

## Caratterizzazione geochimica ambientale di alcuni litorali della Sardegna orientale

Concetta Ferrara<sup>1</sup>, Anna Maria Caredda<sup>1</sup>, Alessandro Cristini<sup>1</sup> e Guido Alberti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Cagliari, via Trentino 51, 09127 Cagliari.

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze Chimiche, Università di Cagliari, Complesso Universitario, 09042 Monserrato.

### Riassunto

Questo lavoro ha come obiettivo lo studio di base delle caratteristiche ambientali di alcune spiagge della Sardegna orientale dominate dal moto ondoso. Sono state analizzate le caratteristiche granulometriche e composizionali di 64 campioni prelevati sulla battigia di questi litorali, parzialmente antropizzati, della costa orientale. Sono stati determinati in particolare i tenori dei metalli pesanti ed in tracce più significativi (Rb, Sr, Ba, Co, Zn, Pb) dato che la loro presenza potrebbe essere indice di inquinamento ambientale.

Particolarmente utile, a tale scopo, è stato il confronto con analoghi sedimenti provenienti da alcune spiagge della costa occidentale già caratterizzate, dal punto di vista ambientale, con gli stessi parametri geochimici. Da tale confronto è stato riscontrato che la litologia è uno dei principali fattori (litologie, modalità di trasporto dei corsi d'acqua e processi sedimentari legati all'azione del moto ondoso) che possono controllare la distribuzione dei metalli nelle spiagge della costa orientale, a differenza di quanto accade nel settore occidentale e in altre aree dove i tenori di metalli tossici sono in relazione alla presenza di siti minerari dismessi e di varie attività antropiche. Infine l'elaborazione statistica dei dati tramite l'analisi multivariata ha permesso una più completa definizione delle spiagge della costa orientale.

**Parole chiave:** sedimenti costieri, Sardegna orientale, chimica ambientale, geochimica, analisi multivariata.

### Abstract

*The aim of this research is the environmental characterization of some beaches in the eastern coast of Sardinia (Italy) by means of a textural and geochemical study of littoral sediments. The sands studied come from 64 sampling points. The main lithotypes outcropping in the coastal drainage areas are: granite, metamorphic and carbonate rocks, in addition to some volcanic rocks. The environmental quality of the analysed systems is correlated with the presence of heavy metals (Rb, Sr, Ba, Co, Zn, Pb). The results, compared with those of beach sediments from western Sardinian coast and from other coast systems, pointed out that the main factors controlling the heavy metal accumulation are the lithology, the streams and the sedimentary processes triggered by the wave movement. The multivariate analysis of sedimentological, mineralogical and geochemical data allowed a more complete characterization of the environments examined.*

**Keywords:** coastal sediments, eastern Sardinia, environmental chemistry, geochemistry, multivariate analysis.

## Introduzione

I sedimenti sono indicatori delle caratteristiche originarie delle rocce da cui derivano, ma per quanto riguarda la presenza di metalli pesanti e in tracce, questi ultimi possono provenire dalle litologie presenti nei bacini alimentatori oppure dalle attività antropiche e sono supportati da determinate granulometrie (Eyre e McConchie, 1993; Covelli e Fontolan, 1997; Dinelli et al., 2000).

Le piane costiere in esame della costa orientale sarda, sede di molteplici attività umane, sono gli ambienti maggiormente interessati dal mescolamento di sedimenti di diverse provenienze. In questa sede i corsi d'acqua trasportano e depositano materiali di granulometria superiore a 0.06 mm (Carboni et al., 1987), come carico di fondo. Questi materiali si arricchiscono ulteriormente di metalli pesanti, presenti nelle acque come ioni complessi (anioni inorganici) o come particolato, adsorbiti dalle frazioni granulometriche più fini in sospensione, o da particolari specie mineralogiche, oppure chelati da sostanze organiche in soluzione (Perdue, 2001; Luther, 1995). In altre piane della costa occidentale, il trasferimento dei sedimenti alluvionali nel retro spiaggia dei relativi ambienti di transizione causa un accumulo di frazione fine che diventa un sito di arricchimento di metalli (Careda et al., 1999). Il periodico trasporto del carico alluvionale negli adiacenti ambienti costieri dominati dal moto ondoso, caratterizzati da differenti condizioni energetiche e chimico-fisiche dell'acqua, ha come conseguenza la separazione delle varie popolazioni granulometriche. Ciascuna di esse si comporta come un gruppo a se stante di particelle che può contenere metalli dall'origine oppure se ne arricchisce adsorbendoli dall'ambiente circostante. La componente sabbiosa del carico di fondo si deposita velocemente con il proprio carico di metalli mentre i materiali più fini vengono portati al largo e sedimentati successivamente.

Questo lavoro ha come obiettivo la caratterizzazione geochemica ambientale, finora inesistente, di alcune spiagge della Sardegna orientale che in questi ultimi anni hanno subito una parziale antropizzazione (villaggi turistici, porticcioli turistici, ecc.). In tali litorali dominati dal moto ondoso, le litologie, in cui sono presenti numerose mineralizzazioni, variano da nord a sud dal carbonatico al metamorfico ed infine al magmatico. Le analisi sui sedimenti di due corsi d'acqua che si riversano su questa costa, Quirra e Corr'e Pruna i quali scorrono rispettivamente su litologie prevalentemente metamorfiche e granitiche, indicano quali elementi delle litologie sono contenuti nei sedimenti delle spiagge (Cristini et al., 1981; Carboni et al., 1987). Si è ritenuto opportuno confrontare i sedimenti di queste spiagge, che non risentono delle influenze antropiche apparenti, con quelli di alcune spiagge della costa sud occidentale della Sardegna, sulle quali insistono importanti discariche minerarie provenienti da miniere ormai in disuso da circa dieci anni: la spiaggia della piana alluvionale del Rio Piscinas, la spiaggia di Buggerru e quella della parte meridionale del Golfo di Oristano (Careda et al., 1999; Loi, 2000; Grosso, 1999; Pilia, 1999). I dati ottenuti vengono confrontati con quelli di altri sistemi costieri influenzati da insediamenti industriali (Voutsinou-Taliadouri e Varnavas, 1995) agricoli e urbani (Jones, 1973; Frascari et al., 1984; Establier et al., 1985; Menegazzo et al., 2001).

## Caratteristiche geomorfologiche e geografiche generali delle coste

Il tratto costiero esaminato si estende per circa 125 km sulla costa orientale ed è compreso tra le località di Cala Gonone (Golfo di Orosei) a nord e Cala Sinzias a sud (Fig. 1). Le spiagge campionate sono ubicate nel Golfo di Orosei, nelle piane costiere dei fiumi Quirra e Flumendosa in cui è compresa la spiaggia di Porto Corallo, e nelle piane costiere del Rio Picocca e Rio Corr'e Pruna con annessa la spiaggia di Costa Rei. Queste piane, la cui attuale configurazione morfologica e sedimentaria è riconducibile a processi fluviali e litorali quaternari (Barca et al. 1981; Carboni et al. 1987) hanno una modesta estensione. Esse terminano sul mare con spiagge costituite da sedimenti ciottolosi, di dimensioni medio piccole, e sabbiosi a componente litologica varia che riflettono essenzialmente il tipo di basamento presente nei vari bacini. Le spiagge della parte meridionale del Golfo di Orosei sono delle "pocket beaches" ciottolose alimentate solo dalla scogliera carbonatica in cui si formano (Ferrara et al. 1997).

La costa orientale è dominata da venti con direzione E, NE, SE, l'escursione di marea è irrilevante

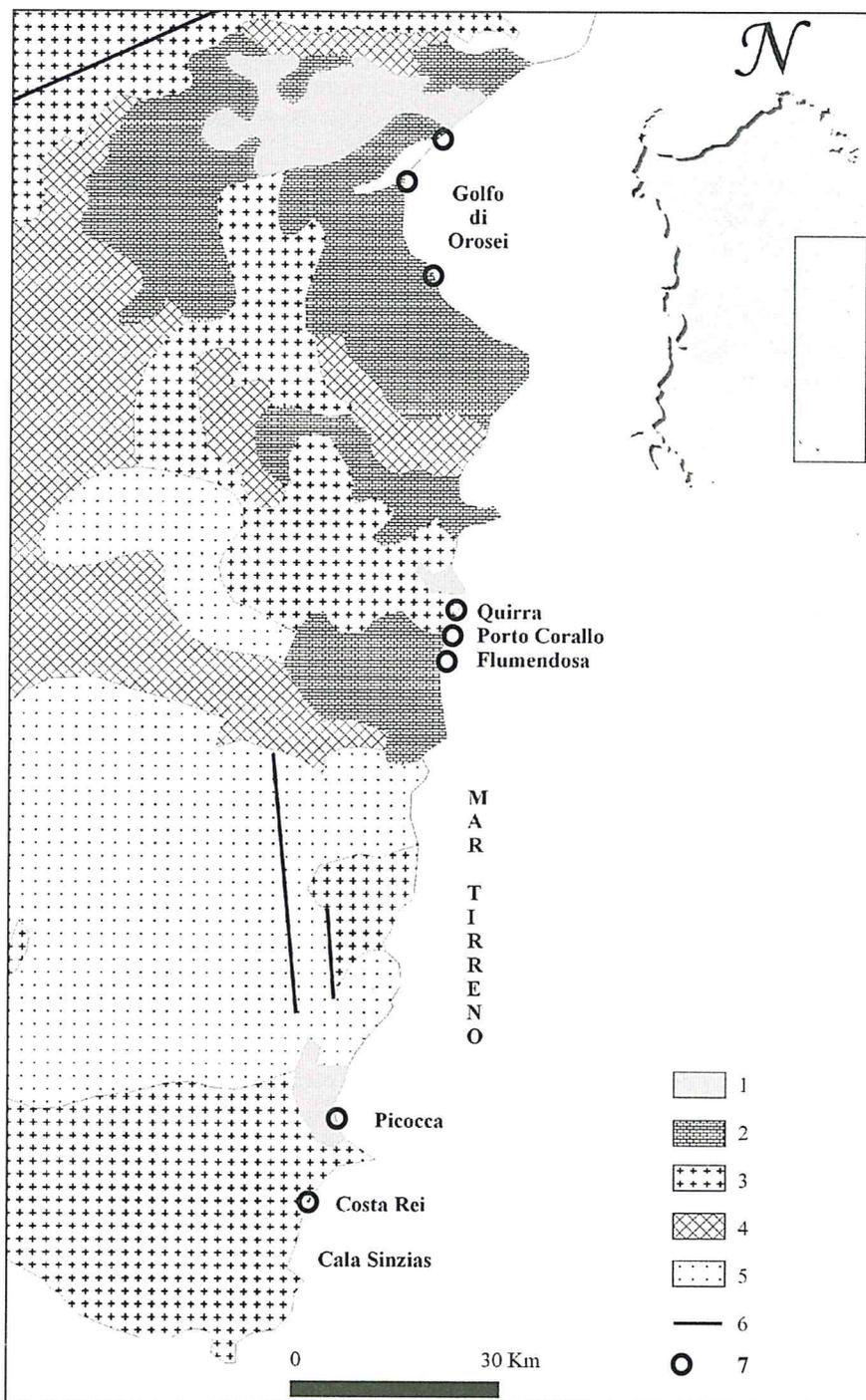


Figura 1 - Caratteristiche geologiche dell'area studiata: 1) ciclo vulcanico alcalino, transizionale e subalcalino plio-pleistocenico; 2) depositi di piattaforma carbonatica (successioni marine e transizionali del triassico medio p.p. - cretaceo inferiore); dolomie e calcari dolomitici, calcari bioclastici, calcari oolitici e a oncoidi, calcari selciferi, calcari micritici, calcari marnosi e marne; 3) basamento ercinico: complesso intrusivo (filoni e rocce plutoniche); 4) complesso metamorfico ercinico in facies a scisti verdi: falde interne (metarenarie, quarziti e filladi); 5) complesso metamorfico ercinico in facies a scisti verdi: falde esterne (metarenarie, quarziti, filladi, metacalcari nodulari, scisti neri e quarziti); 6) principali faglie regionali (da Carmignani et al., 1992; modificata); 7) punti di campionamento.

per il Tirreno centrale è di circa 22 cm), per cui tutte le spiagge di questa costa hanno caratteristiche morfosedimentarie di tipo “wave dominated system” con una battigia poco estesa dove si scarica la maggior parte della energia del moto ondoso i cui valori medi annui sono dell’ordine di  $4 \times 10^6$  t/m/m (Atzeni e Ginesu, 1993); il movimento dei sedimenti avviene prevalentemente lungo la riva in direzione sud (Cristini et al, 1992; Ferrara et al., 1997).

Sulla costa occidentale i venti principali provengono da NO e SE, le caratteristiche deposizionali sono di tipo “wave dominated system” con valori dell’energia media annua del moto ondoso che arrivano fino a circa  $13 \times 10^6$  tm/m (Atzeni e Ginesu 1993). Il movimento dei sedimenti è prevalentemente in direzione sud, lungo riva, e verso il largo, di tipo “onshore – offshore” e viceversa (Atlante delle Spiagge, 2000).

I corsi d’acqua considerati sono a regime spiccatamente torrentizio, con piene autunnali e primaverili e con portate estive insignificanti e limitate al subalveo, a causa del regime pluviometrico, della prevalente impermeabilità dei terreni e della scarsa copertura vegetale (Carboni et al., 1987).

### Caratteristiche litologiche

I sedimenti derivano dall’erosione del basamento paleozoico e delle coperture mesozoiche, terziarie e plioquaternarie che costituiscono i rilievi delimitanti le piane (Fig. 1). I rilievi paleozoici sono costituiti da :

- successioni terrigene (metarenarie, quarziti e filladi) del Cambro-Ordoviciano inferiore nell’entroterra del Golfo di Orosei;
- complesso magmatico e vulcano-sedimentario costituito da metarenarie micacee, quarziti alternate a metapeliti e rari conglomerati dell’Ordoviciano (successione preordoviciano medio delle arenarie di San Vito e della formazione di Solanas) presente nelle piane del Quirra e del Flumendosa;
- marmi e calcescisti Silurico-Devoniani nel bacino del Quirra e del Flumendosa;
- complesso intrusivo filoniano (porfidi granitici, aplitici e pegmatitici) presente nel golfo di Orosei, e intrusivo plutonico (leucograniti equigranulari e granodioriti monzonitiche) del Carbonifero superiore-Permiano nel bacino del Quirra, nelle piane del Rio Picocca, nella spiaggia di Costa Rei e nell’entroterra del Golfo di Orosei.

I sedimenti di copertura sono costituiti da conglomerati e dolomie permotriassiche e giurassiche nelle piane del Quirra e del Flumendosa e da depositi carbonatici di piattaforma e dolomitici del Trias nel golfo di Orosei. Coperture effusive, trachi-basaltiche plio-pleistoceniche affiorano localmente a Capo Ferrato (settore settentrionale della spiaggia di Costa Rei) e nel Golfo di Orosei a nord. Le deboli coperture quaternarie sono formate da depositi di versante, sedimenti alluvionali e marini pleistocenici che costituiscono l’ossatura delle piane attuali e da sabbie costiere oloceniche (Beccaluva et al., 1977; Carmignani et al., 1982; Dieni e Massari, 1985; Barca et al., 1996). Numerose mineralizzazioni (Marcello et al., 1978) prevalentemente a scuri sono presenti nei bacini alimentatori delle spiagge di Quirra, del Flumendosa e del Picocca.

### Campionamento e tecniche analitiche

Durante quattro campagne di campionatura sono stati prelevati 64 campioni rappresentativi della variabilità granulometrica dei tratti costieri esaminati. La campionatura, effettuata sulla battigia, ha interessato i primi 5 cm. I punti di campionatura sono indicati nella Figura 1. I risultati delle analisi chimiche sono riportati nelle Tabelle 1 e 2, mentre la Tabella 3 riporta i valori medi di alcune specie chimiche delle principali litologie da cui derivano i sedimenti studiati: delle quattro litologie indicate, i valori per le rocce metamorfiche (scisti) sono valori medi della crosta, non essendo conosciuti dati regionali.

I campioni sono stati preliminarmente essiccati in stufa a 40°C. Tutte le analisi sono state effettuate sul campione totale senza differenziare la frazione fine ( $> 4\Phi$ ), essendo i sedimenti prevalentemente sabbiosi. Le analisi granulometriche sono state eseguite mediante setacciatura a secco a intervalli di  $0.25 \Phi$  con maglie comprese tra  $-2.5$  e  $+4 \Phi$  utilizzando la scala di Krumbein (1934); nella Figura 2 sono rappresentate le curve di distribuzione granulometriche relative ai campioni più rappresentativi di ogni spiaggia. I sedimenti sono stati inoltre caratterizzati mediante i parametri di Folk e Ward

(1957): diametro medio ( $M_z$ ), selezione ( $\sigma_1$ ) e asimmetria ( $Sk_1$ ). La composizione mineralogica è stata determinata su polveri per via diffrattometrica con un diffrattometro Philips PW 1710 usando la radiazione Cu-K $\alpha$  e un monocromatore di grafite; i dati ottenuti sono stati elaborati con il programma Philips PC-APD. Per le analisi chimiche il campione totale è stato vagliato a 2 mm, macinato, e circa 0.15 g sono stati trattati con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e solubilizzati in forno a microonde con una soluzione di "acqua regia" (HNO<sub>3</sub> e HCl (1:3)) e HF.

La concentrazione degli elementi chimici maggiori e minori è stata determinata usando diverse tecniche analitiche (Sturgeon et al., 1982; Macdonald e O'Brien, 1985; Milliward e Kluckner, 1989): gli elementi maggiori sono stati determinati in Fluorescenza X con uno Spettrometro Philips PW 1400, mentre Ba, Sr, Rb con il Plasma Ottico (ICP-OES) (ARL 3520 B) e Pb, Zn, Co sono stati analizzati con l'assorbimento atomico con fornetto a grafite Perkin Elmer 3030 Zeeman (GFAAS). L'accuratezza delle determinazioni chimiche è stata verificata usando l'International Marine Sediment Reference Standard BCSS-1 (National Research Council, Canada). Il confronto fra i dati certificati per lo standard e i dati ottenuti ha mostrato le seguenti variazioni: Al  $\pm$  3.8%; Fe  $\pm$  3.0%; Mn  $\pm$  2.7%; Mg  $\pm$  1.2%; Pb  $\pm$  4.8%; Zn  $\pm$  6.5%; Co  $\pm$  6.0%.

Le elaborazioni statistiche sono state effettuate con il programma SPSS. E' stata utilizzata la "Cluster Analysis" e l'analisi Fattoriale con la "Varimax Rotation".

## Analisi dei dati e discussione

### *Caratteristiche tessiturali*

I valori dei parametri di Folk e Ward (1957) in generale indicano sedimenti a granulometria compresa tra i granuli e le sabbie medie ( $-1.70$  e  $+1.98 \Phi$ ), da ben selezionati a molto mal selezionati ( $0.19 < \sigma_1 < 2.56 \Phi$ ), a maggioranza fortemente asimmetrico-negativi ( $0.34 < Sk_1 < -0.57$ ). L'analisi delle curve granulometriche mostra che i sedimenti risultano essere prevalentemente unimodali; in alcune spiagge si riscontra tuttavia una variabilità granulometrica evidenziata dalla presenza di mode o code grossolane da correlare prevalentemente più con gli apporti locali che con la dinamica costiera (moto ondoso e correnti lungo costa) (Fig. 2).

Sulla base delle caratteristiche tessiturali i vari tratti costieri sono definiti da nord a sud come segue: nel Golfo di Orosei si distinguono due tipologie: a) spiagge con sabbie medio-grosse, quasi sempre unimodali ( $0.25 < M_z < 1.57 \Phi$ ), da molto bene a moderatamente selezionate ( $0.19 < \sigma_1 < 0.85 \Phi$ ) con curve granulometriche tendenti ad essere fortemente asimmetriche negative per la presenza di code di granuli ( $0.04 < Sk_1 < -0.35$ ), a nord (Fig. 2a, camp.GO1, GO7); b) spiagge ciottolose costituite da sedimenti polimodali il cui diametro medio è compreso tra  $-1.70$  e  $+1.72 \Phi$  (granuli e sabbie medie) e curve granulometriche tendenti al fortemente asimmetrico negativo ( $0.16 < Sk_1 < -0.57$ ) a sud (Fig. 2 a, camp.GO8, GO10).

Nella spiaggia del Quirra i sedimenti sono costituiti da granuli, sabbie molto grosse e grosse ( $-1.02 < M_z < 0.07 \Phi$ ) prevalentemente unimodali, con un grado di selezione moderato ( $0.58 < \sigma_1 < 1.01 \Phi$ ) e curve granulometriche tendenti al fortemente asimmetrico positivo ( $0.32 < Sk_1 < -0.05$ ) (Fig. 2b).

Nella spiaggia di Porto Corallo i sedimenti sono costituiti da sabbie medio grosse ( $0.63 < M_z < 1.57 \Phi$ ) la maggior parte unimodali, da molto ben a moderatamente selezionate ( $0.31 < \sigma_1 < 1.08 \Phi$ ), con curve granulometriche tendenti al fortemente asimmetrico positivo e negativo ( $0.27 < Sk_1 < -0.34$ ) (Fig. 2c).

Nella spiaggia alla foce del Flumendosa i sedimenti sono caratterizzati da sabbie medio grosse ( $0.05 < M_z < 1.07 \Phi$ ), unimodali, da ben a molto ben classate ( $0.19 < \sigma_1 < 0.55 \Phi$ ) con curve granulometriche prevalentemente asimmetrico negative ( $0.17 < Sk_1 < -0.26$ ) (Fig. 2d).

Nella spiaggia alla foce del Picocca i sedimenti sono costituiti da sabbie medie ( $1.08 < M_z < 1.98 \Phi$ ) unimodali, molto ben classate ( $0.31 < \sigma_1 < 0.35 \Phi$ ) con curve quasi simmetriche ( $0.10 < Sk_1 < -0.17$ ) (Fig. 2e).

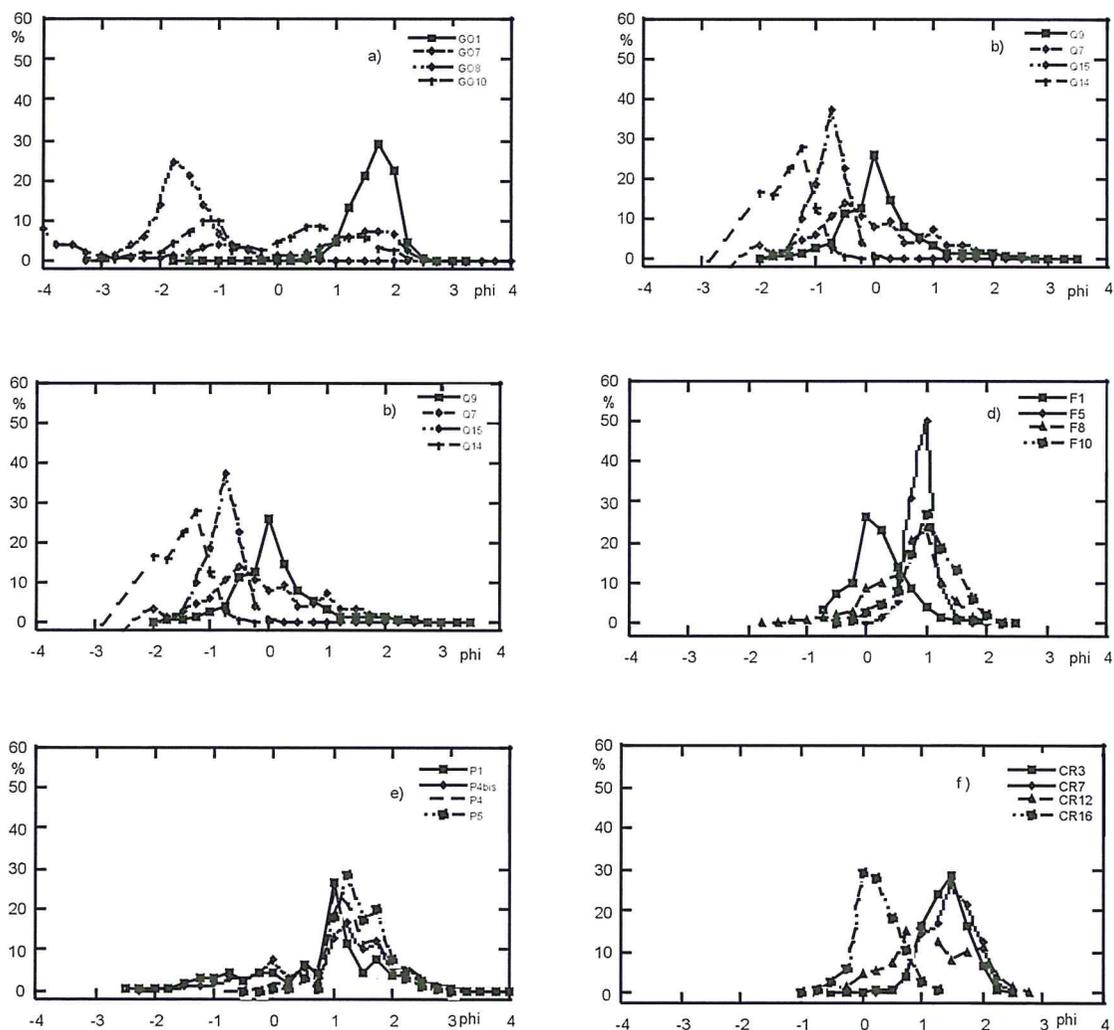


Figura 2 - Curve granulometriche dei vari tipi di di sedimenti nelle singole spiagge: a) Golfo di Orosei, b) Quirra, c) Porto Corallo, d) Flumendosa, e) Rio Piccocca, f) Costa Rei.

Nella spiaggia di Costa Rei i sedimenti sono costituiti da sabbie medio grosse ( $-1.37 < Mz < 1.93 \Phi$ ) la maggior parte unimodali, da molto ben a moderatamente ben classate ( $0.25 < \sigma_1 < 0.68 \Phi$ ) con curve granulometriche prevalentemente simmetriche ( $0.21 < Sk_1 < 0.26$ ) (Fig. 2 f).

Sulla base di questi valori granulometrici, i sedimenti da nord verso sud si possono dividere in quattro classi: ghiaie, sabbie molto grosse, sabbie grosse e sabbie medie. Tali classi sono riconducibili ad una differente alterazione, prevalentemente fisica, delle rocce madri di provenienza. Dove sono presenti litologie metamorfiche e carbonatiche, i sedimenti sono costituiti da ghiaie (Golfo di Orosei a sud e Quirra), sabbie molto grosse e grosse (Quirra, Porto Corallo, Flumendosa, Picocca). Le litologie granitiche alimentano con sabbie medie e grosse le spiagge del Golfo di Orosei a nord (dove sono presenti anche componenti locali vulcaniche), di Picocca e di Costa Rei.

### Composizione mineralogica

Le fasi mineralogiche principali presenti sono: quarzo, calcite, feldspati di sodio e potassio, mica, e clorite (intendendo con il termine mica oltre alle miche propriamente dette anche l'illite). Il quarzo è sempre presente in quantità rilevanti, mentre le altre fasi variano in funzione delle litologie interessate. I sedimenti studiati sulla base della composizione mineralogica possono essere suddivisi in 4 gruppi.

I campioni provenienti dalla parte meridionale del Golfo di Orosei costituiscono il primo gruppo, in cui il carbonato di calcio è la fase prevalente e quasi unica (GO9), solo in alcuni di essi sono state individuate tracce di aragonite e dolomite. Negli ultimi termini della serie (GO14), pur essendo sempre la calcite la fase prevalente, la componente quarzosa e feldspatica è presente in piccole quantità.

I campioni prelevati nella parte settentrionale del Golfo sono ascrivibili ad un secondo gruppo. In questi (GO2, GO4), la componente carbonatica è quasi assente ed i campioni sono costituiti principalmente da feldspati, quarzo, mica e piccole quantità di clorite. Caratteristiche simili, a parte la totale assenza della componente carbonatica

e tenori inferiori in feldspati, presentano i campioni della spiaggia di Quirra (Q11).

Il terzo gruppo, in cui i fillosilicati, costituiti da mica (principalmente muscovite) e clorite, sono particolarmente abbondanti, comprende i campioni di Porto Corallo, quelli della spiaggia del Flumendosa e quelli del Picocca (PC14, F5, P5).

Nell'ultimo gruppo, rappresentato da campioni appartenenti alla zona di Costa Rei (CR16), la componente feldspatica è rilevante rispetto alle altre fasi mineralogiche; la mica è scarsamente rappresentata mentre la clorite è pressochè assente.

In Figura 3 sono riportati i diffrattogrammi più significativi dei gruppi individuati; per valutare i valori relativi delle fasi mineralogiche principali si sono prese come riferimento le intensità dei riflessi che le contraddistinguono, nell'intervallo angolare compreso tra 5 e 30° 2θ.

Per la calcite (CA) si è preso come riferimento il picco a 3.03 Å (29.48° 2θ), per la clorite (CL) quello a 7.03 Å (12.59° 2θ), per la mica (M) il picco a 10 Å (8.85° 2θ), per il quarzo (Q) il riflesso a 4.26 Å (20.85° 2θ), per il K-feldspato (KF) e per il plagioclasio NaF rispettivamente riflessi a 3.24 e 3.19 Å (27.53° e 27.97° 2θ).

### Caratteristiche geochemiche

Lo studio delle diverse litologie è stato considerato un elemento importante da cui partire per stabilire eventuali apporti antropici che possano influenzare gli ambienti studiati.

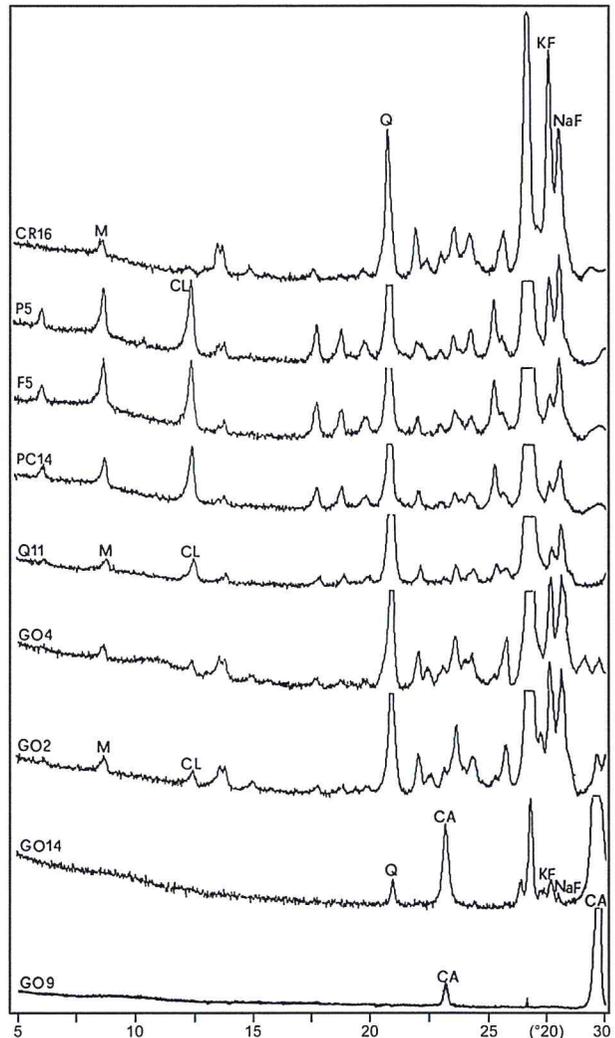


Figura 3 - Sequenza dei diffrattogrammi dei campioni più rappresentativi delle singole spiagge.

Tabella 1 - Concentrazioni e medie delle specie chimiche nei sedimenti delle spiagge in studio.

Campione	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	TiO <sub>2</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	CaO %	MnO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %
a) Golfo di Orosei: parte nord (GO1-GO8), parte sud (GO9-GO15)									
GO1	62.0	8.2	0.08	0.60	0.89	12.9	0.02	2.4	3.03
GO2	75.0	10.9	0.07	0.61	0.46	3.2	0.01	2.6	4.23
GO3	74.2	10.2	0.07	0.69	0.74	4.1	0.02	2.6	3.68
GO4	72.1	10.7	0.09	0.71	0.63	5.4	0.02	2.5	4.31
GO5	58.7	8.0	0.08	0.63	0.44	15.9	0.02	1.8	3.14
GO6	63.2	8.7	0.07	0.59	0.73	11.6	0.02	2.5	3.44
GO7	29.6	3.5	0.07	0.80	1.19	37.6	0.02	0.9	1.19
GO8	35.2	3.7	0.07	0.86	0.88	34.3	0.02	0.8	1.45
media	58.7	7.98	0.08	0.69	0.75	15.62	0.02	1.99	3.06
valor min.	29.6	3.53	0.07	0.59	0.44	3.15	0.01	0.78	1.19
valor max.	75.0	10.88	0.09	0.86	1.19	37.58	0.02	2.58	4.31
dev. st.	17.4	2.92	0.01	0.10	0.25	13.34	0.00	0.77	1.12
GO9	0.43	0.09	n.r.	0.03	0.41	55.3	0.01	0.13	0.02
GO10	1.67	0.24	n.r.	0.06	0.54	53.4	0.01	1.11	0.10
GO11	0.30	0.07	n.r.	0.02	0.40	55.2	0.01	0.14	0.01
GO12	2.88	0.30	n.r.	0.05	0.82	52.7	0.01	0.72	0.15
GO14	2.84	0.25	n.r.	0.03	0.50	53.7	0.01	0.38	0.11
GO15	0.20	0.05	n.r.	0.02	0.39	55.4	0.01	0.20	0.10
media	1.39	0.17		0.04	0.51	54.29	0.01	0.45	0.08
valor min.	0.20	0.05		0.02	0.39	52.67	0.01	0.13	0.01
valor max.	2.88	0.30		0.06	0.82	55.44	0.01	1.11	0.15
dev. st.	1.26	0.11		0.02	0.16	1.17	0.00	0.39	0.05
b) Quirra e Porto Corallo									
Q7a	74.4	12.2	0.69	0.92	0.04	0.2	0.01	0.5	0.93
Q8a	74.2	13.6	0.70	0.87	0.08	0.2	0.01	0.5	0.92
Q9a	74.5	13.1	0.65	1.12	0.36	0.4	0.02	0.6	0.98
Q11a	73.6	13.3	0.77	1.64	0.55	0.3	0.02	0.7	1.25
Q14a	73.8	13.7	0.75	1.05	0.34	0.2	0.01	0.6	1.00
Q16	75.1	13.2	0.74	1.24	0.39	0.3	0.02	0.6	0.93
PC1	82.3	8.45	0.31	0.30	0.79	0.4	0.04	1.36	1.72
PC2	80.6	9.42	0.40	0.73	0.83	0.4	0.04	1.36	1.91
PC2b	79.5	10.6	0.41	0.56	0.95	0.4	0.04	1.1	2.09
PC3	80.1	9.68	0.39	0.38	0.95	0.5	0.03	1.27	1.95
PC4	80.7	9.32	0.37	0.70	0.83	0.5	0.03	1.37	1.89
PC4B	81.0	9.55	0.34	0.48	0.84	0.3	0.04	1.03	1.83
PC5	79.6	10.09	0.38	0.57	0.95	0.4	0.03	1.36	2.13
PC6	78.7	10.56	0.42	0.51	0.83	0.4	0.04	1.36	2.18
PC6b	71.9	12.46	0.85	1.8	1.65	1.3	0.09	1.01	2.28
PC10	84.7	6.04	0.39	1.39	0.81	0.8	0.03	0.8	1.39
PC11	82.8	6.57	0.43	1.79	0.86	0.8	0.04	0.9	1.56
PC12	81.9	7.28	0.63	2.07	0.96	1.2	0.05	0.9	1.69
PC13	83.0	5.88	0.74	2.05	0.96	1.4	0.05	0.7	1.3
PC14	77.9	7.6	1.14	3.56	1.14	2.11	0.08	0.9	1.52

<b>Campione</b>	<b>SiO2 %</b>	<b>Al2O3 %</b>	<b>TiO2 %</b>	<b>Fe2O3 %</b>	<b>MgO %</b>	<b>CaO%</b>	<b>MnO %</b>	<b>Na2O %</b>	<b>K2O %</b>
PC15	87.9	4.85	0.23	0.79	0.61	0.6	0.03	0.8	1.35
PC16	84.9	5.93	0.42	1.38	0.81	0.8	0.03	0.8	1.44
PC17	82.9	6.52	0.48	1.86	0.89	0.8	0.04	0.9	1.61
media	79.4	13.18	0.55	0.79	0.74	0.53	0.04	0.73	1.00
valor min.	71.9	12.23	0.23	0.30	0.04	0.17	0.01	0.46	0.92
valor max.	87.9	13.65	1.14	1.64	1.65	1.29	0.09	0.92	1.25
dev. st.	4.3	0.51	0.22	0.36	0.35	0.30	0.02	0.16	0.13
c) Flumendosa									
F1	84.8	7.77	0.23	2.58	1.12	0.34	0.03	1.24	1.56
F2	88.5	5.74	0.16	1.84	0.77	0.32	0.03	1.04	1.27
F3	81.3	9.12	0.31	3.59	1.35	0.57	0.05	1.31	1.79
F5	81.8	9.35	0.29	3.15	1.37	0.37	0.05	1.34	1.86
F6	77.2	9.87	0.06	5.67	0.17	1.33	0.07	1.26	1.79
F7	77.9	9.55	0.38	3.98	1.59	0.67	0.06	1.58	1.79
F8	82.2	8.35	0.32	3.37	1.44	0.06	0.05	1.24	1.69
F9	82.2	8.63	0.29	3.18	1.42	0.49	0.05	1.46	1.69
F10	81.9	8.65	0.03	3.26	1.44	0.53	0.05	1.56	1.67
media	82.0	8.56	0.23	3.40	1.19	0.52	0.05	1.34	1.68
valor min.	77.2	5.74	0.03	1.84	0.17	0.06	0.03	1.04	1.27
valor max.	88.5	9.87	0.38	5.67	1.59	1.33	0.07	1.58	1.86
dev. st.	3.4	1.24	0.12	1.05	0.45	0.35	0.01	0.17	0.18
d) Picocca e Costa Rei									
P1	81.9	9.17	0.26	2.81	1.29	0.05	0.04	0.15	2.04
P4	81.2	9.54	0.26	2.73	1.34	0.49	0.04	1.73	2.17
P4bis	76.6	12.32	0.37	3.49	1.71	0.55	0.05	1.78	2.64
P5	77.9	11.48	0.31	3.01	0.15	0.56	0.04	2.03	0.03
CR2	83.9	8.6	0.02	0.28	0.16	1.2	0.01	2.2	3.25
CR3	84.4	8.4	0.02	0.27	0.14	1.3	0.01	2.3	3.11
CR4	84.8	8.3	0.02	0.24	0.14	0.9	n.r.	2.2	3.19
CR5	83.8	8.8	0.02	0.27	0.15	1.1	0.01	2.3	3.41
CR6	84.6	8.1	0.02	0.29	0.18	1.6	0.01	2.3	2.81
CR7	84.7	8.0	0.05	0.52	0.21	1.8	0.01	2.1	2.46
CR8	83.5	8.2	0.03	0.36	0.35	2.5	0.01	2.3	0.03
CR9	83.6	8.5	0.02	0.29	0.21	1.7	0.01	2.4	3.08
CR10	80.8	10.1	0.03	0.27	0.22	1.9	0.01	2.7	3.94
CR11	80.7	9.8	0.04	0.53	0.28	2.6	0.01	2.5	3.28
CR12	79.1	10.9	0.04	0.40	0.31	2.3	0.01	2.9	3.72
CR13	78.2	10.3	0.12	0.74	0.48	0.4	0.02	2.8	3.32
CR14	75.8	12.9	0.04	0.45	0.33	2.5	0.01	3.4	4.47
CR16	78.1	12.2	0.04	0.45	0.25	1.6	0.01	3.2	3.79
media	81.3	9.76	0.10	0.97	0.44	1.38	0.02	2.29	2.82
valor min.	75.8	7.99	0.02	0.24	0.14	0.05	0.01	0.15	0.03
valor max.	84.8	12.86	0.37	3.49	1.71	2.62	0.05	3.43	4.47
dev. st.	3.0	1.60	0.12	1.14	0.48	0.79	0.01	0.70	1.18

Tabella 2 - Concentrazioni e medie dei metalli nei sedimenti delle spiagge in studio.

Campione	Rb mg/kg	Sr mg/kg	Ba mg/kg	Co mg/kg	Zn mg/kg	Pb mg/kg
a) Golfo di Orosei: parte nord (GO1-GO8), parte sud (GO9-GO15)						
GO1	105.4	226	600	n.r.	10.4	12.5
GO2	141.1	126	627	n.r.	11.3	25.4
GO3	130.2	115	580	n.r.	13.8	20.1
GO4	147.7	116	529	n.r.	14.4	21.5
GO5	106.8	104	501	n.r.	13.1	21.3
GO6	116.7	194	550	n.r.	11.8	21.8
GO7	47.3	98	630	n.r.	21.7	8.9
GO8	50.9	160	222	1.3	20.1	7.8
media	105.8	142.3	529.9	1.3	14.6	17.4
valor min.	47.3	97.6	221.6	1.3	10.4	7.8
valor max.	147.7	225.7	629.9	1.3	21.7	25.4
dev. st.	38.1	46.6	132.6		4.1	6.7
GO9	2.2	162	46	n.r.	3.8	16.5
GO10	1.2	307	40	32.2	n.r.	6.1
GO11	1.0	124	38	n.r.	0.7	n.r.
GO12	7.0	571	50	n.r.	4.7	12.0
GO14	2.6	283	40	n.r.	2.4	n.r.
GO15	n.r.	138	25	n.r.	3.9	5.7
media	2.80	264.08	39.76	32.18	3.10	10.08
valor min.	1.00	123.60	25.00	32.18	0.70	5.70
valor max.	7.00	571.10	50.00	32.18	4.70	16.50
dev. st.	2.44	168.76	8.48		1.58	5.16
b) Quirra e Porto Corallo						
Q7a	15.1	48	195	2.1	24.0	11.0
Q8a	15.3	39	255	0.5	24.0	10.0
Q9a	22.6	47	339	n.r.	27.4	11.2
Q11a	32.7	47	319	1.0	37.5	14.9
Q14a	28.5	58	382	3.4	25.5	9.8
Q16	21.6	60	350	n.r.	24.4	9.6
PC1	79.0	70	245	33.0	67.0	24.0
PC2	85.0	71	250	22.0	74.0	22.0
PC2b	89.0	69	261	112.0	86.0	26.0
PC3	85.0	71	254	80.0	81.0	23.0
PC4	82.0	69	250	38.0	76.0	24.0
PC4B	84.0	66	247	61.0	80.0	24.0
PC5	92.0	71	259	75.0	80.0	26.0
PC6	91.0	74	248	41.0	86.0	27.0
PC6b	86.0	78	251	78.0	119.0	31.0
PC10	66.0	73	250	8.0	64.0	21.0
PC11	70.0	75	253	7.0	65.0	20.0
PC12	74.0	77	246	8.0	74.0	21.0
PC13	59.0	76	250	9.0	68.0	24.0
PC14	75.0	85	251	10.0	86.0	26.0

<b>Campione</b>	<b>Rb mg/kg</b>	<b>Sr mg/kg</b>	<b>Ba mg/kg</b>	<b>Co mg/kg</b>	<b>Zn mg/kg</b>	<b>Pb mg/kg</b>
PC15	65.0	68	245	5.0	49.0	15.0
PC16	66.0	71	252	7.0	70.0	20.0
PC17	69.0	74	250	6.0	69.0	22.0
media	63.2	66.9	265.3	28.9	63.3	20.1
valor min.	15.1	39.4	194.5	0.5	24.0	9.6
valor max.	92.0	85.0	381.8	112.0	119.0	31.0
dev. st.	26.3	11.6	41.6	33.2	25.4	6.3
c) Flumendosa						
F1	225.0	470.0	328.0	23.2	77.7	33.2
F2	235.0	300.0	350.0	n.r.	44.9	26.3
F3	16.3	67.1	675.2	6.1	50.0	30.0
F5	22.5	57.6	356.7	7.0	69.6	33.5
F6	24.1	77.3	352.3	12.4	140.0	57.0
F7	40.0	70.0	420.0	n.r.	85.2	46.0
F8	42.5	70.0	390.0	n.r.	50.0	31.3
F9	39.4	69.3	330.0	8.0	60.7	28.0
F10	39.8	60.0	350.0	n.r.	70.5	30.5
media	76.1	137.9	394.7	11.3	72.1	35.1
valor min.	16.3	57.6	328.0	6.1	44.9	26.3
valor max.	235.0	470.0	675.2	23.2	140.0	57.0
dev. st.	87.8	146.5	109.1	7.0	28.9	10.0
d) Picocca e Costa Rei						
P1	40.0	90.0	390.0	220.0	51.0	31.0
P4	40.0	90.0	410.0	250.0	49.8	36.0
P4bis	40.0	75.0	395.0	150.0	60.0	37.2
P5	45.0	80.0	392.0	195.0	55.2	37.4
CR2	45.0	120	460	249.0	5.0	8.2
CR3	50.0	116	524	253.0	7.0	7.0
CR4	50.0	121	540	287.0	3.0	4.0
CR5	90.0	106	717	285.0	4.0	5.0
CR6	60.0	120	610	279.0	10.0	5.0
CR7	50.0	130	550	283.0	8.0	5.0
CR8	45.0	164	469	270.0	7.0	6.0
CR9	78.0	120	722	272.0	3.0	7.0
CR10	70.0	128	655	256.0	3.0	3.0
CR11	60.0	150	540	163.0	4.0	13.0
CR12	60.0	200	560	210.0	4.0	8.0
CR13	50.0	205	579	195.0	7.0	9.0
CR14	90.0	177	1369	87.0	3.0	5.0
CR16	90.0	180	800	163.0	4.0	13.0
media	58.5	131.8	593.4	225.9	16.0	13.3
valor min.	40.0	75.0	390.0	87.0	3.0	3.0
valor max.	90.0	205.5	1368.8	287.0	60.0	37.4
dev. st.	17.8	39.6	227.7	57.0	21.1	12.5

	Graniti	Carbonati	Basalti	Scisti
SiO <sub>2</sub> %	78.5	1.39	55.7	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	12	0.17	16.5	8.2
TiO <sub>2</sub> %	n.r.		1.62	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	0.48	0.04	2.8	0.67
MgO %	0.35	0.51	2.05	
CaO %	0.81	54.29	4.5	
MnO %	0.01	0.01	0.17	0.11
Na <sub>2</sub> O %	3.5	0.45	4.1	
K <sub>2</sub> O %	3.5	0.08	3.02	
Sr mg/kg	102	264.08	450	
Ba mg/kg	725	39.76	850	
Co mg/kg	0.95	32.18	n.d.	19
Zn mg/kg	30	3.10	115	95
Pb mg/kg	25	10.08	15	20

**Tabella 3 - Valori medi di confronto per alcune specie chimiche: 1) in sedimenti sardi da graniti (Cristini et al,2002) e rocce carbonatiche (questo lavoro); 2) in rocce basaltiche sarde (Cinus, 1996) e rocce scistose (Wedepohl, 1978)**

Le Tabelle 1 e 2 mostrano i tenori degli elementi maggiori, dei metalli pesanti e in tracce nelle varie spiagge. Dalla sequenza dei valori del Si e Al è evidente che, a sud del Golfo di Orosei, le caratteristiche di base delle spiagge sono simili, ma le litologie di provenienza delle diverse spiagge differenziano gli andamenti dei valori di Rb, Ba, Sr (Fig. 4): infatti passando da un ambiente ad alimentazione prevalentemente metamorfica (spiaggia del Quirra; Fig.4b) ad uno granitico (Costa Rei; Tab. 2) i valori di Ba e Sr tendono ad aumentare. La concentrazione del Ba raggiunge i valori massimi (mediamente 600 mg/kg) nelle spiagge a dominante alimentazione granitica (Tab. 2) e valori minimi nei sedimenti carbonatici (mediamente 40 mg/kg) (Fig. 4a); il Rb presenta concentrazioni simili nelle sabbie provenienti dalle litologie granitiche e metamorfiche mentre è assente in quelle di origine francamente carbonatica. Dalla Tabella 1 si osserva che nel golfo di Orosei, a litologia prevalentemente carbonatica, il tenore in calcio nei sedimenti aumenta da nord a sud; le alte concentrazioni di Ba (fino a 630 mg/kg) e Fe (fino a 0.86 %), riscontrate nella parte settentrionale derivano dalle locali litologie magmatiche e diminuiscono con l'aumentare del Ca e dello Sr.

Nella costa orientale sono presenti mineralizzazioni a solfuri, principalmente di Fe, Pb, Zn e Co (Marcello et al., 1978). La Figura 5 mostra l'andamento, lungo la costa, di Fe, Zn, Pb, contenuti nei sedimenti distribuiti sulle spiagge dai corsi d'acqua alimentatori. Nei sedimenti alluvionali di riferimento, provenienti dai fiumi Quirra e Cor'e' Pruna (Tab. 4), questi tre metalli sono presenti con tenori in genere elevati, perché sono correlati con le granulometrie medio-fini (Carboni et al., 1987) caratterizzanti tali ambienti di sedimentazione, mentre hanno tenori più bassi nei sedimenti di spiaggia. La loro natura chimica li porta ad essere adsorbiti dai fillosilicati (mica e clorite), provenienti dall'alterazione del basamento metamorfico nel Quirra, e di quello granitico nel Cor'e' Pruna, che compongono quelle granulometrie. Come già osservato da Temple e Cave (1992) i metalli pesanti in generale mostrano una correlazione positiva con la clorite. Lo Zn inoltre può far parte del reticolo strutturale della clorite sia in coordinazione tetraedrica che ottaedrica (Bailey, 1988).

Lo Zn, come noto, è più mobile del Pb, infatti nei sedimenti silicoclastici sardi; sono stati riscontrati tenori di Zn più alti di quelli del Pb (Cristini et al., 1983). Tuttavia si osserva una relazione inversa nella parte meridionale del Golfo di Orosei (Fig. 5d) (da GO9 a GO15), e in quella della spiaggia di Costa Rei dove il Pb è legato ad apporti carbonatici rispettivamente litologici e bioclastici (Ferrara et al., 1997; Cristini et al., 1992). La Figura 5a mostra inoltre come le concentrazioni maggiori di questi metalli si trovino nei sedimenti della parte settentrionale del golfo, alimentata da tutte la litologie, mentre nei sedimenti completamente carbonatici le concentrazioni sono molto basse perché presenti solo nel residuo insolubile delle rocce di provenienza.

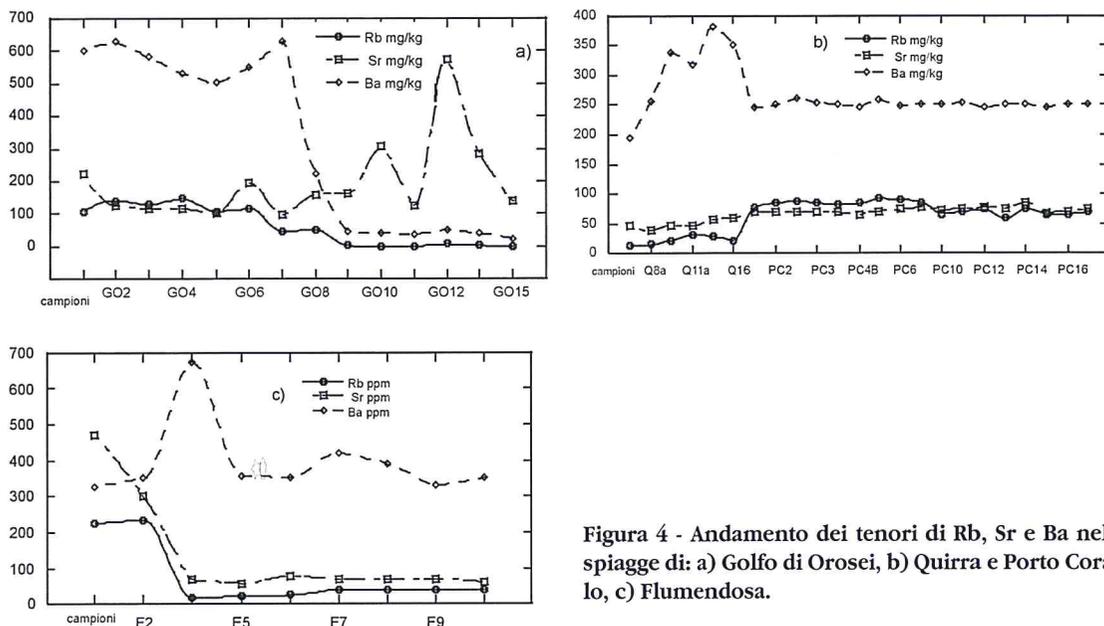
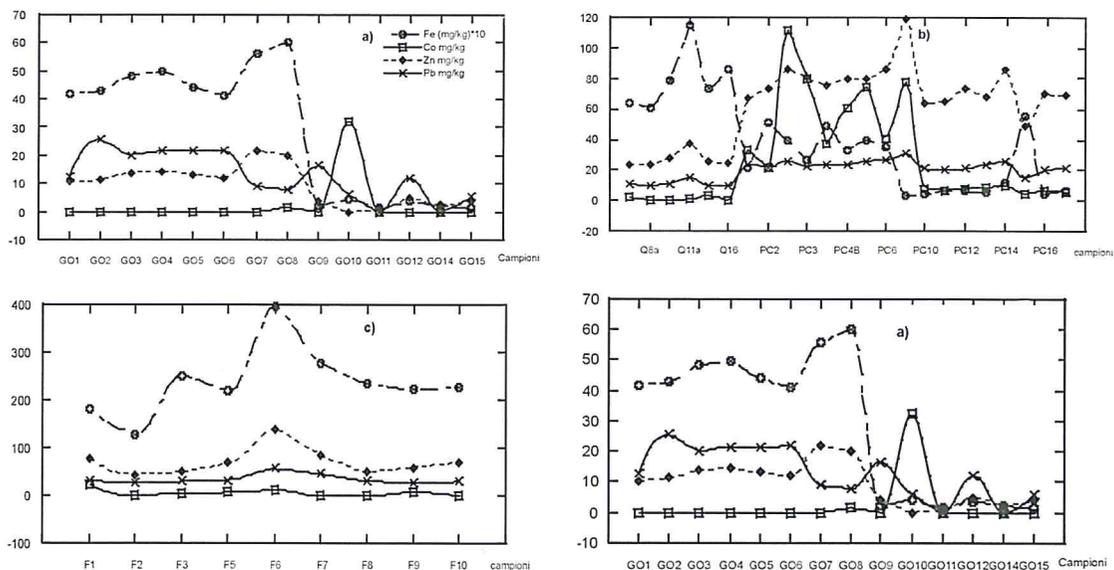


Figura 4 - Andamento dei tenori di Rb, Sr e Ba nelle spiagge di: a) Golfo di Orosei, b) Quirra e Porto Corallo, c) Flumendosa.

Tabella 4 - Confronto tra i tenori medi di alcuni metalli riscontrati nei sedimenti del presente lavoro con quelli osservati in diversi sistemi costieri e fluviali e i rispettivi valori del diametro medio (Mz).

Località costiere	Fe	Co	Zn	Pb	Mz
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	phi
1 Golfo di Thermaikos (mare Egeo)	35000	16.22	290	165	8
2 Baia di Cadiz (SW Spagna)	31733		217	57	
3 Delta del Nilo	55000	78	79		4
4 Laguna di Venezia	15000	8	350	20	3-4
5 Delta del fiume Po (Italia)		14	189	59	7
6 Baia di Cardigan (Wales-Gran Bretagna)			49	19	2
7 Piscinas, Sardegna W (Mare Mediterraneo)	10821	3.6	1707	444	1
8 Golfo di Oristano, Sardegna W	4300	0.93	226	32	3
9 Rio Sitzzerri, Golfo di Oristano a sud	6500	1.62	18	26	4
10 Buggerru, Sardegna SW (Mare Mediterraneo)	6134	0.91	36264	1468	1
11 Rio Bega, Buggerru	4000	0.63	5368	10	2
12 Rio Quirra, Sardegna sud orientale	4965	65	154	83	0.48
13 Rio Corr'e Pruna, Sardegna sud orientale	6295	49	30	n.r.	0.02
14 Questo lavoro (costa orientale sarda)	8462	94	36	19	1

1 - sedimenti-zona industriale: Voutsinou e Varnavas (1995). 2 - sedimenti costieri: Establier et al. (1985). 3 - sabbie costiere deltidie: Janusz Dominik et al.(1993). 4 - sabbie costiere lagunari: Angela et al. (1980). 5 - fanghi lagunari: Frascari et al.(1984). 6 - sabbie costiere: Jones (1973). 7 - sabbie costiere in zona mineraria: Caredda et al.(1999). 8 - sabbie costiere in zona peschiera: Pilia (1999). 9 - proveniente da zone minerarie: Pilia (1999). 10- sabbie costiere in zona mineraria: Loi (2000). 11 - alveo in zona mineraria: Loi (2000). 12 - sedimenti di fiume: Carboni et al.( 1987). 13 - sedimenti di fiume: Cristini et al.(1981). 14 - sabbie costiere.

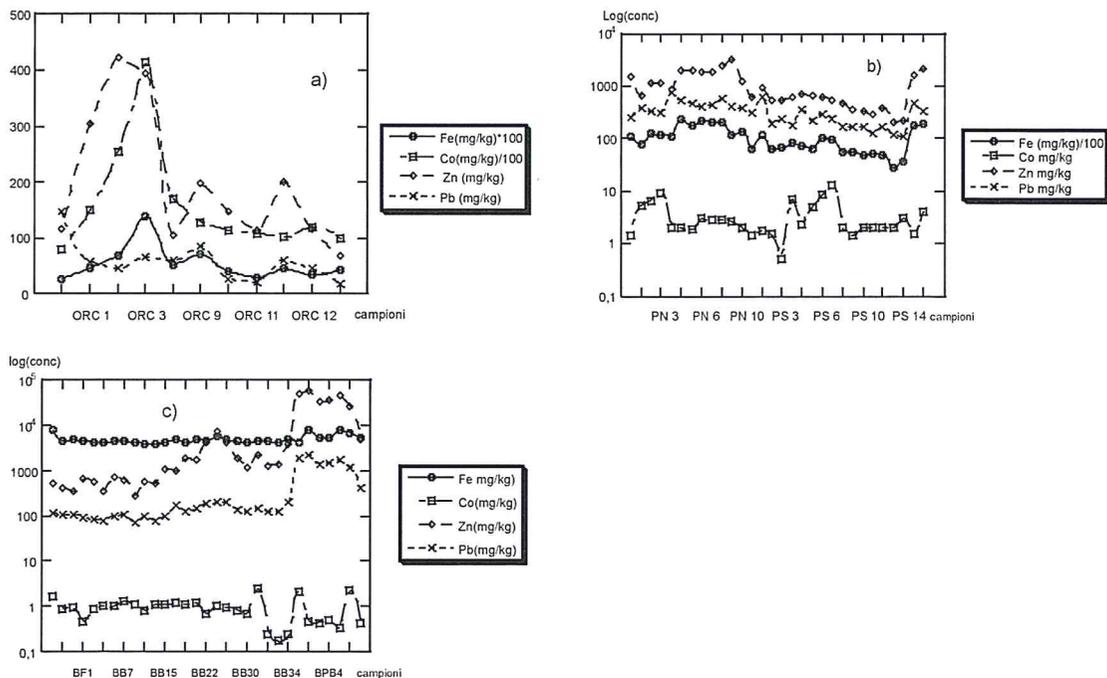


**Figura 5 - Andamento dei tenori di Fe, Co, Zn e Pb nelle spiagge di: a) Golfo di Orosei, b) Quirra e Porto Corallo, c) Flumendosa, d) Picocca e Costa Rei.**

Queste spiagge della costa orientale, pur essendo adiacenti a svariati insediamenti urbani ed agricoli hanno tenori di metalli che risentono, come già indicato, solo dei contributi delle mineralizzazioni e i sedimenti non presentano per Zn e Pb valori superiori ai “backgrounds” mediamente riscontrati in Sardegna (Tab. 3) (Zn 100 mg/kg circa, Pb 50 mg/kg circa, Cristini et al., 1981; Cristini and Ferrara, 1981; Cristini et al., 1983; Cristini et al., 1989). Per Fe e Co si osservano tenori superiori alle medie sarde, rispettivamente 8462 mg/kg e 94 mg/kg (Cristini et al., 2002). In particolare dalla Figura 5, si nota come l'andamento del Fe segua quello di Zn e Pb; in effetti, la matrice di correlazione indica che questi tre metalli sono correlati tra loro (coefficienti di correlazione: Fe-Zn 0.687; Pb-Fe 0.738; Pb-Zn 0.799). Le zone mineralizzate da cui essi provengono sono presenti nei rilievi adiacenti alle spiagge tra Quirra e la foce del Rio Picocca, mentre non si trovano mineralizzazioni di Fe, Zn e Pb nei rilievi granitici da cui provengono i sedimenti della spiaggia di Costa Rei. In questa ultima, a nord (Capo Ferrato), si osservano elevate concentrazioni di Co (un massimo di 287 mg/kg) provenienti da una mineralizzazione a solfuri in matrice vulcanica (CR2, CR3) che passa proprio sotto la spiaggia e termina a poche centinaia di metri sul fondale; il Co non mostra alcuna correlazione con Fe, Zn e Pb. Il Co, presente prevalentemente nei sedimenti a componente metamorfica, se pur con bassi valori (mediamente 5 mg/kg), è indipendente dalla tessitura e viene trasportato dalla componente fillosilicatica in cui è adsorbito.

Questi tenori sono stati messi a confronto con quelli di sedimenti provenienti dalla costa occidentale sarda (tratto costiero meridionale del Golfo di Oristano, spiagge di Piscinas e di Buggerru). I sedimenti del tratto costiero tra Piscinas e Buggerru provengono prevalentemente dal basamento paleozoico metamorfico e sono costituiti da sabbie grosse e medio grosse (Careda et al., 1999; Loi, 2000), mentre quelli del Golfo di Oristano provengono, oltre che dal basamento paleozoico, anche dalle coperture terziarie e sono costituiti da sabbie fini (Pilia, 1999). Nella Figura 6 sono riportati graficamente i tenori di Zn, Pb, Fe e Co delle spiagge indicate. Si può notare come i valori di Zn e Pb siano di diversi ordini di grandezza superiori a quelli riscontrati nei sedimenti della costa orientale, soprattutto per gli apporti dalle discariche delle miniere presenti nella costa. Queste miniere, che estraevano prevalentemente solfuri di Zn e Pb, da circa un ventennio sono dismesse. I valori di Fe e Co, riscontrati nei sedimenti

di entrambi le coste, sono invece confrontabili perché rispecchiano l'analogia tra le litologie di provenienza dei sedimenti. Un ulteriore confronto, effettuato con i dati di spiagge influenzati da altri apporti antropici, ha mostrato che i tenori di metalli, da noi riscontrati in questo lavoro, sono generalmente più bassi rispetto a quelli elencati nella Tabella 4 in quanto riflettono prevalentemente il contributo delle litologie di provenienza. Inoltre dal confronto delle granulometrie attraverso i valori del diametro medio, si osserva una correlazione positiva tra i valori in  $\Phi$  del diametro medio e i tenori dei metalli pesanti, in particolare nelle spiagge indicate in Tabella 4 con i numeri da 1 a 5.



**Figura 6 - Andamento dei tenori di Fe, Co, Zn e Pb nelle spiagge della costa occidentale: a) Oristano, b) Piscinas, c) Buggerru. La scala logaritmica è stata applicata per evidenziare le differenze tra i quattro metalli.**

Nella correlazione fra la composizione mineralogica dei campioni e la distribuzione geochemica degli elementi, a parte le ovvie corrispondenze tra le fasi mineralogiche e gli elementi maggiori costituenti le stesse (K e Ba con i K-Feldspati, Na con l'albite, e Fe e Mg con i fillosilicati), viene confermata la relazione esistente tra alcuni metalli (Co, Pb e Zn) con i fillosilicati che, data la loro peculiare struttura, possono ospitarli per adsorbimento, oppure contenerli nel reticolo strutturale (Zn nella clorite).

Allo scopo di evidenziare le relazioni esistenti tra tessitura, componenti mineralogiche e concentrazioni di elementi maggiori, di metalli pesanti e in tracce, si è applicata una procedura di analisi statistica multivariata. Si è scelta l'analisi fattoriale (modo-R) che ha consentito di ridurre la dimensionalità dei dati e sottolineare le relazioni osservate nel loro insieme (Davis 1986; Rock 1988; Swan e Sandilands, 1995). La distribuzione delle variabili è stata analizzata con test non parametrici e i dati sono stati "rankizzati" allo scopo di ottenere unità comparabili per le variabili e per identificare gli "outliers" (Machek e Testa, 1991; Swan e Sandilands, 1995; Lebart e al., 1984; Korhonen e Siljamaki, 1998).

Dalla Figura 7 si osserva che due sono i fattori estratti: il primo di questi è caratterizzato dall'associazione di otto variabili e spiega il 57% della varianza della matrice iniziale, mostra perciò di avere il peso maggiore all'interno del modello: gli elementi significativi (Mg, Fe, Mn, Ti) sono associati ai minerali fomici presenti nelle rocce. Nel fattore compaiono anche il Ca e lo Sr con il segno negativo che possono suggerire un cambiamento di litologia, ma sembra che il modello non riesca ad evidenziarli chiaramente.

Il secondo fattore spiega il 28% della varianza della matrice iniziale e raggruppa cinque variabili significative: Si, Al, Na, K come elementi maggiori e Rb come elemento in tracce; essi sono associati a minerali silicici ed anche in questo ambito il Ca e lo Sr sono in antitesi.

La R-Mode mette in evidenza due fasi mineralogiche silicatiche mentre la matrice carbonatica risulta solo dal diagramma nel quale si pone completamente staccata dalle altre due matrici (Fig. 7).

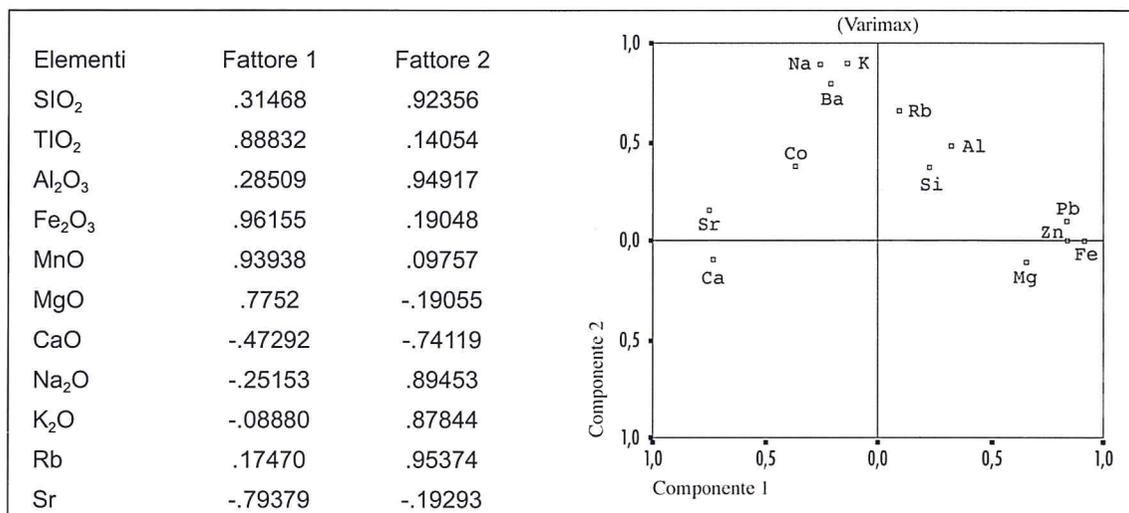


Figura 7 - Distribuzione del fattore 1 e 2 nella R-mode. Nella Tabella a sinistra sono riportati i loro valori.

Sui “factor scores” dei campioni per i due fattori significativi individuati da questa analisi si é poi applicato un procedimento gerarchico di “clustering agglomerativo”, utilizzando così solo la parte più significativa della variabilità di tutto il set dei dati. Dalla classificazione dell’analisi dei “clusters” vengono individuati quattro gruppi di campioni caratterizzati da associazioni geochemiche (fattori) che indicano una provenienza da bacini di alimentazione comuni in buona corrispondenza con la mineralogia caratterizzante i gruppi stessi. Perciò, in accordo con le osservazioni tessiturali e composizionali, quattro sono i principali gruppi di campioni così evidenziati:

- Il primo gruppo, il più numeroso, (61% dei campioni), è suddiviso al suo interno in due sottogruppi. Il primo rappresentato dalle sabbie del Quirra, Flumendosa, Picozza e di Porto Corallo, ha come sua caratteristica una percentuale del primo fattore dell’ analisi fattoriale (Ti, Fe, Mn, Mg, 54% della variabile della matrice iniziale) maggiore dell’83%, mentre per il secondo sottogruppo, che individua i campioni di Porto Corallo e i rimanenti campioni del Flumendosa e del Rio Picozza, si ha una variazione compresa tra il 67% al 72%. Quest’ultimo sottogruppo presenta anche un 22-28% del secondo fattore (K, Na, Si, Al, Rb: 30% di variabilità totale). La mineralogia predominante, come già osservato, é data da fillosilicati e tectosilicati di rocce metamorfiche (filladi e metarenarie). Per quanto riguarda il secondo sottogruppo, questo è costituito da campioni contenenti un tenore di feldspati alcalini tale da giustificare la percentuale del secondo fattore.
- Il secondo gruppo, caratterizzato dal secondo fattore (20% dei campioni), corrisponde alla zona di Costa Rei i cui campioni sono costituiti prevalentemente da feldspati alcalini, con predominanza di quelli potassici.
- Il terzo gruppo (8% dei campioni) individua la zona carbonatica del Golfo di Orosei; la presenza del terzo fattore (Ca, Sr, Mg) spiega il 14% della varianza della matrice iniziale.
- Il quarto gruppo individua la seconda parte dei campioni del Golfo di Orosei nei quali i tre fattori si distribuiscono in maniera quasi paritetica. Questa zona viene da noi indicata come avente una

matrice mista: femico-sialico-carbonatica. La composizione mineralogica dei campioni risulta essere costituita da feldspati, fillosilicati e carbonati.

## Conclusioni

Lo studio effettuato su alcuni sistemi di spiaggia della costa orientale della Sardegna per definirne le caratteristiche geochimiche ambientali, ha mostrato che tra i principali fattori di controllo nell'accumulo dei metalli pesanti presenti nei sedimenti (litologie, corsi di acqua e processi sedimentari innescati dal moto ondoso) il primo ha un ruolo importante. Le litologie (metamorfiche, granitiche, carbonatiche e localmente vulcaniche) controllano l'abbondanza e la distribuzione degli elementi chimici attraverso la granulometria, la loro composizione mineralogica e chimica e la presenza di mineralizzazioni prevalentemente a solfuri. I corsi d'acqua trasportano i metalli pesanti con diverse modalità: (1) inseriti nella struttura dei sedimenti, (2) adsorbiti dal particolato in sospensione, o chelati dalla sostanza organica presente in soluzione, (3) complessati da anioni inorganici ( $S^-$ , HS). In questi litorali, il moto ondoso seleziona i materiali disperdendo le frazioni fini, che vengono allontanate dal sedimento originario. Tali frazioni sono generalmente responsabili di arricchimenti anomali di metalli dovuti ad apporti di svariata natura come evidenziato nella Tabella 4 che mostra l'aumento della concentrazione delle specie chimiche inquinanti nei sistemi caratterizzati da alte percentuali di frazioni fini ( $Mz > 4\Phi$ ). Pertanto nelle spiagge in esame la composizione dei sedimenti è determinata esclusivamente dalla litologia. Nella costa orientale non esistono sorgenti inquinanti, mentre nella costa occidentale sono responsabili di inquinamento le discariche (Piscinas, Buggerru) e l'adsorbimento di metalli pesanti da parte delle frazioni fini (Golfo di Oristano).

## Ringraziamenti

Si ringrazia Marilisa Loi per l'aiuto tecnico.

Lavoro eseguito nell'ambito delle ricerche MURST 60%, e INTERREG 2 (Resp. A. Cristini).

## Bibliografia

- Angela G., Donazzolo R., Merlin Hieke O., Menegazzo Vitturi L., Orio A.A., Pavoni B., Perin G. E Rabitti S. (1980) - *Heavy metal contents in bottom sediments from the Gulf of Venice and comparisons on their nature*. Journ. Etud. Pollutions, \*: 399-406. CIESM Cagliari.
- Atzeni A. e Ginesu S. (1993) - *Evoluzione dei litorali della Sardegna e interventi di riequilibrio*. In: La difesa dei litorali in Italia, A cura di P. Aminti e E. Pranzini, Edizioni delle Autonomie, Roma, pp. 215-231.
- Bailey S. W. (1988) - *Chlorites: structures and crystal chemistry*. In: Hydrous phyllosilicates (ed S.W. Bailey) Reviews in Mineralogy, 19: 347-403.
- Barca S., Di Gregorio F. e Palmerini V. (1981) - *Linea di costa pleistocenica sulla Piana di San Priamo (Sarrabus, Sardegna sud-orientale)*. Boll. Soc. Geol. It., 100:71-74.
- Barca S., Carmignani L., Oggiano G., Pertusati P. C. e Salvadori I. (1996) - *Geological map of Sardinia: Northern and Southern sheets*. Comitato Regionale della Cartografia Geologica e Geotematica della Sardegna; co-ordinator L. Carmignani.
- Carboni S., Cristini A., Di Gregorio F. e Ferrara C. (1987) - *Trasporto solido di un corso d'acqua a carattere torrentizio e caratteristiche dei sedimenti della spiaggia alimentata. Il Rio di Quirra (Sardegna sud-orientale)*. CNR, Gruppo nazionale per la difesa dalle catastrofi idrogeologiche, 129: 103-114.
- Caredda A.M., Cristini A., Ferrara C., Lobina M. F., Baroli M. (1999) - *Distribution of heavy metals in the Piscinas beach sediments (S.W. Sardinia, Italy)*. Environmental Geology, 38: 91-100.
- Carmignani L., Barca S., Pertusati P. C., Carosi R., Di Pisa A., Gattiglio M., Musumeci G. e Oggiano G. (1992) - *Struttura della catena Ercinica in Sardegna*. Gruppo informale di Geologia strutturale Siena.

- Cinus D. (1996) - *Caratteri petrografici e geochimici delle serie eruttive plioceniche dei settori di Macomer (Sardegna centro-occidentale) e Capo Ferrato (Sardegna sud-orientale)*. Università degli Studi di Cagliari; Tesi di laurea.
- Covelli F. e Fontolan G. (1997) - *Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines*. Environmental Geology, 30: 34-45.
- Cristini A., Fais S. e Ferrara C. (1981) - *Sedimentologia e Geochimica della piattaforma continentale della Sardegna centro-orientale*. Rend. SIMP, 37: 73-89.
- Cristini A. e Ferrara C. (1981) - *Indagine geochimica su alcuni sedimenti di un sondaggio ubicato nell'istmo di Sant'Antioco (Sardegna sud-occidentale)*. Miner. Petrogr. Acta, 25: 117-125.
- Cristini A., Ferrara C. e Loy G. (1983) - *Studio sull'adsorbimento dello Zinco in alcuni suoli della Sardegna meridionale*. Atti Ist. Geoped. e Geol. Appl. Università di Sassari, IV: 115-130
- Cristini A., Ferrara C. e Zuddas P.P. (1989) - *Correlazione geochimica dei tenori totali in metalli pesanti nei sedimenti del Rio Quirra e di Porto Corallo, Sardegna orientale*. Atti Conv Intern di Geoingegneria, Torino, 1: 223-232
- Cristini A., Di Gregorio F. e Ferrara C. (1992) - *Sedimentological and geochemical characteristics of beaches on the southeastern coast of Sardinia (Italy) and their dependency on source*. Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata, X: 211-223.
- Cristini A., Loi M., Caredda A. M., Ferrara C., Grosso A. e Pilia M. (2002) - *Valutazione delle caratteristiche ambientali di alcuni sistemi costieri della Sardegna: costa centro-sud occidentale, costa centro sud orientale e costa settentrionale (spiaggia del Liscia e Spargi)*. Una sintesi degli studi geochimico, mineralogico e sedimentologico. Università degli Studi di Cagliari-Interreg, Relazione finale, pp. 283-300.
- Davis J.C. (1986) - *Statistical and data analysis in Geology*. J Wiley & Sons New York.
- Di Gregorio F., Federici P R., Fierro G e Ginesu S. (2000) - *Atlante delle spiagge della Sardegna*. Eds Murst CNR, Regione Autonoma della Sardegna Selca, Firenze.
- Dinelli E., Gabbianelli G. e Tessari U. (2000) - *Caratteri geochimici dei depositi attuali della Sacca di Goro (Delta del Po)*. Studi costieri, 2: 189-198.
- Estabier R., Gomez-Parra A. e Blasco J. (1985) - *Superficial accumulation of heavy metals in near shore marine sediments: an objective index of environmental pollution*. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 35: 348-353.
- Eyre B. e McConchie D. (1993) - *Implications of sedimentological studies for environmental pollution assessment and management: examples from fluvial system in North Queensland and Western Australia*. Sedimentary Geology, 85: 235-252.
- Ferrara C., Cristini A. e Caredda A. M. (1997) - *Sedimentology and geochemistry of beaches sediments along Sardinian eastern coast: the Gulf of Orosei*. Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata, 38: 149-160.
- Folk R. L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar, a study in the significance of grain-size parameters*. Journ. Sed. Petrol., 27: 3-27.
- Frasconi F., Frignani M., Giordani G., Guerzoni S. e Ravaioli M. (1984) - *Sedimentological and geochemical behavior of heavy metals in the area near the Po river delta*. Mem. Soc. Geol. It., 27: 469-481.
- Grosso A. (1999) - *Caratterizzazione geochimica e mineralogica dei sedimenti marini tra Capo San Marco e la foce del Tirso (Golfo di Oristano)*. Università di Cagliari, Tesi di laurea inedita.
- Korhonen P. e Siljamäki A. (1998) - *Ordinal principal component analysis. Theory and application*. Computational Statistics and Data Analysis, 26: 411-424.
- Krumbein W.C. (1934) - *Size frequency distributions of sediments*. Journ. Sed. Petr. 4: 65-77.
- Janusz D. e Stanley D. J. (1993) - *Boron, Beryllium and Sulfur in Holocene sediments and peats of the Nile delta, Egypt: their use as indicators of salinity and climate*. Chem. Geol., 104: 203-216.
- Jones A. S. G. (1973) - *The concentration of copper, lead, zinc and cadmium in shallow marine sediments, Cardigan Bay (Wales)*. Mar. Geol., 14: M1-M9.

- Lebart L., Morineau A. e Warwick K. M. (1984) - *Multivariate descriptive statistical analysis*. John Wiley & Sons, New York.
- Loi M. (2000) - *L'ambiente della costa sud occidentale: il caso di Buggerru*. Università di Cagliari, Tesi di laurea inedita.
- Luther G.W. (1995) - *Trace metal chemistry in porewaters*. In: Metal contaminated aquatic sediments. Allen Ed.pp. 65-80.
- Macdonald R. e W. O'Brien N. C. (1985) - *Extending the use of certified reference sediments for assessment of accuracy in the determination of trace metals*. Anal. Chim. Acta, 177: 81-91.
- Machek P. e Testa B. (1991) - *Corso di geostatistica: statistica avanzata per geologi*. Milano 1991.
- Marcello A., Pretti S. e Salvadori I. (1978) - *Carta Metallogenica della Sardegna*. Servizio Geologico d'Italia.
- Millward C.G. e Klukner P.D. (1989) - *Microwave digestion technique for the extraction of minerals from environmental marine sediments for analysis by inductively coupled plasma, atomic emission spectrometry and atomic absorption spectrometry*. J. Anal. Atomic. Spectrom., 4: 709-713.
- Perdue M.E. (2001) - *Modeling concepts in metal-humic complexation*. In: *Humic substances and chemical contaminants*. Soil Science, Soc. Am. Inc. pp.: 305-316.
- Pilia M. (1999) - *L'ambiente marino del Golfo di Oristano: geochimica e mineralogia dei sedimenti tra lo stagno di S'Ena Arrubia e Capo della Frasca*. Università di Cagliari Tesi di laurea inedita.
- Rock N. M. S. (1988) - *Numerical geology*. Springer-Verlag Heidelberg.
- Sturgeon R. E., Desaulniers S. A. H., e Berman S. S. e Russel D. S. (1982) - *Determination of trace metals in estuarine sediments by graphite-furnace atomic absorption spectrometry*. Anal. Chem. Acta, 134: 283-291.
- Swan A. R. H. e Sandilands M. (1995) - *Introduction to geological data analysis*. Blackwell Science, Oxford.
- Temple J. T. e Cave R. (1992) - *Preliminary report on the geochemistry and mineralogy of the Nod Glas and related sediments (Ordovician) of Wales*. Geol. Mag., 129: 589-594.
- Voutsinou-Taliadouri F. e Soterios Varnavas P. (1995) - *Geochemical and sedimentological patterns in the Thermaikos Gulf, North-west Aegean Sea, formed from a multisource of elements*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 40: 295-320.
- Wedepohl K. H. (1978) - *Handbook of Geochemistry*. Springer-Verlag

**Manoscritto ricevuto il 18/3/2003, accettato il 20/6/2003.**