

## Prospezione idrogeochimica mineraria nell'area di Gadoni-Seulo (Sardegna Centrale): il significato di solfati e fluoruri disciolti

GIOVANNANGELA BERTORINO, RAFAELE CABOI, ANNA MARIA CAREDDA, LUCA FANFANI, MARIA GIUSEPPINA GRADOLI, PAOLA ZUDDAS

Dipartimento di Scienze della Terra, Università, Via Trentino 51, 09100 Cagliari

**RIASSUNTO.** — Studi idrogeochimici condotti nell'area di Gadoni-Seulo su campioni di acque sorgive e superficiali hanno permesso di riconoscere, in soluzione, alcuni possibili indicatori per la prospezione dei depositi a solfuri nelle formazioni paleozoiche prevalentemente silicatiche della Sardegna centrale.

Vengono proposti come indicatori di una certa efficacia i seguenti parametri:  $S_n = 100 \times [SO_4] / [\text{salinità}]$ ,  $\log F_n = \log (10^6 \times [F] / [\text{salinità}])$ ,  $\Delta n = 100 \times ([SO_4] + [HCO_3] - [Cl] + [Na] + [K] - [Ca] - [Mg]) / 2 [\text{salinità}]$ , quest'ultimo termine rappresentando la concentrazione normalizzata dei solfati dipendente dall'ossidazione dei solfuri. L'analisi multifattoriale ha messo in evidenza come tutte queste informazioni possano essere raccolte in un unico fattore che caratterizza l'interazione acqua-roccia mineralizzata.

*Parole chiave:* idrogeochimica, prospezione mineraria, solfati e fluoruri nelle acque, Sardegna centrale.

**ABSTRACT.** — Hydrogeochemical studies in the Gadoni-Seulo area on spring and stream samples lead us to recognize some indicators, in solution, which seem to be efficacious for the prospection of sulphide deposits in prevalently silicatic paleozoic formations of central Sardinia.

We propose as promising guides:  $S_n = 100 \times [SO_4] / [\text{sal.}]$ ,  $\log F_n = \log (10^6 \times [F] / [\text{sal.}])$ , and  $\Delta n = 100 \times ([SO_4] + [HCO_3] - [Cl] + [Na] + [K] - [Ca] - [Mg]) / 2 [\text{sal.}]$ , the last of these representing the normalized concentration of sulphates deriving from sulphide oxidation.

R-mode factor analysis shows how all these indicators can be grouped in only one factor which characterizes the interaction between water and ore-bodies.

*Key words:* hydrogeochemistry, mineral exploration, dissolved sulphates and fluorides, Central Sardinia.

### Introduzione

Modelli di prospezione idrogeochimica a fini minerari sono stati da tempo proposti sul-

la base del comportamento e della distribuzione di alcuni raggruppamenti ionici indicatori di mineralizzazioni utili.

Recentemente studi a larga scala condotti in Sardegna hanno individuato, più che nel tenore in solfato disciolto, in alcuni parametri ad esso relazionati una misura attendibile dell'interazione acqua-giacimenti a solfuri (BERTORINO et al., 1983), mentre tra gli elementi minori si è osservato che il tenore normalizzato in fluoruro disciolto rappresenta un valido indicatore della presenza di concentrazioni utili di fluorite o più in generale di minerali a questa associati come è spesso il caso dei solfuri (BERTORINO et al., 1981).

Il presente studio idrochimico dell'area di Gadoni-Seulo (Sardegna centrale) — al centro della quale è situata la miniera di solfuri di Funtana Raminosa — si ricollega alle precedenti ricerche con lo scopo di precisare in scala più dettagliata le possibilità di impiego di questi indicatori.

### Caratteri morfologici e geologici dell'area

La zona di Gadoni-Seulo, oggetto della presente ricerca, si estende per circa 150 km<sup>2</sup> all'interno del massiccio del Gennargentu (1834 m) che costituisce il gruppo orografico più importante dell'isola. Il rilievo dell'area si presenta quindi piuttosto accidentato raggiungendo le quote massime con il M.te Perdedu (1334 m) in prossimità dell'abitato di Seulo. Nella parte occidentale si erge una piccola catena di montagne che partendo dalla valle del

Rio Sarraxino, nella quale è insediata la miniera di Funtana Raminosa, raggiunge la massima altezza nel M.te Sa Scova (1158 m). La morfologia risulta ancora più movimentata dalla presenza di filoni di porfido ercinico, messi in evidenza dall'erosione differenziale. Caratteristici sono i rilievi carbonatici (detti «Tacchi») costituiti da una copertura tabulare mesozoica che raggiunge le massime dimensioni nell'altopiano del Sarcidano. Si tratta di grandi frammenti, giacenti sopra al basamento paleozoico ripiegato, distaccati per frattura da un originario altopiano calcareo giurese e dislocati secondo una tettonica a scaglie.

Tutta la serie di seguito riportata (Unità di Meana Sardo) è stata descritta da BOSELLINI e OGNIBEN (1986) e da CARMIGNANI et al. (1982). I terreni più antichi affioranti nell'area, ascrivibili all'Ordoviciano, sono rappresentati dalla «Formazione di Manixeddu», comprendente metarenarie e metaconglomerati a componente vulcanica più o meno acida e superiormente dalla «Formazione di Serra Tonnai»; seguono le «Arenarie di Orroledu» metarenarie quarzo litiche di trascurabile potenza, marcanti il passaggio alla sovrastante «Formazione di Bruncu su Pitzu» di età ordoviciana superiore-siluriana (?) (NAUD, 1979). Superiormente si ha la «Formazione calcareo-argilloscistosa» di età siluriana-devoniana, costituita da un'alternanza di argilloscisti più o meno carboniosi e calcari micritici con locali lenti skarnoidi ad anfiboli; epidoti, cloriti, quarzo e talvolta granati. Queste ultime sembrano costituire un orizzonte caratteristico per la loro associazione con le mineralizzazioni a Cu, Fe, Zn e Pb nella zona.

La successione si chiude con il cosiddetto «Postgotlandiano» (Carbonifero inferiore?), una potente serie comprendente metarenarie quarzifere, filladi, filladi quarzifere e quarziti (VAI e COCOZZA, 1974; MINZONI, 1977). Questo complesso più recentemente viene considerato come una unità tettonica (Unità del Gennargentu) sovrastante l'unità di Meana Sardo e costituita da formazioni di età più antiche (BARCA, 1985). Tutta la serie è attraversata da filoni ercinici a struttura porfirica, acidi ed intermedi.

Discordante sul basamento paleozoico si ha la copertura tabulare, oramai fratturata in zolle

(«Tacchi»), del Giurassico medio costituita da conglomerati arenacei e superiormente da dolomie.

In Figura 1 è riportata una carta geologica schematica della zona.

### **Cenni idrologici, climatici e caratteristiche del campionamento**

La zona in studio è attraversata dal Flumendosa che, potendo beneficiare almeno in parte di un certo apporto sorgentizio, può conservare un regime perenne con una portata che nel periodo estivo diventa modesta.

Gli afflussi meteorici sono relativamente abbondanti (tra 700 e 900 mm annui) e in media superiori a quelli relativi all'intera isola.

L'escursione termica annua varia da un minimo di 8° C ad un massimo di 18° C.

Le formazioni dell'area in studio sono da ritenersi prevalentemente impermeabili; una scarsa permeabilità può essere legata a zone fratturate o disturbate tettonicamente o a superfici di discontinuità. Ne consegue che le sorgenti emergenti nei terreni paleozoici, sebbene abbastanza numerose, mostrano portate spesso modeste (circa 0.1 l/s); i gruppi sorgentizi principali si hanno sempre in corrispondenza delle coperture carbonatiche costituenti zone di assorbimento, in cui le acque si infiltrano e riemergono sui fianchi o alla base dei rilievi, al contatto con gli scisti impermeabili.

Sono stati presi in esame 123 campioni d'acqua, dei quali 31 appartenenti ad acque superficiali, 92 ad acque sorgive e 14 prelevati in gallerie minerarie.

La morfologia della zona particolarmente accidentata ed in alcuni punti quasi inaccessibile, ha ostacolato la realizzazione di un campionamento secondo una maglia regolare; inoltre, a causa della complicata situazione geologica, è stato talvolta difficile mettere in relazione l'emergenza della sorgente con il tipo o con i tipi litologici interessati dalla circolazione. I campioni sono stati pertanto raggruppati tenendo conto della situazione geologica all'emergenza ma talvolta anche delle caratteristiche chimiche principali.

### **Studio geochimico delle acque**

Le analisi fisico-chimiche sono state effet-

tuata parte in campagna e parte in laboratorio, secondo le metodiche già descritte da BERTORINO et al. (1979; 1981).

I dati analitici insieme con il numero del campione ed il tipo d'acqua sono riportati in Tabella 1.

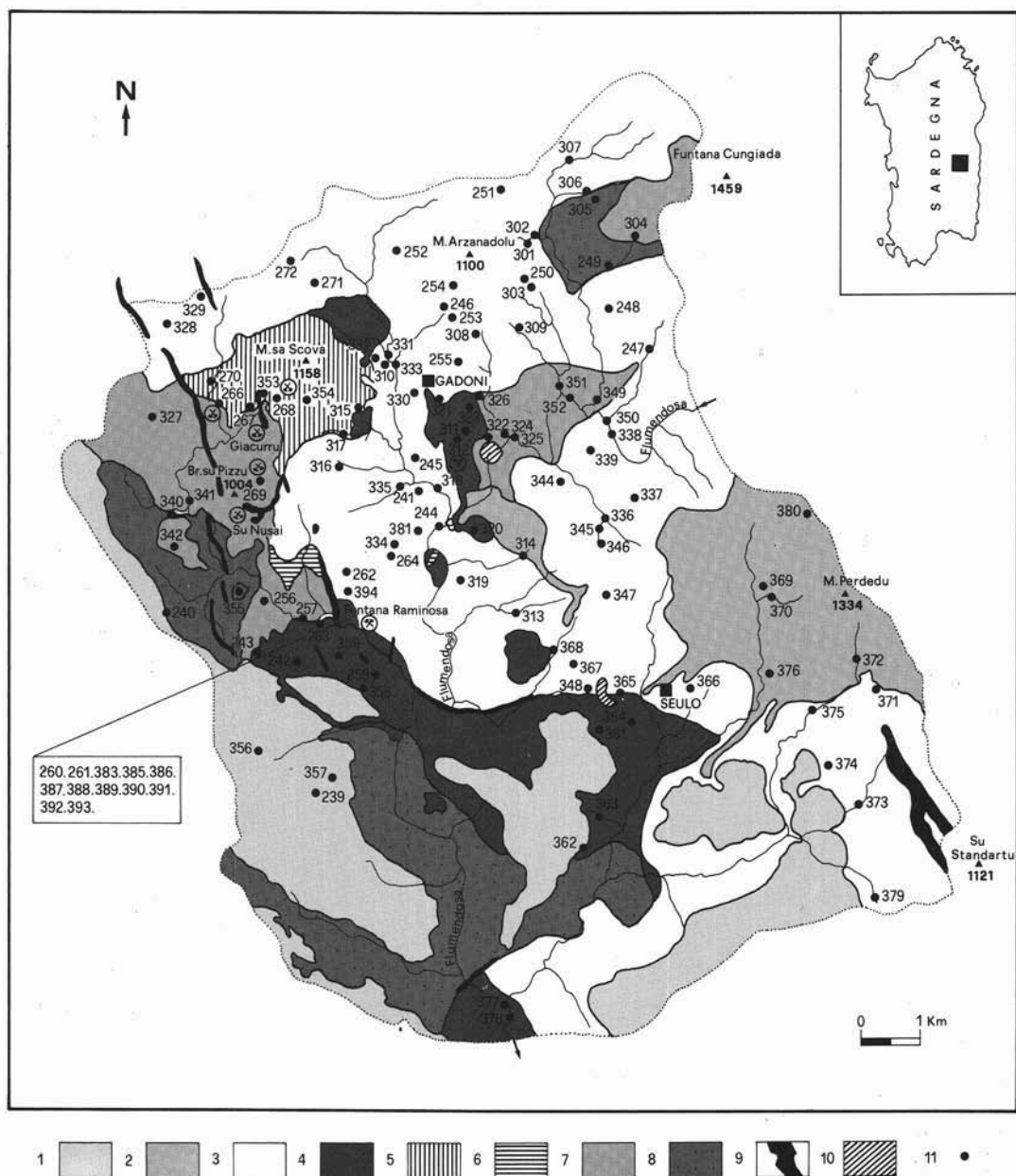


Fig. 1. — Carta geologica schematica della zona di Gadoni e Seulo. — Geological sketch map of the Gadoni and Seulo area: 1) «Tacchi»: dolomie cristalline. GIURASSICO MEDIO; 2) Porfidi, porfiriti, riodaciti, ignimbriti. PERMIANO; 3) «Postgotlandiano». Auct.: filladi, filladi quarzifere, quarziti. CARBONIFERO INF. (?); 4) Serie calcareo-argilloscistosa: calcari silicizzati; 5) Calcari; 6) SILURIANO-DEVONIANO; 7) Formazione di Bruncu su Pitzu: metarenarie, siltiti, argilloscisti. ORDOVICIANO SUP.-SILURIANO (?); 8) Formazione di Serra Tonnai: andesiti anfiboliche, scisti epidotici, cloritoscisti. ORDOVICIANO; 9) Porfidi granitici in filoni; 10) Filoni basici. CICLO MAGMATICO ERCINICO; 11) Punti d'acqua campionati.

TABELLA 1

## Principali parametri fisico-chimici — Main physical-chemical parameters

Camp. n°	temp. °C	salin. mg/l	pH	Ca meq/l	Mg meq/l	Na meq/l	K meq/l	HCO <sub>3</sub> meq/l	SO <sub>4</sub> meq/l	Cl meq/l	F eq/l	SiO <sub>2</sub> M/l
<b>Acque superficiali</b>												
244	21	156	7.9	0.8	0.5	0.6	0.03	1.0	0.6	0.5	8	130
247	18	149	7.5	1.0	0.4	0.6	0.03	1.1	0.3	0.5	3	110
249	18	97	7.5	0.6	0.2	0.5	0.03	0.6	0.3	0.4	2	70
257	19	213	7.6	1.0	0.7	0.8	0.04	1.6	0.6	0.7	15	160
270	20	183	7.2	1.3	0.5	0.6	0.02	1.6	0.2	0.5	4	170
302	13	82	7.6	0.2	0.2	0.6	0.01	0.4	0.2	0.6	3	180
306	14	75	7.6	0.4	0.2	0.4	0.02	0.4	0.1	0.5	2	90
307	16	79	7.8	0.4	0.1	0.5	0.01	0.4	0.2	0.5	2	98
310	16	206	7.9	1.3	0.7	0.7	0.02	1.7	0.3	0.7	6	180
313	13	178	7.5	1.0	0.5	0.8	0.02	1.1	0.6	0.7	7	230
314	14	127	7.6	0.4	0.5	0.8	0.02	0.8	0.2	0.5	7	240
317	17	127	7.8	0.7	0.4	0.5	0.01	0.8	0.2	0.6	10	230
324	16	309	8.4	2.0	1.1	0.9	0.02	2.3	0.9	0.9	8	300
325	21	118	8.3	0.6	0.4	0.5	0.02	0.8	0.3	0.5	9	140
326	15	436	8.1	3.4	1.5	1.0	0.01	3.7	1.1	1.0	13	210
331	16	161	8.0	0.7	0.6	0.8	0.02	1.0	0.4	0.8	8	170
332	15	387	8.3	3.2	1.0	0.6	0.02	4.0	0.3	0.7	13	190
335	13	121	7.1	0.4	0.5	0.7	0.03	0.7	0.3	0.7	7	190
336	13	112	7.6	0.4	0.5	0.7	0.03	0.5	0.4	0.7	4	130
338	20	127	8.2	0.6	0.4	0.5	0.02	0.9	0.3	0.5	13	190
341	19	107	7.2	0.4	0.3	0.7	0.03	0.5	0.3	0.7	37	170
349	17	113	8.0	0.6	0.3	0.6	0.02	0.6	0.3	0.6	5	130
350	19	148	8.0	0.8	0.4	0.8	0.03	0.8	0.4	0.7	7	130
351	15	173	8.0	0.8	0.6	0.9	0.03	1.1	0.4	0.9	5	210
352	22	125	7.9	0.6	0.4	0.5	0.02	0.9	0.2	0.5	12	140
366	16	130	7.3	0.5	0.6	0.8	0.01	0.7	0.4	0.7	4	170
370	16	133	7.9	0.6	0.3	0.8	0.03	0.8	0.2	0.7	5	220
372	18	151	7.9	0.9	0.3	0.5	0.02	1.0	0.4	0.6	5	160
373	16	101	6.9	0.3	0.4	0.6	0.02	0.4	0.3	0.7	3	130
377	16	462	8.5	2.5	2.6	0.9	0.04	4.7	0.7	1.0	5	95
378	17	208	8.5	1.1	1.1	0.6	0.03	1.8	0.4	0.6	16	100
<b>Sorgenti delle formazioni di Serra Tonnai e Brunco su Fittu</b>												
256	13	175	7.5	0.9	0.5	0.8	0.04	1.0	0.5	0.7	18	230
258	17	148	6.5	0.9	0.4	0.7	0.04	0.9	0.3	0.6	12	200
269	13	140	5.7	1.1	0.2	0.5	0.03	1.1	0.1	0.5	60	200
304	11	71	6.2	0.2	0.1	0.5	0.02	0.3	0.1	0.5	2	230
305	9	85	6.4	0.4	0.2	0.5	0.03	0.4	0.2	0.5	3	210
327	13	89	7.0	0.2	0.2	0.6	0.02	0.2	0.1	0.7	7	380
340	12	95	6.3	0.3	0.3	0.7	0.02	0.4	0.2	0.8	12	160
342	12	101	6.3	0.2	0.3	0.7	0.07	0.2	0.4	0.7	60	250
343	11	110	6.2	0.4	0.4	0.6	0.04	0.5	0.4	0.6	5	190
355	13	102	6.3	0.3	0.3	0.6	0.02	0.5	0.3	0.6	12	180
<b>Sorgenti dei porfidi</b>												
320	17	197	8.1	0.8	0.6	1.2	0.03	1.2	0.5	0.9	9	240
376	13	142	7.5	0.7	0.4	0.6	0.03	0.9	0.3	0.6	3	310
380	11	91	5.9	0.3	0.2	0.6	0.02	0.4	0.2	0.6	2	240
<b>Sorgenti della formazione calcareo-argillocistosa</b>												
242	17	303	6.4	1.8	1.1	1.0	0.22	1.8	1.2	1.0	2	320
243	17	177	7.3	0.8	0.4	0.9	0.06	1.1	0.6	0.6	8	260
359	14	625	7.3	4.6	2.9	0.8	0.02	6.8	0.6	0.9	15	90
263	12	377	7.1	3.2	1.0	1.0	0.04	2.2	2.3	0.6	25	160
265	13	150	6.7	0.9	0.4	0.6	0.01	1.1	0.2	0.6	3	250
268	15	93	7.7	0.6	0.2	0.5	0.01	0.6	0.1	0.4	2	170
311	12	530	7.1	5.4	0.4	0.7	0.01	5.5	0.6	0.7	8	170
312	14	275	7.5	2.5	0.5	0.4	0.01	3.0	0.2	0.4	13	250
321	11	368	6.2	3.2	1.5	1.0	0.01	0.2	4.6	1.1	12	180
322	15	597	6.9	5.5	1.3	0.6	0.02	6.0	1.1	0.6	5	250
323	15	681	7.4	4.8	3.5	0.5	<0.01	7.0	1.5	0.6	12	160
354	12	97	6.3	0.5	0.3	0.4	0.02	0.6	0.1	0.5	4	150
359	13	534	7.3	4.7	1.6	0.8	0.02	5.5	0.6	0.9	7	110
361	14	400	8.1	3.4	1.2	0.5	<0.01	4.1	0.6	0.6	8	77
364	13	198	6.4	1.0	0.9	0.9	0.01	0.9	1.0	1.0	6	170
365	15	203	6.9	0.9	0.9	0.9	0.01	1.2	0.6	1.0	3	230
362	11	548	7.2	5.9	—	0.5	—	5.7	0.8	0.8	5	78
394	16	151	7.0	0.6	0.6	0.8	0.05	0.7	0.5	0.8	160	140
<b>Sorgenti dei "Tacchi"</b>												
356	13	663	7.7	4.0	4.0	0.8	0.01	7.6	0.3	1.0	3	45
357	12	696	7.0	4.1	4.3	0.7	0.02	8.1	0.3	0.9	4	100
358	17	582	8.3	3.4	3.7	0.6	0.03	6.6	0.4	0.7	5	81
362	16	616	8.1	3.3	3.8	0.6	0.03	7.2	0.4	0.7	4	58
363	15	576	7.9	3.2	3.9	0.6	0.01	6.6	0.3	0.8	4	70
<b>Sorgenti delle gallerie minerarie</b>												
260	17	270	8.0	1.1	0.3	2.2	0.02	1.7	1.0	0.7	190	250
261	14	487	7.4	2.7	0.9	1.5	0.04	2.3	2.3	0.8	110	150
266	15	167	7.8	1.2	0.4	0.5	0.02	1.2	0.3	0.5	13	290
353	16	249	7.9	1.6	0.9	0.9	0.06	2.2	0.3	0.6	42	230
383	15	546	7.5	5.2	1.3	1.4	0.04	2.3	4.4	0.8	110	170
385	13	283	7.7	2.4	0.7	0.8	0.03	1.8	1.2	0.8	58	150
386	14	558	7.8	3.4	1.2	2.3	0.04	2.3	4.9	0.7	95	280
387	14	885	7.7	8.4	2.3	3.5	0.17	1.5	9.5	1.0	140	240
388	13	892	7.8	7.8	3.0	1.3	0.18	1.6	11.0	0.8	42	120
389	14	524	7.6	3.0	1.5	2.0	0.07	2.1	4.7	0.7	92	290
390	14	230	7.5	1.7	0.6	0.7	0.04	1.2	1.2	0.7	79	170
391	14	249	7.8	1.5	0.6	0.9	0.08	1.6	1.2	0.6	79	190
392	15	228	7.8	1.6	0.5	0.9	0.02	1.1	1.3	0.7	120	170
393	16	297	8.1	1.2	0.4	2.2	0.01	1.4	1.9	0.7	200	220
<b>Sorgenti dei "Postgotlandiano"</b>												
241	13	259	7.1	1.4	0.9	1.3	0.04	1.5	0.8	1.3	4	220
245	15	516	7.6	4.7	0.9	0.7	<0.01	5.3	0.5	0.9	12	290
246	12	138	6.2	0.5	0.4	0.7	0.02	0.6	0.6	0.7	4	180
248	15	206	7.0	1.9	0.3	0.6	0.01	1.7	0.4	0.5	8	130
250	12	140	5.9	1.0	0.3	0.7	0.01	1.0	0.2	0.6	2	170
251	15	112	7.0	0.7	0.3	0.5	0.01	0.7	0.3	0.4	2	130
252	20	113	7.1	0.5	0.3	0.7	0.02	0.6	0.2	0.6	2	190
253	12	183	6.3	1.3	0.4	0.7	0.01	1.5	0.2	0.6	3	200
254	12	117	6.6	0.6	0.3	0.7	0.01	0.7	0.3	0.6	2	100
255	15	105	5.8	0.3	0.4	0.8	0.03	0.3	0.3	0.7	2	240
262	22	205	7.1	1.3	0.7	0.8	0.03	1.5	0.4	0.8	23	190
264	13	104	5.9	0.2	0.4	0.8	0.02	0.4	0.2	0.8	4	170
271	13	170	6.6	1.2	0.4	0.7	0.04	1.3	0.2	0.6	2	180
272	10	134	5.9	0.9	0.5	0.6	0.01	1.0	0.2	0.5	2	150
301	11	90	6.6	0.3	0.3	0.6	0.01	0.4	0.2	0.6	3	170
303	12	96	5.6	0.2	0.3	0.8	0.02	0.4	0.2	0.8	2	170
308	14	92	6.2	0.2	0.3	0.7	0.02	0.4	0.2	0.7	4	200
309	13	130	5.9	0.4	0.5	0.8	0.02	0.7	0.2	0.7	5	290
315	12	393	7.1	3.5	0.5	0.6	0.07	4.1	0.2	0.6	18	270
316	14	94	6.1	0.3	0.4	0.6	0.02	0.5	0.2	0.6	7	180
318	17	425	7.4	3.4	1.0	1.0	0.04	3.8	0.7	1.0	15	330
319	16	128	6.4	0.3	0.4	1.0	0.01	0.5	0.1	0.9	6	360
328	12	70	5.7	0.1	0.2	0.6	0.02	0.2	0.1	0.6	2	170
329	13	96	5.9	0.3	0.3	0.6	0.01	0.4	0.3	0.6	2	140
330	12	238	6.3	1.0	1.3	1.8	0.32	1.1	0.8	1.4	5	130
333	13	153	6.4	0.7	0.6	0.8	0.02	0.9	0.4	0.8	7	170
334	15	105	7.0	0.2	0.4	0.8	0.03	0.4	0.3	0.8	5	170
337	12	123	6.4	0.4	0.4	0.9	0.03	0.6	0.3	0.7	3	250
339	12	112	6.3	0.3	0.4	0.8	0.02	0.4	0.5	0.6	7	240
34												

### *Acque superficiali*

Dei 31 campioni di acque superficiali quattro sono stati prelevati dal Flumendosa e presentano un chimismo abbastanza simile sia per quanto riguarda la salinità che per il rapporto tra i vari anioni e cationi; i restanti campioni corrispondono tutti ad affluenti del Flumendosa.

La salinità è in genere piuttosto bassa, di norma inferiore a 200 mg/l; solo pochissimi campioni presentano una salinità superiore che però non arriva a 500 mg/l. L'aumento di salinità è in questi casi molto probabilmente attribuibile al rilevante apporto delle sorgenti localizzate nelle formazioni calcaree.

Le acque sono classificabili come bicarbonato calciche a bassissima salinità.

### *Acque delle formazioni di Serra Tonnai e Bruncu su Pitzu, del «Postgotlandiano» e acque dei porfidi*

Dato l'esiguo numero dei campioni prelevati nelle formazioni di Serra Tonnai, Bruncu su Pitzu e nei porfidi, ci è sembrato opportuno considerarli insieme a quelli campionati nel «Postgotlandiano» che presentano in generale caratteristiche chimico-fisiche molto simili a quelle delle acque delle formazioni suddette (bassa salinità e composizione bicarbonato alcalino-terrosa prevalente). Questo dato non deve sorprendere quando si consideri che tutte le formazioni su elencate, pur essendo cronologicamente e stratigraficamente ben distinte, presentano in generale una litologia confrontabile che giustifica l'omogeneità del chimismo delle acque in esse circolanti.

### *Acque della formazione calcareo-argilloscistosa*

Le sorgenti campionate nella formazione calcareo-argilloscistosa sono caratterizzate da tenori in salinità abbastanza variabili (da 100 a 700 mg/l circa).

La maturazione di queste acque è distinta da un chimismo bilanciato per i termini meno salini che si evolve ad un marcato carattere bicarbonato calcico per quelli più salini. Si differenzia il campione n. 321 che presenta un tenore in solfati comparativamente molto alto, derivante dall'ossidazione dei solfuri presenti nelle mineralizzazioni osservate nelle immediate vicinanze della sorgente.

### *Acque dei «tacchi»*

Le cinque sorgenti campionate nella copertura giurassica mostrano una sensibile omogeneità fra i parametri fisico-chimici misurati.

La salinità è attorno ai 600-700 mg/l; il rapporto Ca/Mg espresso in equivalenti è prossimo alla unità ed il bicarbonato prevale notevolmente sugli altri anioni come è prevedibile per acque di un serbatoio dolomitico.

### *Acque campionate nelle gallerie minerarie*

Queste acque presentano alcune caratteristiche che le differenziano da quelle precedentemente discusse; il rapporto Na/Cl è quasi sempre superiore alla unità, ed il tenore in solfato è sempre molto elevato, tanto che in diversi campioni questo diventa l'anione prevalente. La salinità arriva fino a 900 mg/l.

### **Classificazione delle acque secondo il chimismo di base**

Per meglio evidenziare la linea evolutiva complessiva delle acque trattate, il loro chimismo è stato riportato nel diagramma di Piper (Fig. 2). In tale diagramma si può osservare come da acque pochissimo saline, a NaCl di origine meteorica, si arrivi con il progredire della maturazione ad acque a bicarbonato di calcio prevalente.

Da questo comportamento, comune a tutte le acque che hanno interagito con le formazioni paleozoiche, si differenziano una decina di campioni caratterizzati da un chimismo a solfati prevalenti. Per la maggior parte questi sono costituiti da acque di galleria ed anche quelli campionati in superficie sono da mettersi in relazione con mineralizzazioni esistenti; è il caso delle sorgenti 321 e 348 situate in prossimità di visibili mineralizzazioni a solfuri, in corrispondenza di saggi minerari che hanno reso più friabile il terreno facilitando l'interazione acqua-roccia.

Una caratteristica comune a tutte le acque è la costanza del cloro disciolto (Fig. 3). Con l'esclusione di rare eccezioni, i valori sono molto bassi e compresi fra 17 e 35 mg/l; il basso tenore e la costanza di esso stanno ad indicare l'origine meteorica di tale anione.

A questo punto, per verificare se la classificazione delle acque operata in base alla litologia dei terreni attraversati corrisponda ad



una differenziazione nel chimismo di base, si sono confrontate le acque utilizzando dei parametri scelti in modo da essere significativi nella situazione idrogeologica dell'area.

Il primo parametro da noi proposto  $A = (100 / \Sigma An.) \cdot (HCO_3 + SO_4 - Cl)$  (in meq./l) è stato scelto per mettere in evidenza il diverso grado di maturazione delle acque. Il tenore in cloro è stato sottratto alla somma degli altri due anioni in quanto, come già detto, è presente in quantità pressochè costante in tutte le acque.

DIFFIO (1981) per evidenziare eventuali circolazioni in serbatoi dolomitico-evaporitici, nel nostro caso è da mettere in relazione con serbatoi essenzialmente dolomitici.

Nella Fig. 4 si può osservare il diagramma che rappresenta i valori medi dei tre parametri per i vari tipi di acque esaminate.

Per quanto riguarda il parametro A esso presenta i valori più alti per le acque dei tacchi, delle gallerie minerarie e della serie calcareo argilloscistosa.

Considerando il secondo parametro, notia-

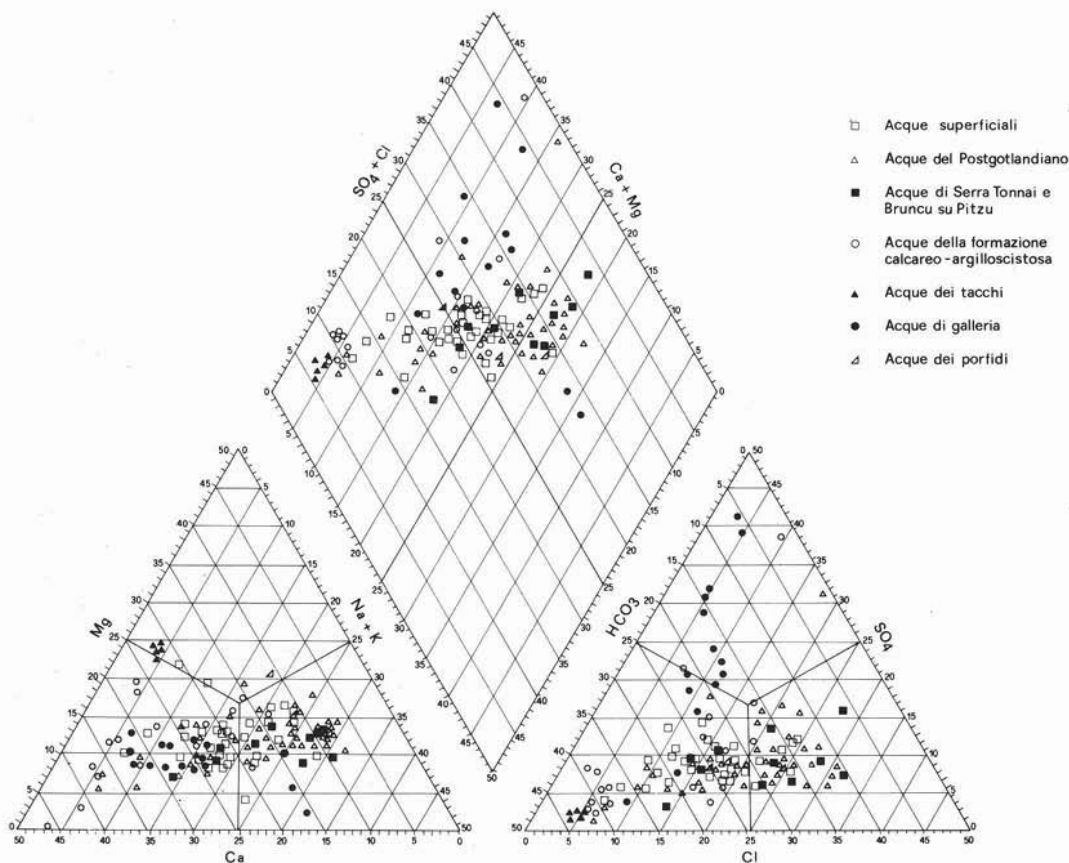


Fig. 2. — Diagrammi triangolari dei cationi e degli anioni e diagramma quadrangolare risultante. — Ternary cationic and anionic diagrams and resulting quadrangular diagram.

Il secondo parametro  $B = (100 / \Sigma An.) \cdot (HCO_3 - SO_4)$  discrimina in modo netto le acque a bicarbonato da quelle a solfato prevalente qualunque sia l'origine di quest'ultimo.

Il terzo parametro  $C = (100 / \Sigma Cat.) (Na - Mg)$  già proposto da D'AMORE e SCAN-

mo una netta divergenza fra le acque dei Tacchi e quelle di galleria, che si trovano agli opposti rispetto ai restanti gruppi di acque che presentano al loro interno valori di B molto vicini.

Il parametro C distingue nettamente, da

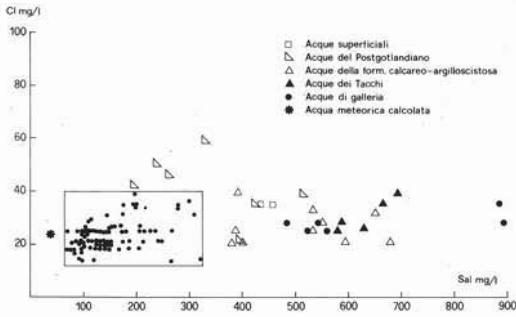


Fig. 3. — Diagramma Cl/salinità. L'area quadrangolare racchiude la maggior parte dei campioni. — Cl/salinity diagram. The sketched quadrangular area includes most of samples.

tutte le altre, le acque dei Tacchi che hanno circolato in terreni dolomitici, per le quali assume un valore negativo.

Osservando tale grafico e i dati analitici delle tabelle si può sintetizzare la classificazione delle acque esaminate in 3 gruppi distinti. Il primo, il più numeroso, raccoglie le acque di Serra Tonnai e Bruncu su Pitzu, dei porfidi, del Postgotlandiano, della formazione calcareo argilloscistosa e le acque superficiali; da acque pochissimo saline, con una progressiva maturazione si passa ad acque che tendono ad assumere un carattere a bicarbonato alcalino terroso prevalente.

Un secondo gruppo comprende le sole acque dei Tacchi il cui chimismo è influenzato dalla composizione dolomitica della formazione attraversata.

Il terzo gruppo comprende le acque di galleria o quelle che comunque hanno interagito con mineralizzazioni: il loro chimismo di base è singolare per quanto riguarda gli alti tenori in solfato ed il rapporto Na/Cl quasi sempre superiore all'unità.

**Contributo meteorico alla salinità delle acque dell'area**

Il contributo meteorico alla salinità è rappresentato in una situazione geografica di insularità, con venti tesi e con basso indice di industrializzazione, dai cloruri ed è in prima approssimazione da mettersi in relazione con la distanza dell'area dal mare nella direzione prevalente dei venti.

Nell'area di Gadoni-Seulo il tenore in clo-

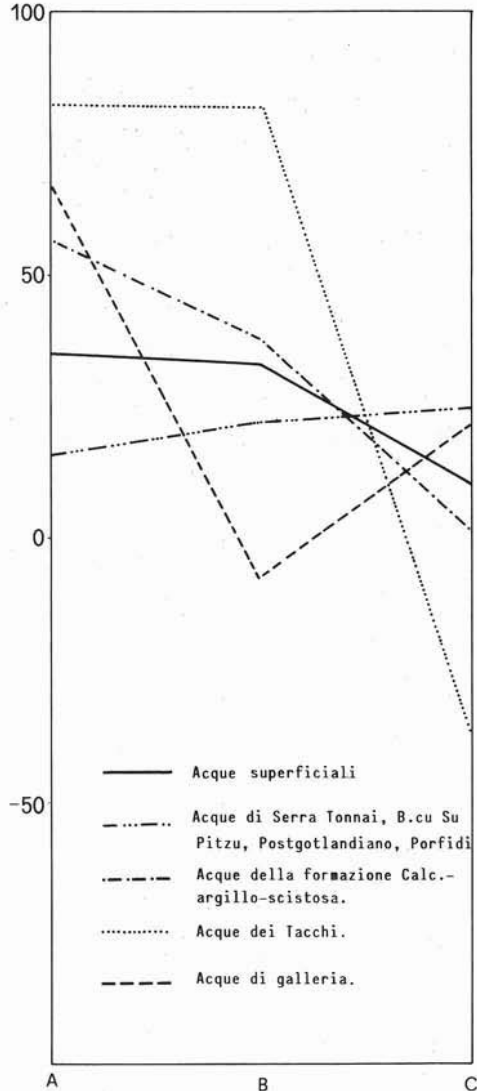


Fig. 4. — Diagramma classificativo delle acque. — Chemical classification of waters.

ruo nelle acque è costantemente molto basso. Il fatto che esso sia anche indipendente dal tipo litologico sede della circolazione e dalla estensione del circuito sotterraneo (peraltro sempre limitata e correlabile alla salinità per tutte le acque in cui non è raggiunta la saturazione in calcite) ci induce a ritenere che, in questo particolare caso, il cloruro disciolto sia quasi esclusivamente di origine meteorica, e pertanto sia possibile applicare il metodo di calcolo proposto da SARAZIN et al. (1976)

TABELLA 2

Confronto fra la composizione dell'acqua meteorica calcolata e i dati di alcune stazioni pluviometriche

Comparison between calculated rain water and chemical data from several pluviometric stations

	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO <sub>3</sub> mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	Cl mg/l	TDS mg/l
Acqua meteorica (calcolata)	—	2.80	15.40	1.17	—	8.65	25.17	53.19
Codaruina	3.85	1.88	13.10	1.03	16.55	9.69	33.05	70.92
Fertilia	3.92	1.71	17.69	1.47	26.81	14.81	39.58	91.94
Macomer	1.93	1.58	9.54	0.57	9.25	7.57	25.23	51.04
Monte Prano	2.14	1.26	13.40	0.71	20.57	22.08	29.42	79.29
Olibia	2.01	0.66	4.55	0.30	7.58	5.87	12.47	29.65
Gristano	1.64	1.92	13.38	0.85	11.33	10.94	35.74	70.14
Sassari	4.47	1.68	11.89	0.75	13.6	15.78	30.71	72.08
Soe Canales	2.96	0.68	11.26	0.80	18.01	7.78	28.95	62.48
Torralba	5.04	1.36	8.79	0.95	21.93	8.25	22.38	58.54

per una stima della composizione chimica dell'acqua meteorica. Questo metodo parte proprio dal presupposto che il cloro presente nelle

acque derivi esclusivamente dall'acqua piovana e sia pertanto assente nelle rocce, e che il bicarbonato provenga invece dall'alterazione della roccia e sia perciò nullo nell'acqua meteorica.

La composizione della pioggia dedotta con questo metodo è stata confrontata con i dati di letteratura relativi ad acque meteoriche campionate in diverse zone della Sardegna (DETTORI, 1979); dall'esame della Tab. 2 si può osservare un buon accordo fra i dati da noi calcolati e quelli sperimentali.

Per tutte le acque è stata quindi ricalcolata l'analisi, sottraendo i valori ottenuti per l'acqua meteorica dai relativi cationi ed anioni determinati per mezzo dell'analisi sperimentale. È stato così ricavato un diagramma di Piper, una sezione significativa del quale è riportata in Fig. 5. Tale sezione riassume in un

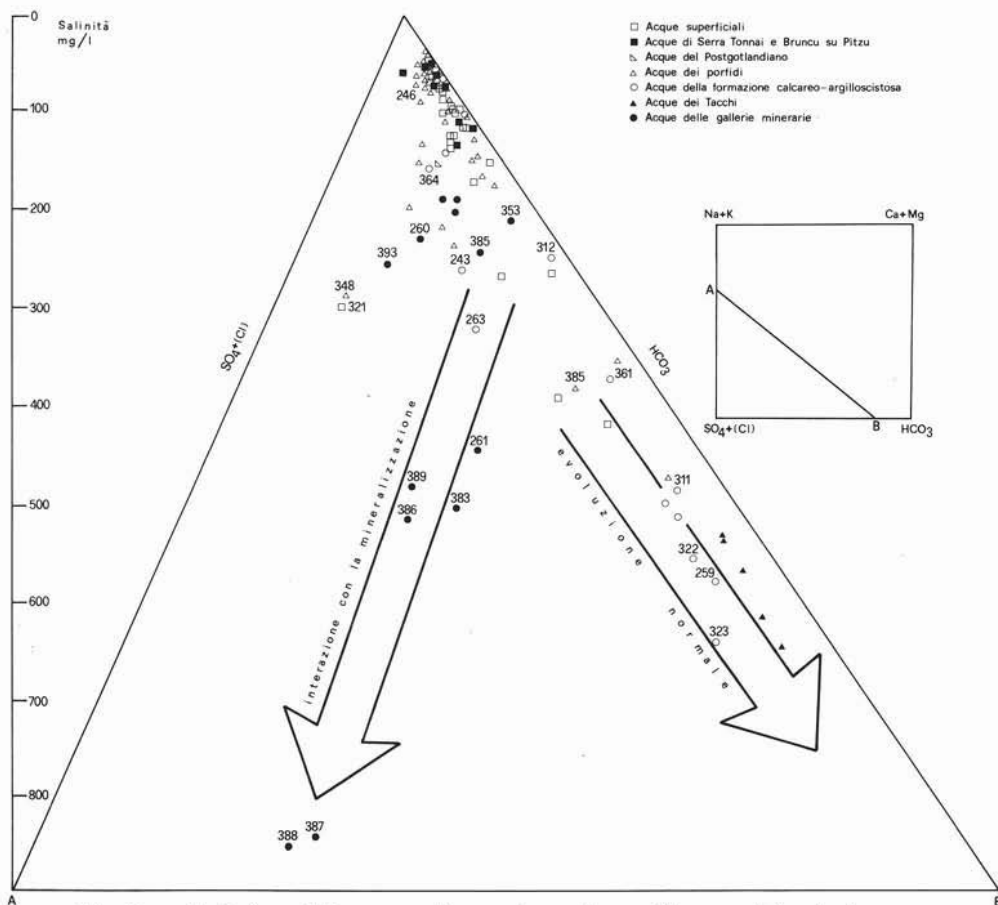


Fig. 5. — Evoluzione delle acque nella zona in studio. — Water-evolution in the area.



quadro unitario l'evoluzione delle acque che, a partire da quelle meno saline, costituite quasi esclusivamente da acqua piovana, col crescere della salinità manifestano sempre più marcatamente il loro carattere a bicarbonato prevalente. Le acque che hanno interagito con la mineralizzazione appaiono spostate sulla sinistra del grafico e mostrano un diverso livello di interazione sempre però caratterizzato dall'aumento dei solfati.

### Interpretazione dei dati idrogeochimici a fini minerari

Come già descritto in precedenti pubblicazioni per altre aree della Sardegna (BERTORINO et al., 1981; 1983) ed in accordo con quanto ampiamente documentato in letteratura (DALL'AGLIO e TONANI, 1973; KESLER et al., 1973; GRAHAM et al., 1975; KRAINOV e PETROVA, 1978; MILLER, 1979; LALONDE, 1983) modelli di prospezione idrogeochimica a fini minerari sono stati ipotizzati tenendo conto del comportamento e della distribuzione di alcuni raggruppamenti ionici indicatori di mineralizzazioni utili fra cui si rivelano particolarmente efficaci i solfati ed i fluoruri.

Prima di procedere ad una elaborazione statistica, i dati analitici sono stati normalizzati rispetto alla salinità totale poichè studi condotti su altre aree della Sardegna hanno mostrato che così operando si ottengono migliori risultati. Oltre a considerare i valori del rapporto solfato/salinità ( $S_n$ ), dato questo di per sè scarsamente indicativo in quanto alti valori potrebbero risultare da interazione dell'acqua, per esempio, con formazioni gessose completamente estranee a mineralizzazioni a solfuri, si è ritenuto opportuno ricorrere al parametro  $\Delta_n$  già proposto da BERTORINO et al. (1983). Tale parametro rappresenta l'ammontare normalizzato rispetto alla salinità di quella parte dei solfati disciolti derivanti dall'ossidazione dei solfuri e che pertanto non risulta bilanciata dai cationi alcalino terrosi (nell'ambiente idrologico in studio Ca e Mg sono prioritariamente considerati legati al bicarbonato e poi al solfato). Un grafico di correlazione  $SO_4 / (Ca + Mg)$  potrebbe mettere in evidenza tale caratteristica solo assumendo per tutte le acque un tenore disciolto in bicarbonati alcalino terrosi costante.

Nella elaborazione dei dati sono stati esclusi dalla trattazione statistica i campioni prelevati in gallerie minerarie che avrebbero alterato la valutazione del fondo geochimico. Una preliminare applicazione di adatti test statistici ha permesso di individuare per  $S_n$  e  $\Delta_n$  la tendenza ad una distribuzione unimodale normale per ciascuno dei gruppi individuati sulla base del tipo d'acqua e dei terreni attraversati; per i dati relativi ai tenori in  $F_n$  (rapporto fluoruro/salinità) la distribuzione invece è risultata lognormale, per cui sono stati elaborati i valori corrispondenti a  $\log F_n$ . Dall'applicazione del test di Student i vari gruppi di acque sono da considerarsi come un'unica popolazione e sono stati trattati tutti insieme. Una prima valutazione delle anomalie è stata effettuata escludendo inizialmente, una volta calcolati il valore medio ed il  $\sigma$  per ogni parametro, i campioni che presentavano valori maggiori di  $\bar{x} + 3\sigma$ . Per tali valori infatti è da escludere, a livello di significatività di 0,0013 che appartengano alla popolazione considerata, ed è pertanto lecito considerarli senz'altro anomali. Successivamente escludendo tali valori sono stati ricalcolati  $\bar{S}_n$ ,  $\bar{\Delta}_n$  e  $\overline{\log F_n}$  con relative  $\sigma$ . A questo punto della procedura sono stati ripresi in considerazione tutti i campioni (compresi quelli della gallerie minerarie) e tutti i valori di  $S_n$ ,  $\Delta_n$ , e  $\log F_n$  superiori di  $1,7\sigma$  alla media del parametro considerato calcolata come sopra, sono stati considerati probabilmente anomali; in una distribuzione normale questa soglia corrisponde ad un livello di significatività di 0,045. I valori anomali sono riportati in Tab. 3.

Da questa si può vedere come coincidenze di anomalie nei parametri  $S_n$ ,  $\Delta_n$  e  $\log F_n$  si manifestino solo nel caso della maggior parte delle acque di gallerie minerarie, mentre per altri tipi di acque quasi nessuna corrispondenza tra probabili anomalie si riscontra, neppure per coppie dei parametri considerati. Questo risultato, evidenziando la rispondenza fra caratteristiche distintive delle acque di miniera ed i parametri considerati, conferma la potenzialità dei parametri scelti nella prospezione idrogeochimica a fini minerari per giacimenti a solfuri, pur con le opportune limitazioni che discuteremo più oltre.

Al fine di meglio sintetizzare, se possibile,

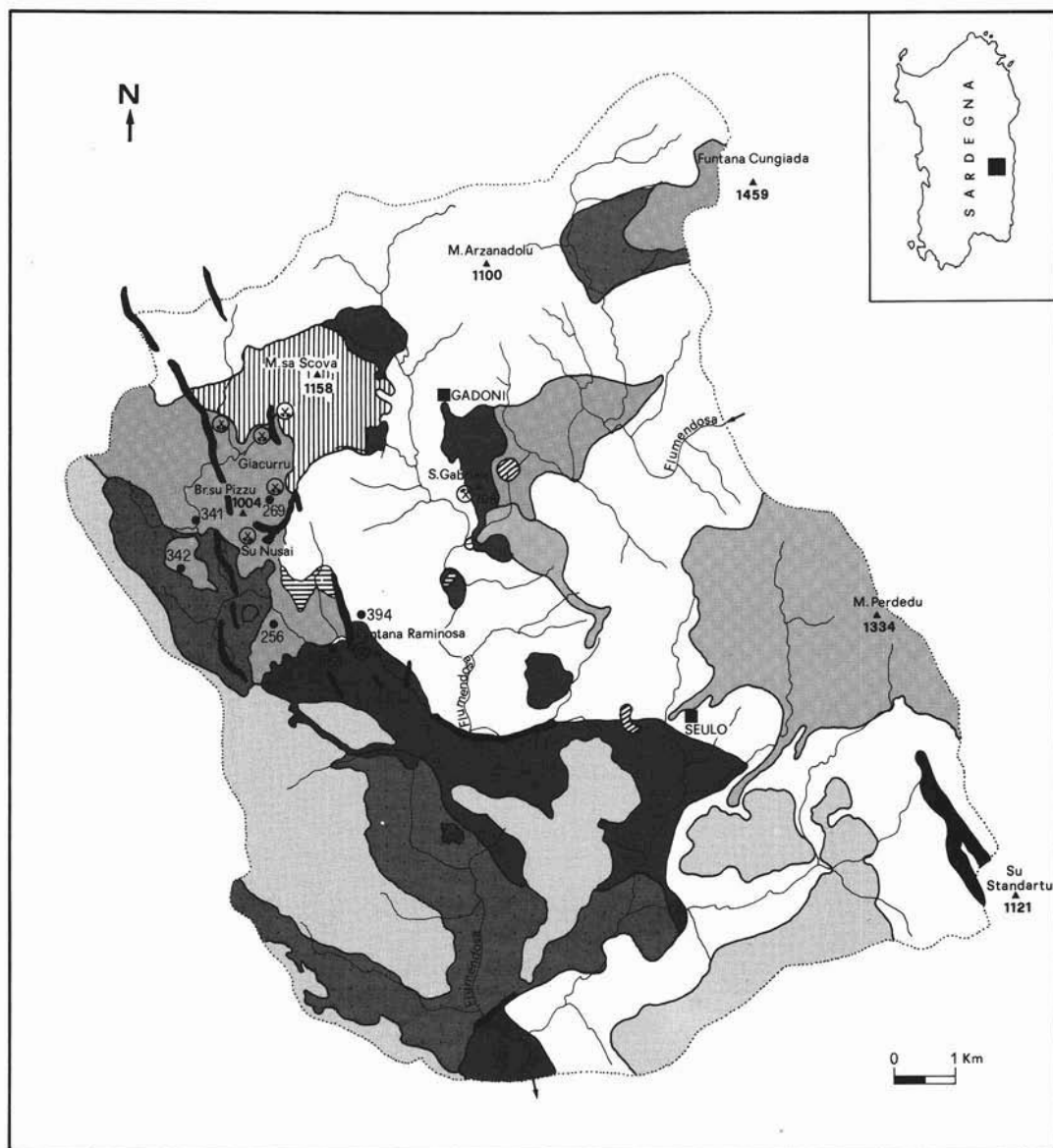


Fig. 6. — L'area mineralizzata evidenziata dalla prospezione idrogeochimica. Legenda come in Fig. 1. — Mineralized area shown by hydrogeochemical prospecting. Legenda as in Fig. 1.

quei caratteri evidenziati nell'interazione acqua mineralizzazione a solfuri si è pensato di procedere ad un'analisi multifattoriale escludendo, per il loro chimismo e per la estraneità dei terreni attraversati al processo mineralizzante, le cinque acque dei tacchi e considerando, in aggiunta al chimismo di base, le

concentrazioni di fluoruro disciolto. Si intendeva verificare se, tramite una elaborazione matematica di questo tipo si potesse mettere in evidenza un fattore che da solo fosse in grado di distinguere le acque che hanno interagito con la roccia mineralizzata. Limitando l'analisi ai primi due fattori che rappresentano

TABELLA 3

*Campioni anomali in log Fn, Sn, Δn e rispettivi fattori F<sub>2</sub>*  
*Log Fn, Sn and Δn anomalous samples and respective F<sub>2</sub> factors*

	N°	log Fn	Sn	Δn	F <sub>2</sub>
Superficiali	244		15	5.3	-0.16
	257			5.9	-0.08
	302			4.8	-0.23
	314			4.8	-0.16
	338	-0.4			-0.15
	341	0.1			0.17
	352	-0.4			-0.17
Serra Tonnai Bianco su Pitu	256	-0.4			0.21
	269	0.2			0.58
	340	-0.3			-0.29
	342	0.4	16		0.56
	355	-0.3			-0.13
Postgotlandiano	246		23	4.5	-0.25
	262	-0.4			-0.13
	337			5.0	-0.24
	339		17	7.0	-0.03
	344			4.4	-0.34
	345		15		-0.37
	348		30		-0.40
	366		18		-0.44
369			4.4	-0.27	
Porti	320			6.0	-0.13
Calcareo- argilloso	242		15		-0.60
	243			9.5	-0.07
	263		22		0.58
	321		40		0.29
	364		17		-0.43
	394	0.6			
Galleria	260	0.4		13.0	3.80
	261		21	8.3	2.05
	353	-0.2			0.33
	383	-0.1	28		2.40
	385	-0.1	16		0.50
	386	-0.2	33	14.3	2.96
	387	-0.3	34	5.6	5.23
	388		43	4.8	2.30
	389	-0.2	33	13.0	2.60
	390	0.1	20		0.90
	391	0.1	18	8.3	1.20
392	0.3	21		1.90	
393	0.4	24	20.6	4.17	

$$\log Fn = \log(10^6 \times [F] / [sal.])$$

$$\log \bar{Fn} = -0.9$$

$$\sigma_{\log Fn} = 0.3$$

$$\log \bar{Fn} + 1.7\sigma = -0.4$$

$$Sn = 100 \times [SO_4] / [sal.]$$

$$\bar{Sn} = 9$$

$$\sigma_{Sn} = 3.5$$

$$\bar{Sn} + 1.7\sigma = 15$$

$$\Delta n = 100 \times ([SO_4] + [HCO_3] - [Cl] + [Na] + [K] - [Ca] - [Mg]) / 2 [sal.]$$

$$\bar{\Delta n} = 1.28$$

$$\sigma_{\Delta n} = 1.8$$

$$\bar{\Delta n} + 1.7\sigma = 4.3$$

F<sub>2</sub> = fattore derivante da un'analisi multifattoriale dei dati analitici, caratterizzato da un alto peso per F, Na e SO<sub>4</sub>.

F<sub>1</sub> si ottengono infatti per le acque più saline e più mature già identificate per mezzo dei diagrammi di Piper.

Il fattore F<sub>2</sub> è invece caratterizzato da un altro peso per fluoruro, Na e SO<sub>4</sub>, tanto che i valori più elevati per questo fattore contraddistinguono proprio le acque di miniera e risultano da alti tenori in SO<sub>4</sub> non bilanciati dagli alcalini terrosi e da alti valori in fluoruro.

I valori di F<sub>2</sub> per i campioni anomali in almeno uno dei tre parametri precedentemente considerati sono riportati anch'essi in Tabella 3. Se quindi appare giustificato individuare in F<sub>2</sub> il parametro relazionato all'interazione acqua-roccia mineralizzata, pur tuttavia la tabella dimostra la labilità delle informazioni che derivano dai campioni di acque non raccolti in gallerie minerarie; infatti i valori di F<sub>2</sub> anche quando positivi sono di poco superiori allo zero. Questo dato non deve sorprendere dal momento che anomalie marcate in questi campioni non erano state osservate neppure per il complesso di valori Sn, Δn e logFn. Comunque il fattore F<sub>2</sub> può a questo punto essere assunto come indicatore qualitativo dell'interazione acqua-roccia mineralizzata a solfuri nell'area in esame. Su questa base è stata redatta la mappa dei valori F<sub>2</sub> superiori a zero (Fig. 6).

### Conclusioni

Il presente lavoro svolto in un'area ristretta e con una maglia di circa un campione ogni 1,2 km<sup>2</sup> conferma quanto già evidenziato nello studio su un'area più vasta quale quella del Sarrabus-Gerrei e con una maglia meno fitta (BERTORINO et al., 1983), e cioè che nella prospezione per giacimenti a solfuri in un ambiente prevalentemente silicatico i fattori logFn, Δn e subordinatamente Sn sono singolarmente e complessivamente utili indicatori idrogeochimici.

Tale conclusione discende per la maggior parte dai dati derivanti dalle acque di miniera e solo in piccola parte dai campioni di acqua la cui circolazione non ha interessato lavori minerari. Si può quindi concludere che tali indicatori sono certamente utilizzabili per la individuazione di corpi minerari superficiali, ma la loro efficacia si riduce quando l'interazione acqua-roccia mineralizzata avvenga in

i 2/3 della varianza totale (rispettivamente il 46,7 e il 19,9%), si osserva che il fattore F<sub>1</sub> può considerarsi relazionato alla maturità acquisita dalle acque. Si nota infatti che i componenti che hanno peso maggiore sono HCO<sub>3</sub>, Ca e Mg. I più alti valori del fattore

profondità.

Nel caso in questione l'analisi multifattoriale ha permesso di individuare nel fattore secondo per importanza quello caratterizzante l'interazione acqua-roccia mineralizzata. Tale fattore non sarebbe certo emerso così chiaramente se nella trattazione statistica non fossero state incluse le acque di galleria. Purtroppo è da notare che un'analisi di questo tipo si è rivelata utile non solo nella classificazione delle acque e nella comprensione dell'evoluzione del chimismo di base, ma per la prima volta ha fornito precise informazioni nella prospezione idrogeochimica. Nel presente studio essa ha confermato conclusioni raggiunte per altra via ma si può correttamente dedurre l'opportunità che un'analisi multifattoriale preceda altri tipi di analisi dettagliate, essendo in grado di evidenziare, unita alla conoscenza dei processi di lisciviazione, i caratteri chimici delle acque risultanti dall'interazione acqua-roccia mineralizzata.

*Ringraziamenti.* — Gli autori ringraziano la Prof. A.R. Zanzari per l'elaborazione dei dati svolta presso il centro di Calcolo Elettronico dell'Università di Perugia.

Lavoro eseguito con il contributo della Comunità Europea (contratto 113-79 MPP I) e del CNR (contributi 82,02556.05, 83,02223.05 e 84,00256.05).

## BIBLIOGRAFIA

- BARCA S. (1985) - «Postgotlandiano» Auct. e Carbonifero inferiore terrigeno in Sardegna: recenti e nuovi dati stratigrafico-strutturali. In: Evoluzione stratigrafica, tettonica, metamorfica e magmatica del Paleozoico italiano. Note brevi e riassunti. Siena 13-14 Dicembre 1985, 21-22.
- BERTORINO G., CABOI R., CAREDDA A.M., CONTI-VECCHI G., FANFANI L., MASSOLI-NOVELLI R., ZUDDAS P. (1979) - Caratteri idrogeochimici delle acque naturali della Sardegna meridionale. 1. Le acque del Gerrei e della Trexenta. Rend. Soc. It. Min. Petr., 35, 677-691.
- BERTORINO G., CABOI R., CAREDDA A.M., FANFANI L., GRADOLI M.G., ZUDDAS P. (1981) - Il fluoro nelle acque sorgive e superficiali del complesso paleozoico della Sardegna sud-orientale. Possibilità di applicazione nella prospezione idrogeochimica a fini minerari. Per. Min., 50, 215-232.
- BERTORINO G., CABOI R., CAREDDA A.M., FANFANI L., GRADOLI M.G., ZUDDAS P. (1983) - I solfati nelle acque sorgive e superficiali del complesso paleozoico della Sardegna sud-orientale. Loro significato nella prospezione minerarie. Per. Min., 52, 117-131.
- BOSELLINI A., OGNIBEN G. (1968) - Ricoprimenti ercinici nella Sardegna centrale. Ann. Univ. Ferrara, 1, 1-15.
- CARMIGNANI L., MINZONI N., PERTUSATI P.C., GATTIGLIO M. (1982) - Lineamenti geologici principali del Sarcidano - Barbagia di Belvì. In: «Guida alla Geologia del Paleozoico Sardo». Guide Geologiche Regionali. Soc. Geol. It., 119-125.
- DALL'AGLIO M., TONANI F. (1973) - Hydrogeochemical exploration for sulphide deposit. Correlation between sulphate and other constituents. Geochemical Exploration, Proc. Int. Geochem. Explor. Symp., 1972, London, 4, 305-314.
- D'AMORE F., SCANDIFFIO G. (1981) - Principali risultati dello studio geochimico dell'Area Sabatina, Lazio. Energia Geotermica: prospettive aperte dalle ricerche CNR, Atti del 2° Seminario Informativo, PFE - SPEG, 36-48.
- DETTORI B. (1979) - First observations on the saline content of the precipitations in some stations in Sardinia (Italy). Studi Sarsaresi, Ann. Fac. Agr. Università di Sassari, 27, 3-18.
- GRAHAM G.S., KESLER S.E., VAN LOON J.C. (1975) - Fluorine in ground water as a guide to Pb-Zn-Ba-F mineralization. Econ. Geol., 70, 396-398.
- KESLER S.E., VAN LOON J.C., BATESON J.H. (1973) - Analysis of fluoride in rocks and application to exploration. Journ. Geoch. Expl., 2, 11-17.
- KRAINOV S.R., PETROVA N.G. (1978) - Fluorine-bearing ground water as result of the interaction in the system «water-rock». Proc. Conf. on Hydrogeochemistry of mineralized waters, Cieplice-Geological Institute Warsaw, 110-115.
- LALONDE J.P. (1983) - Ground-water geochemistry in the Abitibi Volcanic belt of Quebec. Journ. Geochem. Explor., 19, 207-223.
- MILLER W.R. (1979) - Application of hydrogeochemistry to the search for base metals. Geophysics and Geochemistry in the search for Metallic Ores. Geol. Surv. Canada, Econ. Geol., Rep. 31, 479-487.
- MINZONI N. (1977) - Successione stratigrafica e assetto tettonico delle formazioni paleozoiche della Sardegna centrale. GLP 2-1977, 53-56.
- NAUD G. (1979) - Les shales de Rio Canoni, formation-répère fossilifère dans l'Ordovicien supérieur de Sardaigne orientale. Conséquence stratigraphiques et structurales. Bull. Soc. Géol. France, 31, 155-159.
- SARAZIN G., FOUILLAC C., MICHARD G. (1976) - Etude de l'acquisition d'éléments dissous par les eaux de lessivage des roches granitiques sous climat tempéré. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 1481-1486.
- VAI G.B., COCOZZA T. (1974) - Il «Postgotlandiano» sardo, unità sinorogenica ercinica. Boll. Soc. Geol. It., 93, 61-72.