metro, mentre il fosforo totale mostra un anomalo e brusco incremento nel livello basale della carota.

Nella carota G21 le concentrazioni di Fe, Al, Li, Ti, Cr e Mn hanno un andamento costante, fatta eccezione, come già visto per la carota G18, per qualche picco isolato. Le concentrazioni di nichel e rame seguono un andamento molto irregolare: la concentrazione del primo aumenta con la profondità mentre il secondo presenta un'opposta tendenza.

Zn, Cd, Pb e Hg, in particolare, mostrano un andamento molto regolare nella porzione basale ed un chiaro aumento della concentrazione nei livelli sedimentari della porzione sommitale della carota. Per il carbonio organico, l'azoto ed il fosforo totali vale quanto riportato precedentemente per la carota G18, anche se il decremento nel primo metro dei tenori di azoto è meno marcato.

Funzioni regionali di normalizzazione e fattori di arricchimento

Le funzioni regionali di base rappresentano delle relazioni matematiche che permettono di ricavare, per una determinata area, la concentrazione naturale dei metalli in tracce presenti nei sedimenti, cioè la soglia oltre la quale l'esistenza di un elemento non è più imputabile ai soli processi naturali ma anche ad apporti di materiali derivanti dall'attività antropica (Loring, 1990; Din 1992; Colizza et al. 1996). Il semplice confronto su base numerica dei valori di concentrazione può, infatti, portare a grossolani errori di valutazione dello stato di alterazione dei sedimenti (Covelli e Fontolan, 1997).

Nel calcolo di tali funzioni, è fondamentale individuare un elemento normalizzante (*grain-proxy*), cioè l'elemento la cui presenza sia associata alla frazione più fine dei sedimenti perché in essa si concentra la totalità dei metalli in tracce di provenienza sia naturale che antropica (De Groot et al., 1976; Donazzolo et al., 1981a, 1981b; Brambati e Marocco, 1984; Loring, 1991; Loring e Rantala, 1992). L'altro requisito è disporre di un numero sufficientemente elevato di campioni che non siano stati interessati da alterazioni antropogeniche. Per la Sacca di Goro, tali funzioni sono state calcolate in base ai tenori rilevati nei sedimenti dei livelli profondi delle carote, che si suppone si siano accumulati in epoca preindustriale.

Nel caso in esame, tra i possibili normalizzanti il ferro, l'alluminio ed il litio presentano elevati coefficienti di correlazione con la matrice fine del sedimento (*pelite*), pari a $r = 0.853$ per Fe, $r = 0.850$ per Al e $r = 0.917$ per Li ($p < 0.001$). Sebbene quest'ultimo risulti l'elemento meglio correlato, si è preferito utilizzare il Fe, in quanto più diffusamente impiegato per tale procedura (Tefry e Presley, 1976; Rule, 1986; Sinex e Wright, 1988). La scelta, tuttavia, non sembra poter inficiare l'elaborazione perché i tre elementi risultano correlati tra loro in maniera altamente significativa ($r > 0.900$) a riprova della loro comune provenienza litogenica.

Non disponendo di datazioni radiometriche l'individuazione del limite tra sedimenti pre e postindustriali risulta assai complessa, anche per la mancanza di precisi tassi di sedimentazione (Simeoni et al., 1999; Tesolin, 1999), per l'elevata dinamicità dell'ambiente e della subsidenza (Simeoni et al., 1998). Si è deciso, quindi, di operare utilizzando la significativa variabilità verticale del rapporto Zn/Fe nelle carote G18 e G21 (Fig. 7a) come possibile indice dell'alterazione antropica su scala temporale. Si può chiaramente notare il progressivo incremento del rapporto nei primi 53 cm della G18 e nei primi 97 cm della G21. A tal proposito, inserendo in un diagramma binario Zn-Fe tutti i campioni disponibili (Fig. 7b), appaiono due relazioni lineari. Il ramo superiore è costituito da tutti i campioni che si sospettano alterati: tutti i livelli superficiali delle carote e quelli appartenenti ai primi 53 cm della G18 e ai primi 97 cm della G21. Lo spessore di materiale alterato varia tra carota e carota in quanto dipendente dalla variabilità locale dei tassi di sedimentazione e/o subsidenza. La definizione della funzione regionale elemento-normalizzante avviene eliminando i campioni arricchiti, corrispondenti in questo caso al ramo superiore della distribuzione, dal diagramma binario (Loring, 1991). A riprova della validità dell'approccio, il coefficiente di correlazione tra Fe e Zn risulta migliorato, passando da $r = 0.412$ a $r = 0.521$ ($p < 0.001$).

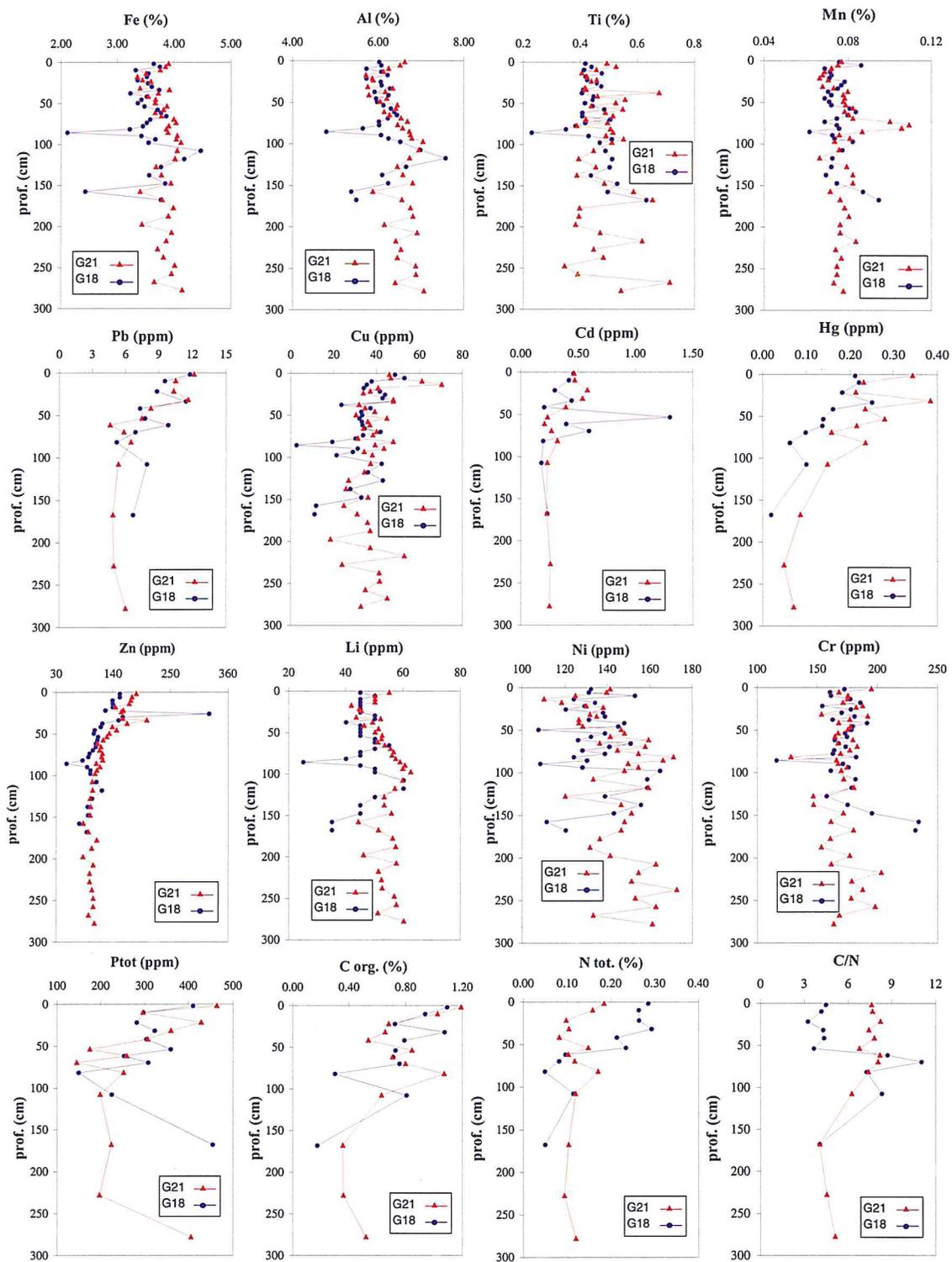


Figura 5 - Distribuzione verticale degli elementi maggiori ed in tracce nelle "carote di taratura" G18 (linea blu) e G21 (linea rossa).

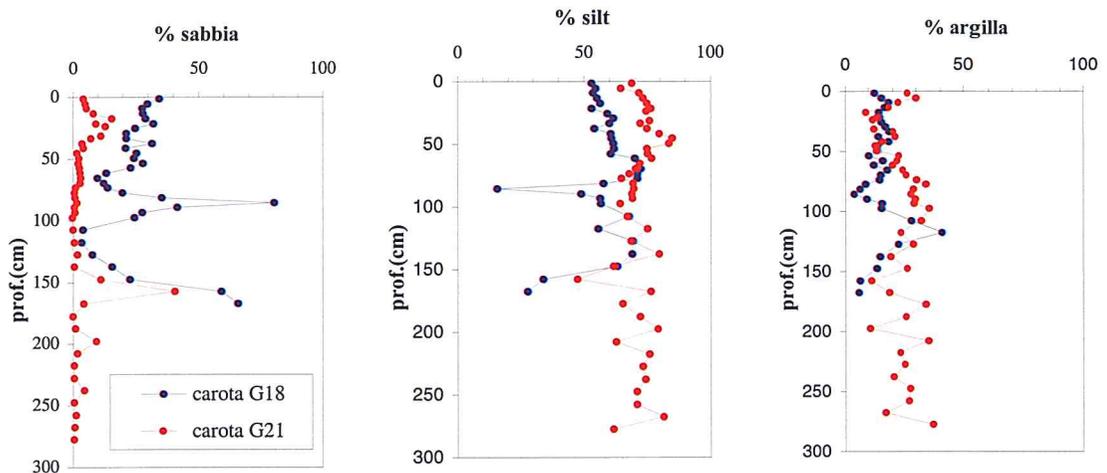


Figura 6 - Distribuzione verticale dei caratteri granulometrici delle carote di “taratura” G18 (linea blu) e G21 (linea rossa).

Tab. 4 - Funzioni di base regionali per ciascun elemento con i rispettivi parametri e livelli di significatività:
 a = coefficiente angolare della retta; σ_a = deviazione standard del coefficiente angolare;
 b = intercetta; σ_b = deviazione standard dell'intercetta;
 n = numero di campioni considerati; r = coefficiente di correlazione;
 p = significatività.

Elemento	a ($\pm\sigma_a$) Fe + b ($\pm\sigma_b$)	r	n	p
Mn =	0.007 (± 0.001) Fe + 0.050 (± 0.003)	0.665	68	p<0.001
Al =	1.408 (± 0.058) Fe + 1.075 (± 0.206)	0.950	66	p<0.001
Ti =	0.110 (± 0.010) Fe + 0.030 (± 0.035)	0.811	66	p<0.001
Ni =	18.430 (± 2.799) Fe + 74.996 (± 9.911)	0.639	65	p<0.001
Li =	19.020 (± 0.671) Fe -20.779 (± 2.383)	0.960	71	p<0.001
Cu =	18.535 (± 1.300) Fe -36.843 (± 4.590)	0.862	72	p<0.001
Zn =	21.641 (± 1.730) Fe + 16.147 (± 6.110)	0.842	66	p<0.001
Cd =	0.0897 (± 0.031) Fe -0.0565 (± 0.106)	0.457	34	p<0.007
Pb =	1.4627 (± 0.681) Fe + 1.5434 (± 2.373)	0.321	42	p<0.038
Cr =	10.795 (± 3.434) Fe + 129.48 (± 12.288)	0.366	66	p<0.003
Hg =	0.0459 (± 0.012) Fe + 0.0459 (± 0.041)	0.539	37	p<0.001

Applicando la stessa procedura agli altri metalli in tracce, le relazioni binarie con il ferro vengono ottimizzate fino ad ottenere le funzioni di base a carattere regionale (funzioni lineari del tipo: Elemento = a·Fe + b) come riportato in Tabella 4.

Le variazioni nella concentrazione del metallo tra i valori calcolati teoricamente e determinati per via analitica sono ragionevolmente ascrivibili alla presenza di uno o più fattori di alterazione.

Si può quindi ipotizzare per diverse tipologie di sedimento, un fattore di arricchimento (EF) del metallo dato dal semplice rapporto tra la concentrazione (n) reale e quella teorica ottenuta dalle suddette funzioni (Covelli e Fontolan, 1996):

$$EF = n_{reale} / n_{teorica} \quad [1]$$

L'entità degli arricchimenti individuati per i sedimenti superficiali della Sacca di Goro risulta molto contenuta e limitata a singoli campioni per gli elementi essenzialmente litogenici (Al, Li, Mn, Cr, Ti, Ni). Al contrario, le quote sommitali (0-20 cm) di tutte le carote, ad eccezione di quelle sabbiose più esterne alla sacca (G6, G7, G8, G16) presentano, in misura diversa, valori di EF (Fig. 8) significativamente superiori ad 1. Gli EF dei metalli pesanti di sospetta provenienza antropica mostrano valori massimi significativi in quest'ordine di grandezza: > 5 per Hg, > 4 per Cd e Pb e > 2 per Zn e Cu. Nei diagrammi di variazione degli EF con la profondità nelle due carote G18 e G21 (Fig. 9) risulta evidente il limitato scarto di valori per Mn, Al, Ti, Cr, Ni e Li, malgrado alcuni picchi positivi di Mn (EF < 1.5), alla quota 72-86 cm della carota G21 e alla base della carota G18, e di Ti (con EF di poco superiore a 1.5 o entro 1.5) prevalentemente nei livelli basali di G18 e in alcuni livelli sparsi di G21. Questa caratteristica si mantiene anche per le restanti carote.

Gli arricchimenti relativi a Zn, Cu, Hg, Pb e Cd confermano, invece, un preferenziale incremento dei valori nei livelli superficiali: l'EF (Zn) risulta infatti > 1 a partire dalla quota 70 cm ca. della carota G18 e dalla quota 94 cm ca. di G21; tuttavia, quasi tutti gli arricchimenti si mantengono al di sotto del valore 2. Lo stesso vale per EF (Cu), seppur con una maggior fluttuazione dei valori. Il mercurio presenta i trend di arricchimento più evidenti dalla base alla sommità delle carote: l'EF è superiore a 1 a partire da 107 e 70 cm circa, rispettivamente nelle carote G21 e G18, con picchi massimi fino a 5.29 (G21) e 3.19 (G18) nei livelli subsuperficiali (31 e 9 cm di profondità). Il sedimento appare debolmente arricchito in Pb (EF < 2) nei primi 50 cm in entrambe le carote (41 cm per G21 e 61 cm per G18).

Per lo stesso spessore, il Cd presenta tenori di arricchimento massimi di poco superiori a 2 in entrambe le carote, con un picco pari a circa 5 volte il valore del background nella carota G18 (53 cm).

Zonazione geochemica

Una prima valutazione qualitativa dello «stato di salute» dei fondali della Sacca di Goro può essere fatta analizzando la distribuzione di superficie dei valori di EF, limitatamente agli elementi più significativi. L'arricchimento di zinco, piombo e mercurio (Fig. 8) si sviluppa lungo una direttrice N-SE, con massimi nel settore centro settentrionale della sacca. Anche per il rame ed il cadmio le maggiori variazioni si riscontrano nella zona centrale e settentrionale della laguna.

Al fine di poter ridurre molte variabili descrittive a pochi e semplici indicatori numerici, sulla matrice dei dati geochemici è stata applicata, l'analisi fattoriale in modo R (Principal Component – rotazione Varimax). L'elaborazione ha consentito l'estrazione di 4 Fattori per una varianza complessiva pari a 79.6 % così distribuita (Tab. 5): 50.7 % F1, 15.7 % F2, 7.3% F3 e 5.9% F4. Negli ultimi due confluiscono il fosforo totale, nichel ed il cromo che però presentano andamenti irregolari e poco significativi per l'interpretazione dei risultati.

Il fattore 1 riunisce Zn, Pb, Hg, Cd, Cu, Corg, Ntot, Clay 2 (% argilla < 2 μ m) e Clay 4 (< 4 μ m). Questo fattore raggruppa i metalli in tracce che risultano di parziale provenienza antropica e le componenti a cui sono preferenzialmente associati: sostanza organica e frazione argillosa. Il fattore 2 raggruppa invece Fe, Ti, Al, Li, Mn e pelite, a conferma dell'associazione di questi elementi con la frazione fangosa nei sedimenti.

Utilizzando la matrice di correlazione di tutti i dati geochemici *listwise* si è quindi eseguita l'analisi fattoriale in modo Q (Principal Component – rotazione Varimax). Tale procedura d'analisi ha estratto 2 fattori, per una varianza complessiva pari a 99.0% (Fattore 1=95.8%, Fattore 2=3.2%).

In questo caso si sono volutamente esclusi dall'analisi alcuni parametri quali il fosforo totale, per la sua correlazione negativa con tutti gli altri parametri, il clay 4 (< 4 μ m) e la pelite.

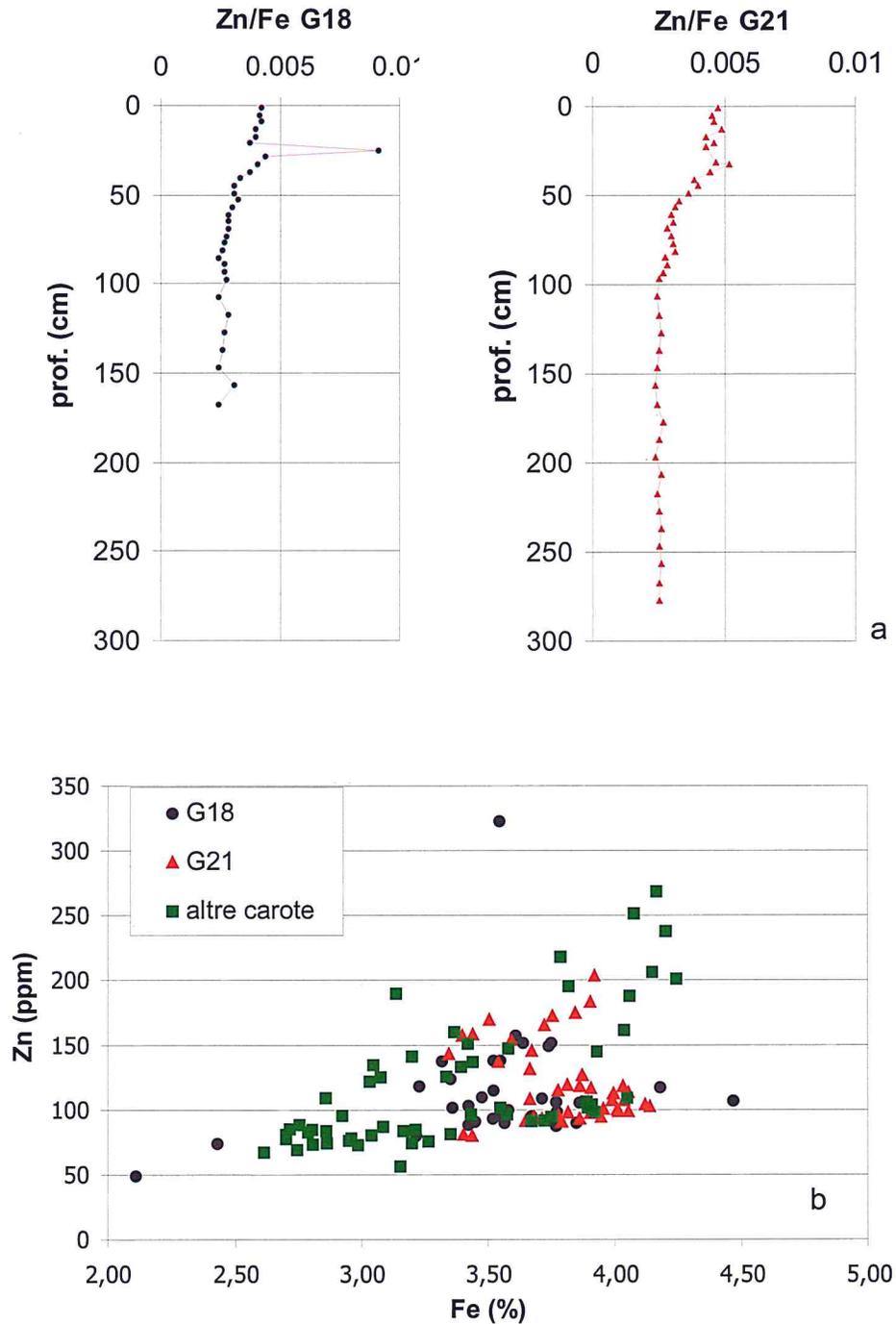


Figura 7 - Andamento verticale del rapporto Zn/Fe nelle carote G18 e G21 (a) e relazione tra Zn e Fe in tutti i campioni analizzati (b).

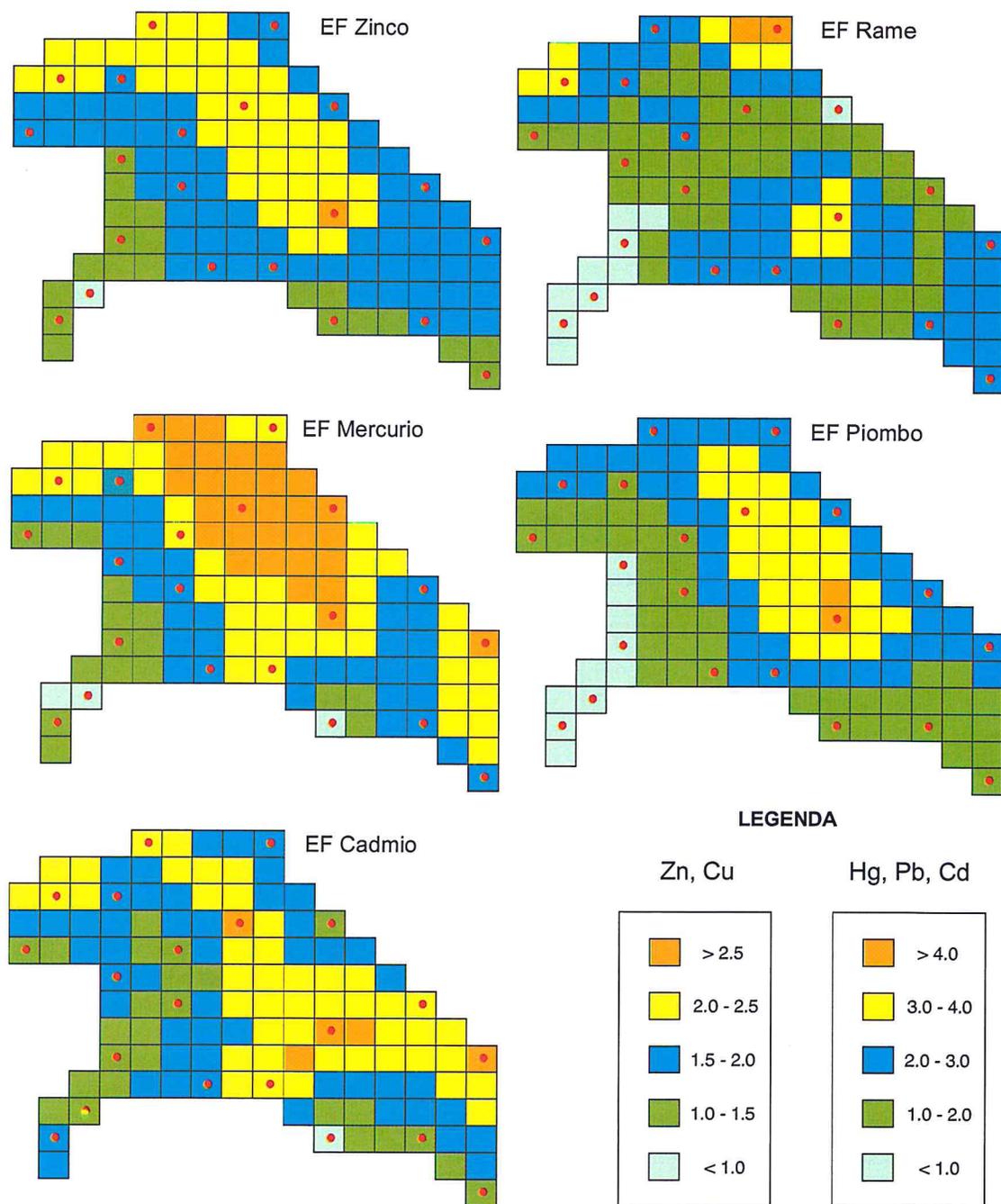


Figura 8 - Distribuzione areale dei fattori di arricchimento (EF) dei metalli in tracce nei sedimenti superficiali (0-20 cm).

Si è perciò considerato il solo parametro clay 2 (< 2 μm) come sufficientemente rappresentativo della variabilità tessiturale del sedimento e del ruolo primario che tale frazione svolge nella presenza delle anomalie dei metalli riscontrate nell'area.

Tabella 5 - Risultati dell'analisi fattoriale in modo R.

Eigenvalues	Varianza (%)		Varianza cum.	
9.12469	50.7		50.7	
2.82200	15.7		66.4	
1.31549	7.3		73.7	
1.05944	5.9		79.6	
	Fattore 1	Fattore 2	Fattore 3	Fattore 4
Zn	0.92355	0.28208	-0.10441	-0.02226
Pb	0.89630	0.05512	0.06856	0.21896
Hg	0.85663	0.28222	-0.04703	-0.02552
Cd	0.85474	0.00805	-0.04843	0.15647
Cu	0.76040	0.43152	0.15686	-0.01750
Corg	0.74786	0.43567	-0.05930	-0.22111
Ntot	0.64646	0.25837	-0.12198	-0.24146
Clay < 2 μm	0.64420	0.45939	0.15434	-0.33802
Clay < 4 μm	0.62693	0.57518	0.19335	-0.30337
Fe	0.36003	0.87613	0.20050	0.11742
Ti	0.05090	0.82860	-0.10609	0.33943
Al	0.29393	0.82830	0.31171	0.13858
Li	0.42419	0.80670	0.33129	-0.01591
Pelite	0.36440	0.78563	0.30014	-0.04354
Mn	0.13249	0.64589	0.00701	-0.08199
Ptot	0.06255	-0.11540	-0.89962	0.08880
Ni	-0.08680	0.33291	0.66285	0.31734
Cr	0.00897	0.14465	0.07848	0.88254

La distribuzione dei due fattori per le carote in esame è riportata in Figura 10. Si può notare che il Fattore 1 (Fig. 10a) risulta distribuito con alti valori di *factor loading* (FL) in quasi tutti i livelli delle carote, ma con un trend crescente procedendo verso i livelli più profondi; per tale ragione ad esso può essere associata la tipologia geochemica «naturale».

Il Fattore 2 (Fig. 10b) presenta un andamento complementare, con pronunciato trend decrescente di valori verso i livelli basali di quasi tutte le carote, con l'eccezione di quelle sabbiose di piattaforma di spit e di bocca tidale (G6, G7, G8, G16). Ad esso si può quindi associare una tipologia di matrice «contaminata», discriminata da un valore limite di FL pari a 0.6.

Per verificare la gerarchizzazione ottenuta dall'analisi fattoriale sono stati posti a confronto il contenuto della frazione argillosa con il peso del Fattore 2, distinguendo i campioni con FL superiore a 0.6 da quelli con valore inferiore. La relazione estrapolata (Fig. 10c) evidenzia come la funzione basale sia ben discriminata da quella superficiale.

In termini di tenori medi, i due gruppi si distinguono essenzialmente sulla base della sostanza organica (carbonio organico ed azoto totale) e dei metalli pesanti potenzialmente più tossici che sono presenti in concentrazioni più elevate in superficie rispetto al livello basale (Tab. 6): circa il 300% per il mercurio e 100% per il Pb, Cd, Cu e Zn.

L'analisi fattoriale, pur non rappresentando quantitativamente i valori di anomalia, ha permesso di mettere in luce l'alterazione che coinvolge essenzialmente la porzione superficiale dei sedimenti della Sacca di Goro. Poiché tale peculiarità è determinata in gran parte da quegli elementi già rappresentati da valori di EF significativamente superiori a 1 (Hg, Pb, Cd, Zn e Cu), la distribuzione areale di quest'ultima può fornire un primo elemento di zonazione geochimica. La distribuzione areale del peso del Fattore 2 rappresenta dunque una sintesi della distribuzione delle caratteristiche geochimiche della Sacca di Goro, a tale scopo in figura 11 vengono rappresentate griglie di zonazione per i livelli superficiali, intermedi e profondi delle carote indagate. Appare evidente come vi sia una forte diminuzione del peso del Fattore 2 passando dai livelli superficiali a quelli intermedi e basali; le uniche carote che non seguono questo andamento sono quelle più sabbiose (G6 e G7).

Tabella 6 - Valori medi delle variabili geochimiche e tessiturali dei due gruppi di campioni discriminati attraverso l'analisi fattoriale; $\Delta C\%$ rappresenta la variazione percentuale rispetto alla base.

Variabile	SUPERFICIE		BASE		$\Delta C\%$
	Media	dev.st.	Media	dev.st.	
Fe	3,62	0,38	3,34	0,48	8,4
Mn	0,08	0,01	0,07	0,01	5,4
Al	5,98	0,50	5,69	0,70	5,1
Ti	0,43	0,05	0,41	0,08	3,7
Ni	132,55	22,09	138,82	21,28	-4,5
Cr	164,51	18,08	170,17	17,93	-3,3
Li	47,86	7,34	41,33	10,03	15,8
Cu	43,58	17,81	23,88	10,46	82,5
Zn	159,80	41,13	89,61	13,46	78,3
Pb	12,66	6,67	6,45	2,02	96,1
Cd	0,63	0,37	0,31	0,21	102,0
Hg	0,26	0,12	0,07	0,04	279,8
Ptot	331,94	91,02	296,75	93,31	11,9
Corg	0,92	0,29	0,37	0,24	151,8
Ntot	0,17	0,008	0,07	0,004	128,6
Clay2	19,43	13,22	9,36	7,45	107,7
Clay4	29,71	17,56	15,82	11,80	87,8
Pelite	79,97	21,04	58,37	33,48	37,0

Conclusioni

Le caratteristiche geochimiche dei sedimenti recenti della Sacca di Goro, nel loro complesso, denunciano una marcata variabilità relativamente ai tenori degli elementi indagati. Tale variabilità, che si nota sia in senso verticale che areale, può essere imputata a tre diversi fattori, talora sovrapposti:

a) Disomogeneità litologica: ferro, alluminio e litio, ad esempio, presentano una variazione molto pronunciata ad ogni cambio litologico. I loro tenori sono infatti elevati in sedimenti a tessitura finissima, i quali predominano soprattutto nei settori interni della Sacca di Goro. Per tali elementi sono da escludere apporti di origine antropica.

b) Differenze composizionali: alcuni gradienti di concentrazione verticale, come il significativo incremento di titanio nei sedimenti di prodelta, potrebbero marcare l'influenza degli apporti del Po di Goro, che si differenziano composizionalmente da quelli provenienti dal Po di Volano.

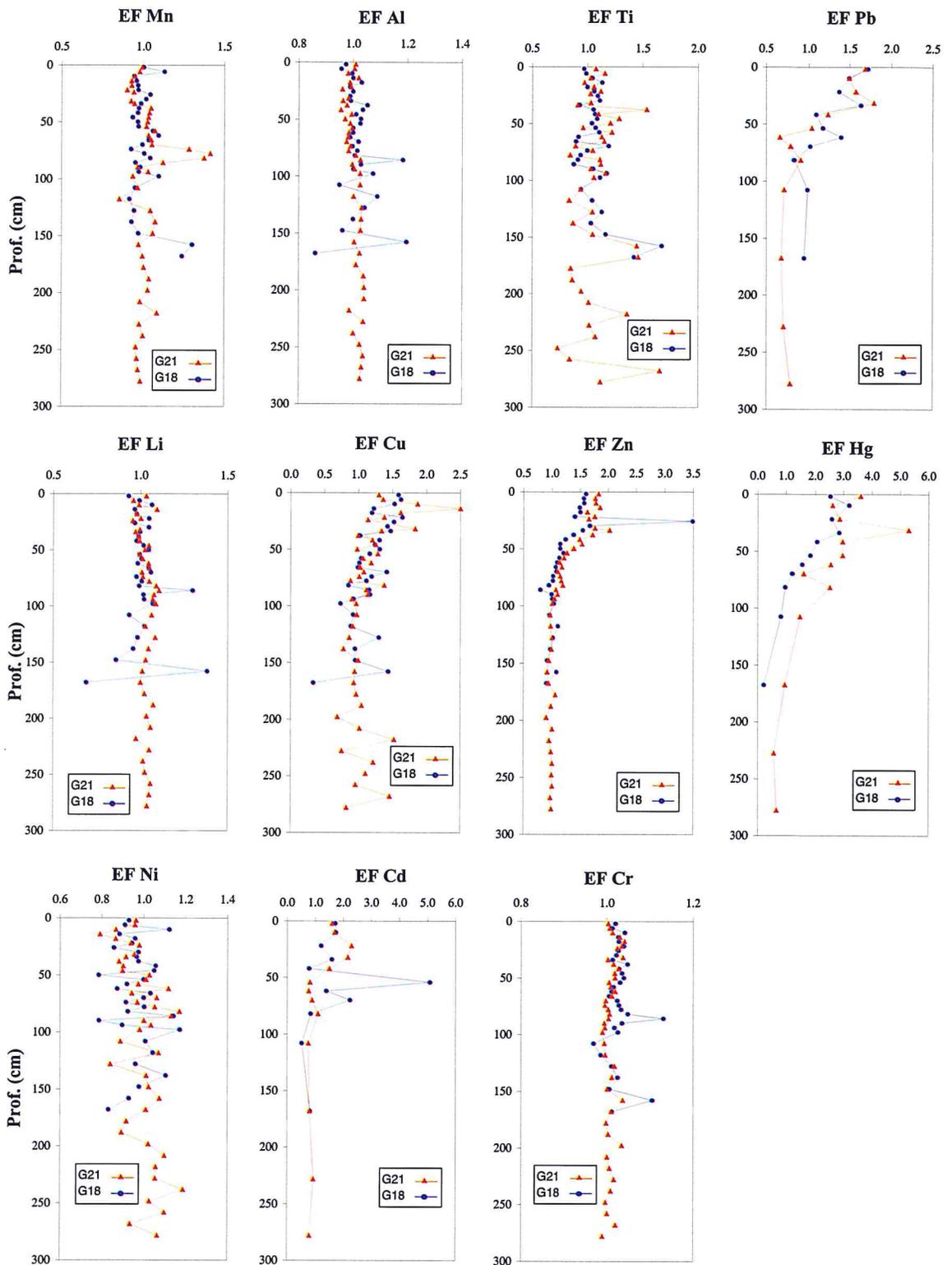


Figura 9 - Andamento verticale dei fattori di arricchimento (EF) degli elementi maggiori ed in tracce nelle "carote di taratura" G18 (linea blu) e G21 (linea rossa).

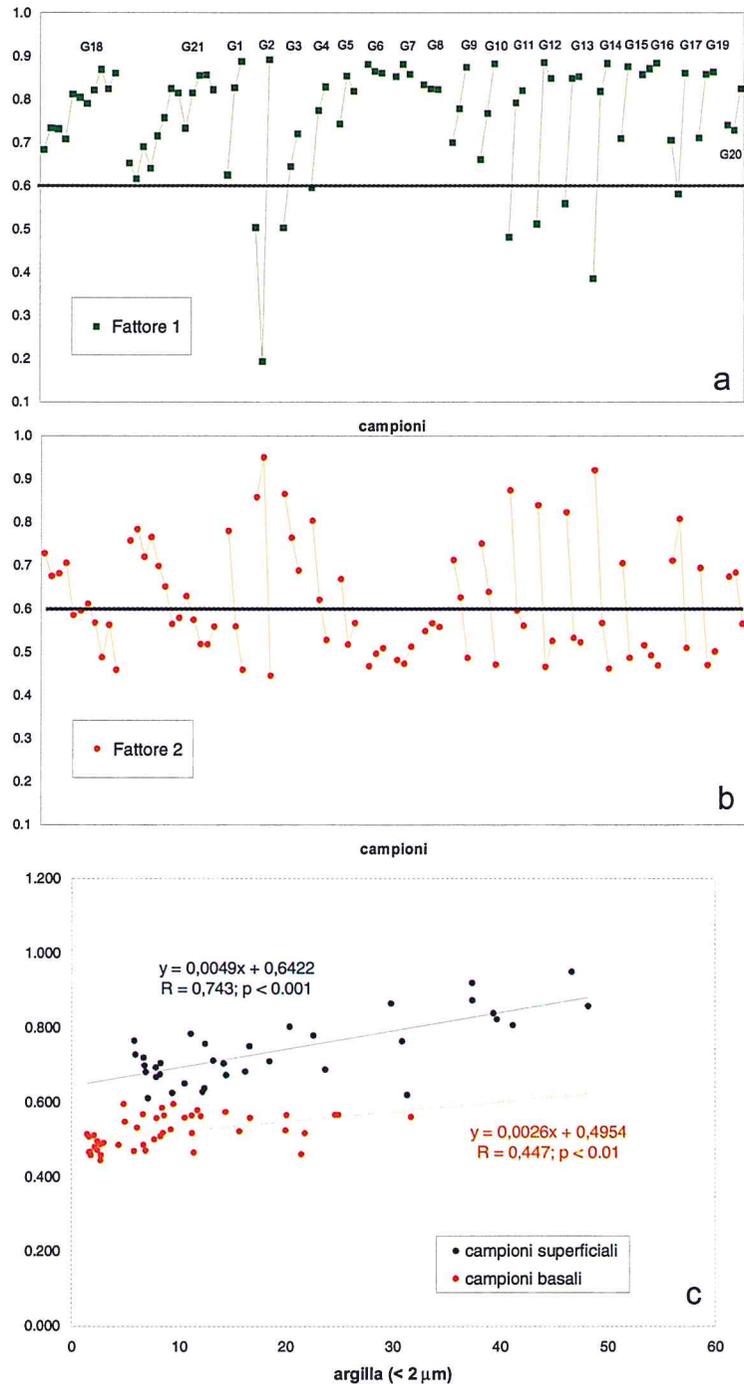


Figura 10 - Distribuzione del Fattore 1 (a) e del Fattore 2 (b) nelle carote. Per ciascuna delle carote, disposte in sequenza, sono riportati da sinistra a destra i livelli dalla superficie alla base. Viene inoltre indicato il valore limite di 0.6 del fattore 2 al di sopra del quale vengono discriminati i campioni alterati. Nella figura c viene evidenziata la relazione tra contenuto in argilla e peso del fattore 2. Sono distinte le due funzioni relative ai campioni più superficiali alterati e quelli intermedio-basali di background.

c) Contaminazione antropica: alcuni elementi persistenti, come Zn, Cu, Cd, Pb e, in particolare, Hg mostrano gradienti di concentrazione legati ad un arricchimento nel livello sedimentario più superficiale. Tale incremento non è legato ad anisotropie della matrice.

Attraverso un procedimento di normalizzazione e la definizione delle funzioni geochimiche di *background* significative per l'area, è stato possibile ottenere i fattori di arricchimento degli elementi in tracce, che consentono di quantificare le anomalie di concentrazione, indipendentemente dalla tipologia della matrice sedimentaria.

I valori di EF dei metalli considerati potenzialmente più pericolosi nell'interazione con la componente biotica all'interno della sacca, mostrano valori massimi significativi: > 5 per Hg, > 4 per Cd e Pb e > 2 per Zn e Cu. Gli arricchimenti si attestano comunque nei livelli superficiali, per uno spessore massimo di circa 70-90 cm. Questi risultati sono stati confermati dall'analisi fattoriale dei parametri considerati.

Sotto il profilo della "qualità" fisico-chimica dei sedimenti, in rapporto allo stato di analoghi ambienti lagunari dell'area nord-adriatica (Venezia, Grado e Marano) e limitatamente ai parametri investigati va evidenziata una contenuta alterazione dei sedimenti della Sacca di Goro.

I risultati ottenuti, soprattutto le diverse elaborazioni grafiche, possono costituire un utile strumento nell'eventualità vengano effettuati dragaggi per il riassetto idrodinamico e la conservazione delle risorse alieutiche, fornendo un'indicazione preliminare delle tipologie di sedimenti, per i quali, in molti casi, possono essere ipotizzate più soluzioni di reimpiego (tombamenti, ricostruzione di barene, rifluimenti, etc.).

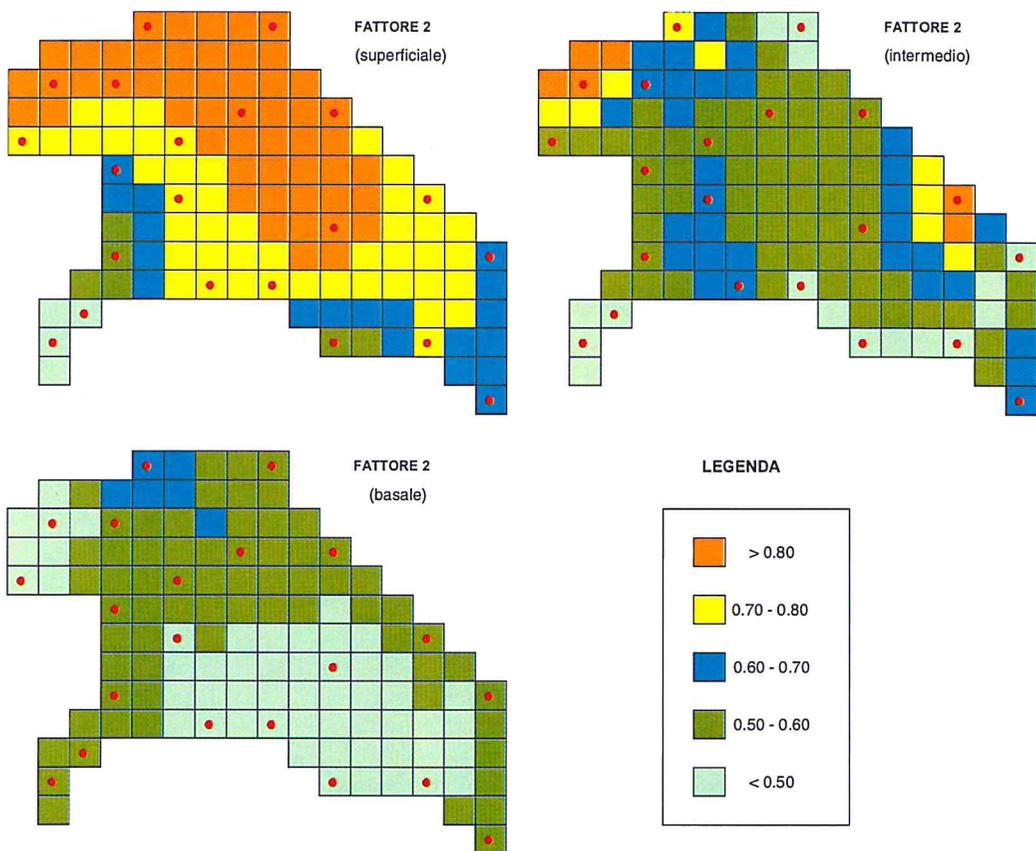


Figura 11 - Distribuzione areale del Fattore 2 per i livelli superficiali, intermedi e basali.

Ringraziamenti

Gli autori esprimono un sentito grazie a R. Valloni e V. Duchi per i preziosi suggerimenti impartiti durante la revisione critica del testo. Si ringraziano S. Predonzani ed A. Acquavita del Laboratorio di Biologia Marina di Trieste per l'aiuto offerto in alcune analisi geochimiche. Un doveroso ringraziamento va rivolto a G. Calderoni ed U. Tessari per la collaborazione fornita nelle analisi tessiturali dei sedimenti.

Lo studio è stato condotto con finanziamenti della Regione Emilia-Romagna (Assessorato Agricoltura, Obiettivo 5B, Sottoprogramma 1, Misura 7 - responsabile U. Simeoni), MURST 60% (responsabile R. Marocco) e con fondi COFIN 98 (responsabili R. Dal Cin e G. Fontolan).

Bibliografia

- Basu A. e Molinaroli E. (1994) - *Toxic metals in Venice lagoon sediments: model, observation, and possible removal*. Environmental Geology, 24: 203-216.
- Bondesan M. e Simeoni U. (1983) - *Dinamica e analisi morfologica statistica dei litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta*. Memorie di Scienze Geologiche, 36: 1-48.
- Brambati A. (1997) - *Metalli pesanti nelle Lagune di Marano e Grado. Piano di studi finalizzato all'accertamento della presenza di eventuali sostanze persistenti nelle Lagune di Grado e Marano e al loro risanamento*. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Regionale dell'Ambiente, Servizio dell'Idraulica, Trieste, 1996: 174 p.
- Brambati A. e Marocco R. (1984) - *Le discariche dei residui di lavorazione di bauxiti, fluorine e fosforiti nel Golfo di Venezia*. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Rapporti e Studi, 9: 369-402.
- Caputo M., Pieri L. e Unguendoli M. (1970) - *Geometric investigation of the subsidence in the Po delta*. Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata, 13: 187-207.
- Colizza E., Fontolan G. e Brambati A. (1996) - *Impact of a coastal disposal site for inert wastes on the physical marine environment, Barcola-Bovedo (Trieste, Italy)*. Environmental Geology, 27: 270-285.
- Covelli S. e Fontolan G. (1996) - *Regional geochemical functions to assess the impact of an inert waste disposal along the coastal zone*. In: Taussik J. e Mitchell J. (Eds.) Partnerships in Coastal Zone Management. Samara Publishing Ltd: 655-672.
- Covelli S. e Fontolan G. (1997) - *Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines (Gulf of Trieste, Italy)*. Environmental Geology, 30: 34-45.
- Dal Cin R. e Pambianchi P. (1991) - *I sedimenti della Sacca di Goro (Delta del Po)*. In: Bencivelli S. e Castaldi N. (a cura di) Studio Integrato sull'Ecologia della Sacca di Goro. Provincia di Ferrara, FrancoAngeli, Milano: 253-263.
- De Groot A.J., Salomons W. e Allersma E. (1976) - *Processes affecting heavy metals in estuarine sediments*. In: Burton J.D. e Liss P.S. (Eds.) Estuarine Chemistry. Academic Press, London: 131-157.
- Din Z.B. (1992) - *Use of aluminium to normalize heavy-metal data from estuarine and coastal sediments of Straits of Melaka*. Marine Pollution Bulletin, 24: 484-491.
- Donazzolo R., Hieke Merlin O., Menegazzo Vitturi L., Orio A.A., Pavoni B., Perin G. e Rabitti S. (1981a) - *Heavy metal contamination in surface sediments from the Gulf of Venice, Italy*. Marine Pollution Bulletin, 12: 417-425.
- Donazzolo R., Hieke Merlin O., Menegazzo Vitturi L., Orio A.A., Pavoni B. e Rabitti S. (1981b) - *Metalli pesanti nei Sedimenti di fondo dell'alto Adriatico dall'Isonzo al Po di Levante*. Risorse Biologiche ed Inquinamento Marino, 5: 843-857.
- Fagioli F., Landi S., Locatelli C. e Vecchiotti R. (1991) - *Valutazione del carico di metalli nelle acque, nei sedimenti e nei principali organismi accumulatori*. In: Bencivelli S. e Castaldi N. (a cura di) Studio Integrato Sull'Ecologia della Sacca di Goro. Provincia di Ferrara, FrancoAngeli, Milano: 135-172.
- Fagioli F., Righini F., Landi F. e Locatelli C. (1994) - *Valutazione del carico di metalli nelle acque, nel particolato sospeso, nei sedimenti e nei principali organismi accumulatori (Aprile 1990 - Marzo 1991)*. In: Bencivelli S., Castaldi N. e Finessi D. (a cura di) Sacca di Goro: Studio Integrato Sull'Ecologia - 2° Anno di Ricerche. Provincia di Ferrara, FrancoAngeli, Milano: 177-226.

- Fernex F.E., Span D., Flatau G.N. e Renard D. (1986) - *Behaviour of some metals in surficial sediments of the northwest Mediterranean continental shelf*. In: P.G. Sly (Ed.), *Sediment and Water Interactions, Proceedings of the 3rd International Symposium on Interactions Between Sediments and Water*, Springer Verlag, New York: 354-370.
- Förstner U. (1977) - *Sources and sediment associations of heavy metals in polluted coastal regions*. In: L.H. Ahrens (Ed.) *Origin and Distribution of the Elements, Proceedings of the 2nd Symposium*, Pergamon Press, Paris: 849-866.
- Frascardi F., Frignani M., Giordani P., Guerzoni S. e Ravaioli M. (1984) - *Sedimentological and geochemical behaviour of heavy metals in the area near the Po River Delta*. *Memorie Società Geologica Italiana*, 27: 469-481.
- Frenet-Robin M. e Ottmann F. (1978) - *Comparative study of the fixation of inorganic mercury on the principal clay minerals and the sediments of the Loire Estuary*. *Estuarine, Coastal & Shelf Science* 7: 425-436.
- Furlan N., Fontolan G., Sartore L., Milani B., Mosca R. e Meriani S. (1999) - *Caratterizzazione chimico-fisica dei sedimenti del porto di Trieste e problematiche derivanti dall'eventuale dragaggio e smaltimento a mare*. *Bollettino Società Adriatica di Scienze*, 79: 3-26.
- Guerzoni S., Frignani P., Giordani P. e Frascari F. (1984) - *Heavy metals in sediments from different environments of a northern Adriatic Sea area, Italy*. *Environmental Geology and Water Sciences*, 6: 111-119.
- Hedges, J.I. e Stern, J.H. (1984) - *Carbon and nitrogen determinations in carbonate-containing solids*. *Limnology and Oceanography*, 29: 657-663.
- Idroser (1994) - *Aggiornamento ed integrazione del piano progettuale per la difesa della costa Adriatica Emiliano-Romagnola, Relazione Generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna: 276 p.
- IRSA-CNR (1985) - *Metodi analitici per i fanghi: Parametri chimico-fisici*. Quaderni Istituto di Ricerca sulle Acque, 64, vol. 3.
- Loring D.H. (1990) - *Lithium: a new approach for the granulometric normalization of trace metal*. *Marine Chemistry*, 29: 155-168.
- Loring D.H. (1991) - *Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments*. *ICES Journal of marine Sciences*, 48: 101-115.
- Loring D.H. e Rantala R.T.T. (1992) - *Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter*. *Earth Sciences Review*, 32: 235-283.
- Marocco R. (1995) - *Sediment distribution and dispersal in northern Adriatic lagoons (Marano and Grado paralic system)*. *Giornale di Geologia*, 57: 77-89.
- Pugnetti A., Viaroli P. e Ferrari I. (1992) - *Processes leading to dystrophy in a Po River Delta Lagoon (Sacca di Goro): phytoplankton-macroalgae interactions*. *Science of the Total Environment*, 4: 445-456.
- Ramamoorthy S. e Rust B.R. (1978) - *Heavy metal exchange processes in sediment-water systems*. *Environmental Geology*, 2: 165-172.
- Rule J.P. (1986) - *Assessment of trace element geochemistry of Hampton Roads Harbor and Lower Chesapeake Bay area sediments*. *Environmental Geology*, 8: 209-219.
- Salomons W. e Förstner U. (1984) - *Metals in the hydrocycle*. Springer Verlag, New York: pp. 349.
- Shepard F.P. (1954) - *Nomenclature based on sand-silt-clay ratios*. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24: 151-158.
- Simeoni U., Borghesi A., Calderoni G., Ciavola P., Fontolan G., Gatti M., Gonella M., Tessari U. e Zamariolo A. (1998) - *Analisi previsionale dell'evoluzione dello Scanno e della Sacca di Goro*. Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura, Obiettivo 5B, Sottoprogramma 1, Misura 7, Relazione Finale, Ferrara. Pp. 273.
- Simeoni U., Bezzi A., Calderoni G., Covelli S., Fontolan G., Sartore L., Tesolin V., Tessari U. e Zamariolo A. (1999) - *Caratteristiche dei sedimenti della Sacca di Goro*. Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura, Obiettivo 5B, Sottoprogramma 1, Misura 7, Relazione Finale, Ferrara. Pp. 89.

- Sinex S.A. e Wright D.A. (1988) - *Distribution of trace metals in the sediments and biota of Chesapeake Bay*. Marine Pollution Bulletin, 19: 425-431.
- Tefry J.H. e Presley B.J. (1976) - *Heavy metals in sediments from San Antonio Bay and the north west Gulf of Mexico*. Environmental Geology and Water Science, 1: 282-294.
- Tesolin V. (1999) - *Aspetti Geochimico-Ambientali della Sacca di Goro. Tesi di Laurea inedita, Università degli Studi di Trieste, Luglio 1999: pp. 86.*
- Van Iperen J. e Helder, W. (1985) - *A method for the determination of organic carbon in calcareous marine sediments*. Marine Geology, 64: 179-187.
- Viaroli P., Pugnetti A. e Ferrari I. (1992) - *Ulva rigida growth and decomposition processes and related effects on nitrogen and phosphorus cycles in a coastal lagoon (Sacca di Goro, Po River delta)*. In: G. Colombo et al. (Eds.) Marine Eutrophication and Population Dynamics. Olsen & Olsen, Fredensborg, Denmark: 77-84.
- Windom H.L. (1992) - *Contamination of the marine environment from land-based sources*. Marine Pollution Bulletin, 25: 32-36.

Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 3/4/2000.