

Studio di minerali opachi in sabbie fluviali oloceniche e nelle corrispondenti rocce madri di zone sottoposte a climi diversi (Montagne Rocciose e Monti Appalachi in U.S.A.)

EMANUELA MOLINAROLI

Dipartimento di Scienze Ambientali, Sezione Geo-Mineralogica, Università Venezia, Dorsoduro 2137, 30123 Venezia

ABHIJIT BASU

Department of Geology, Indiana University, 1005 East Tenth Street, Bloomington, IN 47405 U.S.A.

RIASSUNTO. — In questo lavoro si è fatto uno studio preliminare di minerali opachi derivanti da rocce madri e sedimenti di due zone degli Stati Uniti d'America caratterizzate da climi diversi: Montagne Rocciose (clima semi-arido) e Monti Appalachi (clima umido). L'analisi modale ha dimostrato che circa il 50% dei granuli opachi sono polimineralici e presentano comunemente tessitura e smistamenti lamellari in varie combinazioni di magnetite titanifera, ilmenite ed ematite. Le rocce ignee contengono, in riferimento ai minerali opachi, in generale circa il 40% di magnetite, il 38% di smistamenti a magnetite-ematite e il 9% di smistamenti a ilmenite-ematite. La magnetite monomineralica è abbondante anche nelle rocce metamorfiche (circa 35%) associata a smistamenti di magnetite-ematite (circa 46%). Percentuali molto simili a quelle riscontrate nelle rocce madri sono state trovate, per questi minerali, nelle sabbie oloceniche delle Montagne Rocciose. Una diminuzione di magnetite e di granuli a smistamenti magnetite-ematite si è notata invece nelle sabbie dei Monti Appalachi, nelle quali predominano gli smistamenti lamellari ilmenite-ematite (circa 35%). Si è riscontrato che la magnetite e l'ilmenite per alterazione pedogenetica sono state trasformate rispettivamente in ematite e rutilo. Questo processo di degradazione è più frequente per la magnetite che per l'ilmenite.

Sulla base del rapporto tra le percentuali dei diversi tipi di smistamenti presenti nei sedimenti delle due regioni climaticamente differenti è stata stabilita una scala di stabilità dei vari minerali che in ordine crescente è risultata: magnetite-ilmenite, magnetite-ematite e ilmenite-ematite. Si è constatato inoltre che le originarie caratteristiche petrogenetiche non sono state completamente distrutte durante l'alterazione.

Analisi preliminari alla microsonda elettronica di fasi coesistenti in granuli opachi sia di rocce madri che di sedimenti hanno mostrato che si possono stimare, sulla base della composizione, le condizioni chimico-fisiche di formazione delle rocce madri.

Le osservazioni qualitative e quantitative sui minerali opachi detritici e soprattutto sui granuli multifase permettono di ricavare significative informazioni sull'origine dei sedimenti.

Parole chiave: minerali opachi, smistamenti, analisi modale, rocce madri-sedimenti, Montagne Rocciose e Monti Appalachi.

STUDY OF OPAQUE MINERALS IN HOLOCENE FLUVIAL SANDS AND IN CORRESPONDING PARENT ROCKS IN TWO CLIMATIC ZONES: ROCKY MOUNTAINS AND APPALACHIAN MOUNTAINS IN THE U.S.A.

ABSTRACT. — Detrital opaque particles make up about 50% of heavy mineral concentrates of many sediments. However, sedimentary petrologists do not usually study the opaque particles and possibly loose important genetic information regarding the sediments under investigation. We have made a preliminary study of opaque particles both in parent rocks and their daughter sediments in parts of the United States of America. Samples were collected from the Boulder Batholith and the Tobacco Root Batholith (Cretaceous), and Precambrian metamorphic rocks in the Rocky Mountains in Montana (semi-arid climate), and from sediments Upper Paleozoic plutons and Paleozoic metasediments in the Appalachian Mountains in Georgia, South Carolina, and North Carolina (humid climate). Reflected light microscopy shows that about 50% of the opaque particles are polymineralic and commonly show exsolution and intergrowth textures between titaniferous magnetite, ilmenite, and hematite in various combinations. Of the opaque population, igneous rocks in general contain about 40% monomineralic magnetite, about 38% magnetite-hematite intergrowth and about 9% ilmenite-hematite intergrowth; monomineralic magnetite is also abundant in metamorphic rocks (about 35%) together with magnetite-hematite intergrowth (about 46%). Similar relative abun-

dances of opaque particles types are seen in the heavy minerals concentrates of Holocene sediments derived exclusively from the parent rocks mentioned above in semi-arid climate in Montana; but, a depletion of magnetite and magnetite-hematite intergrowths are seen in the sands of the Appalachian Mountains, where ilmenite-hematite intergrowths (about 35%) dominate the opaque particle population.

Reflected light microscopy also shows that magnetite and ilmenite suffer pedogenic alteration to hematite and rutile respectively; however, the alteration of magnetite is more pervasive than that of ilmenite. Comparison of the relative abundances of different types of mineral intergrowths in sediments from the two climatic regions seem to establish a durability series of magnetite-ilmenite, magnetite-hematite, and ilmenite-hematite in order of increasing stability.

Preliminary electron probe microanalysis of coexisting phase in the opaque particles with exsolution features showed that it is possible to estimate the temperature of equilibration of the parent rocks of many of the detrital particles, and that their original petrogenetic characteristics are not completely destroyed during weathering.

Our modal data, therefore, suggest that detrital opaque particles, and intergrowths of oxide phases in particular, are useful as maturity indicators of sediments and, to a lesser extent, also useful in source rock interpretation.

Key words: opaque minerals, exsolution, modal analysis, parent rocks - daughter sediments, Rocky Mountains and Appalachian Mountains.

Introduzione

I minerali opachi vengono per lo più studiati quali componenti di rocce ignee e metamorfiche, con lo scopo precipuo di fornire elementi per l'interpretazione petrogenetica di queste.

Nelle rocce sedimentarie invece questi minerali sono stati poco studiati, anche se spesso costituiscono la frazione maggiore del residuo pesante.

Recentemente sono stati pubblicati alcuni lavori su minerali opachi in rocce sedimentarie. OKADA e ARAI (1982) hanno analizzato spinelli detritici contenuti in arenarie a serpentino del Giappone, la presenza dei quali ha permesso di risalire alla natura femica delle rocce madri. HISCOTT (1979), sulla base della composizione di cromiti magnesio-alluminifere in arenarie dell'Ordoviciano inferiore, ha stimato il contributo in volume dell'unità peridotitica necessario per la formazione delle arenarie stesse.

È stata studiata anche la possibilità di utilizzare i minerali pesanti opachi contenuti in sedimenti per interpretare la provenienza di questi ultimi, ricostruire le particolari condizioni di un bacino deposizionale e identificare il magnetismo residuo in sedimenti detritici (STUMPFEL, 1958; STENDAL, 1979; LUEPKE, 1980; TURNER, 1980; OKADA e ARAI, 1982; DARBY, 1984). Significative informazioni inoltre sono state ricavate anche per le rocce madri tramite lo studio della composizione chimica e dei tipi di tessitura dei minerali opachi da HAGGERTY (1976 a e b).

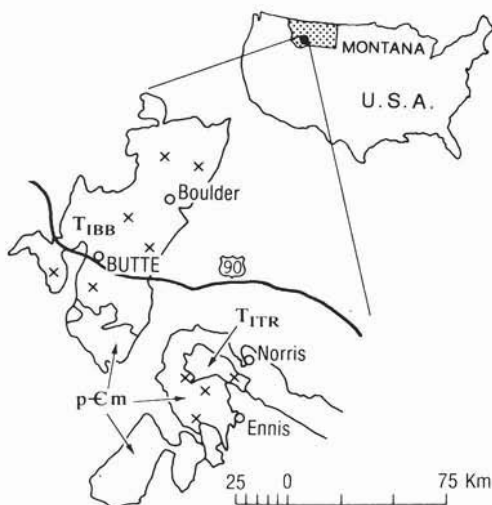


Fig. 1. — Schema geologico e ubicazione delle aree di campionamento nelle Montagne Rocciose, U.S.A. T_{1BB} = rocce intrusive terziarie del Batolite Boulder; T_{1TR} = rocce intrusive terziarie del Tobacco Root; pCm = rocce metamorfiche precambriane; x = aree di campionamento. — Simplified geologic map of sampling areas in the Rocky Mountains, U.S.A. T_{1BB} = Terziarius igneous rocks of Boulder Batholith; T_{1TR} = Terziarius igneous rocks of Tobacco Root; pCm = Precambrian metamorphic rocks; x = sampling areas.

Informazioni generali sulla condizione di formazione, paragenesi e struttura degli ossidi opachi si ritrovano nei lavori di LINDSLEY (1976), RUMBLE (1976), RAMDOHR (1980) e REYNOLDS (1984).

Scopi di questo studio:

— stimare l'influenza di differenti condizioni (climatiche, di trasporto e deposizione) sulle originarie caratteristiche di minera-

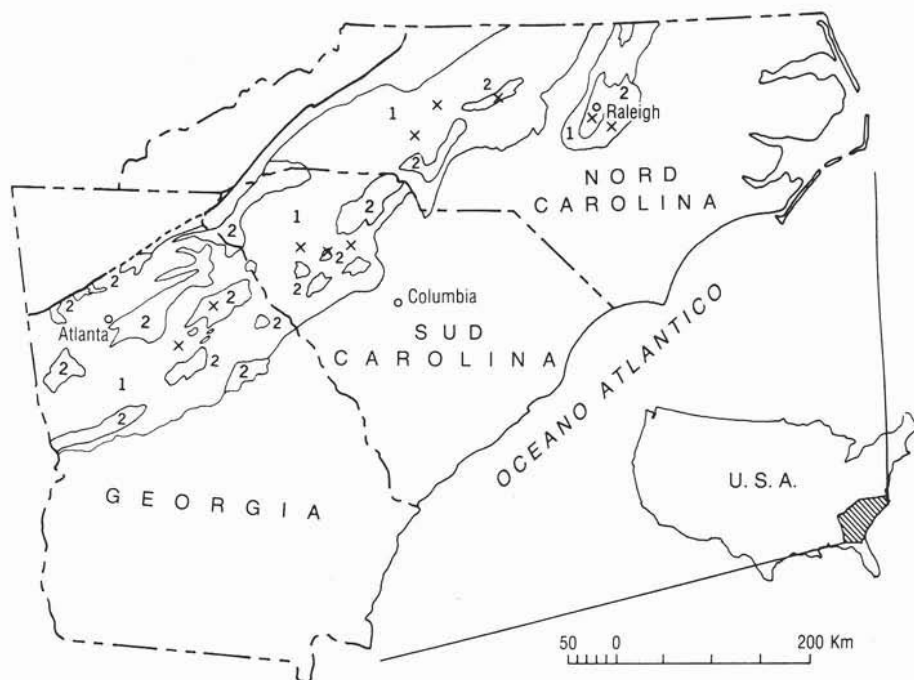


Fig. 2. — Schema geologico e ubicazione delle aree di campionamento nei Monti Appalachi, U.S.A. 1 = rocce metamorfiche; 2 = rocce intrusive; x = aree di campionamento. — Simplified geologic map of sampling areas in the Appalachian Mountains, U.S.A. 1 = metamorphic rocks; 2 = igneous rocks; x = sampling areas.

li pesanti opachi detritici derivati da rocce madri di diversa natura;

— cercare una relazione statisticamente significativa tra specifici tipi di rocce madri ed i minerali opachi detritici ritrovati nelle sabbie derivate;

— dare nuove informazioni sulla composizione, struttura e associazione di questi minerali.

Per tali scopi sono stati studiati i minerali opachi in sedimenti fluviali, formati per degradazione di rocce madri silicatiche di varia natura, di due zone sottoposte a condizioni climatiche diverse (BASU, 1976; SUTTNER et al., 1981): una a clima temperato semi-arido nelle Montagne Rocciose, l'altra a clima temperato umido nei Monti Appalachi. La morfologia più aspra delle Montagne Rocciose suggerisce una degradazione meccanica più intensa (BASU, 1976); la maggiore abbondanza di precipitazioni nei Monti Appalachi favorisce una più spinta alterazione chimica. Inoltre, esclusivamente per la zona delle Montagne

Rocciose, questi minerali sono stati esaminati anche nei vari tipi di rocce madri.

Area di studio, materiali e metodi

Nella regione delle Montagne Rocciose (Fig. 1) sono state campionate rocce in posto: dal Batolite Boulder di età cretacea, costituito prevalentemente da granodioriti; dal Batolite Tobacco Root di età tardo cretacea, nel quale affiorano granodioriti, graniti, tonaliti, quarzo-monzoniti e monzoniti; da formazioni precambriane di rocce metamorfiche, tra le quali gneiss quarzoso-feldspatici, scisti ed anfiboliti; da formazioni vulcaniche di età terziaria che includono riodaciti, daciti, andesiti, lave basaltiche e vulcanoclastiti (VITALIANO e CORDUA, 1979). In corrispondenza di queste diverse formazioni sono stati prelevati sedimenti fluviali olocenici, in condizioni subacquee e in un'area non contaminata dall'apporto di materiali di altra origine. Si sono in totale raccolti 70 campioni, di cui 32

TABELLA 1

Percentuali relative dei minerali opachi e dei loro diversi tipi di smistamenti e tessiture in cinque tipi di rocce madri nelle Montagne Rocciose — Relative abundance of opaque minerals and their intergrowth textures / assemblages in five different parent rocks in the Rocky Mountains

TIPI DI GRANULI	GRANODIORITE	GNEISS	ANFIBOLITE	DACITE & VULCAN.
Monomineralici				
(Ti)Magnetite	40.0	52.2	25.5	38.7
Ematite	2.2	—	—	2.7
Ilmenite	1.5	—	6.8	13.8
Rutilo	—	0.6	3.8	—
Pirite	0.3	4.0	10.3	10.0
Pirrotina	—	—	2.6	—
Goethite/Limonite	0.2	0.5	2.0	—
Smistamenti Polimineralici				
Ilmenite-Ematite	8.6	4.0	7.0	6.3
(Ti)Magnetite-Ilmenite	3.3	3.0	3.1	10.7
(Ti)Magnetite-Ematite	37.8	10.7	6.9	14.0
(Ti)Magnetite-Ilmenite-Ematite	1.2	9.0	9.2	3.8
Inclusioni Polimineraliche				
(Ti)Magnetite-Pirite	3.9	12.2	15.8	—
(Ti)Magnetite-Ematite-Pirite	0.7	—	—	—
Ilmenite-Pirite	—	—	0.6	—
Altre Tessiture Polimineraliche	—	3.6	—	—
Pirite-Goethite	0.3	—	—	—
No. di Punti	1922	602	1126	351
No. di Campioni	13	6	11	2

campioni di rocce madri e 38 di sedimenti derivati.

Il secondo set di campioni proviene dai Monti Appalachi (Fig. 2). In questa regione sono stati prelevati esclusivamente sedimenti fluviali olocenici. Cinque campioni provengono da sabbie derivate da rocce intrusive, quali sienograniti, graniti, quarzo-monzoniti e granodioriti, 20 da rocce metamorfiche di età paleozoica (HAROLD, 1978).

Le sabbie campionate sono state preliminarmente liberate dalla frazione granulome-

trica inferiore a 63 μm , tramite sedimentazione in cilindri ed ulteriore setacciatura ad umido. È stata poi eseguita la separazione dei minerali pesanti utilizzando bromoformio a densità 2.89 gr^3/cm e imbuti separatori; il lavaggio dei granuli è stato effettuato con acetone direttamente su filtri. Con i minerali pesanti così separati sono state preparate delle sezioni sottili, inglobando il materiale in portacampioni mediante una miscela araldite-indurente. Tali sezioni sono state successivamente lucidate per lo studio al microscopio

TABELLA 2

Percentuali relative dei minerali opachi e dei loro diversi tipi di smistamenti e tessiture nelle principali rocce madri e nelle sabbie derivate oloceniche delle M. Rocciose e nelle sabbie dei M. Appalachi — Relative abundance of opaque minerals and their intergrowth textures / assemblages in principal parent rocks and their Holocene daughter sands in the Rocky Mountains and the Appalachian Mountains

TIPI DI GRANULI	1	2	3	4	5	6	7	8
Monomineralici								
(Ti)Magnetite	40.0	36.8	31.2	35.0	46.1	39.9	38.7	31.1
Ematite	2.2	2.4	0.3	—	1.1	—	2.7	0.8
Ilmenite	1.5	0.5	1.1	4.4	2.9	2.8	13.8	1.0
Rutilo	—	2.1	0.3	3.0	6.3	6.1	—	5.0
Pirite	0.3	—	0.1	8.0	0.7	0.1	10.0	1.0
Pirrotina	—	—	—	1.7	—	—	—	—
Goethite/Limonite	0.2	0.1	0.1	1.4	0.3	0.9	—	—
Smistamenti Polimineralici								
Ilmenite-Ematite	8.6	11.7	35.5	6.2	8.0	28.1	6.3	12.5
(Ti)Magnetite-Ilmenite	3.3	3.0	2.0	6.9	4.4	2.9	10.7	7.5
(Ti)Magnetite-Ematite	37.8	39.5	27.3	8.2	24.0	16.1	14.0	30.7
(Ti)Magnetite-Ilmenite-Ematite	1.2	1.2	2.1	9.1	4.0	3.1	3.8	6.9
Inclusioni Polimineraliche								
(Ti)Magnetite-Pirite	3.9	—	—	14.4	1.8	—	—	—
(Ti)Magnetite-Ematite-Pirite	0.7	0.3	—	—	—	—	—	—
Ilmenite-Pirite	—	—	—	0.4	—	—	—	—
Altre Tessiture Polimineraliche								
Pirite-Goethite	0.3	—	—	1.3	—	—	—	—
No. di Punti	1922	4384	1271	1728	4505	4559	351	339
No. di Campioni	13	17	5	17	19	20	2	2

1 = Granodiorite; 2 = Sedimenti Montagne Rocciose da rocce intrusive; 3 = Sedimenti Monti Appalachi da rocce intrusive; 4 = Gneiss e Anfibolite; 5 = Sedimenti Montagne Rocciose da rocce metamorfiche; 6 = Sedimenti Monti Appalachi da rocce metamorfiche; 7 = Dacite e Vulcanoclastite; 8 = Sedimenti Montagne Rocciose da rocce effusive. — 1 = Granodiorite; 2 = Rocky Mountains sediments from igneous rocks; 3 = Appalachian Mountains sediments from igneous rocks; 4 = Gneiss and Amphibolite; 5 = Rocky Mountains sediments from metamorphic rocks; 6 = Appalachian Mountains sediments from metamorphic rocks; 7 = Dacite and Volcaniclastic rock; 8 = Rocky Mountains sediments from volcanic rocks.

a riflessione e alla microsonda elettronica. Lo studio degli stessi minerali nelle rocce madri è stato condotto su sezioni sottili lucidate. L'analisi modale è stata effettuata al microscopio a riflessione su circa 250 granuli opachi per ciascuna sezione lucida dei campioni di

sedimento. Per le rocce madri invece sono stati contati tutti i granuli opachi presenti in ogni sezione, in generale compresi tra 100 e 150.

Sono state eseguite anche alcune analisi preliminari alla microsonda elettronica, come supporto allo studio microscopico delle diverse

fasi di minerali opachi. A tal fine si è utilizzata la microsonda «ETEC Autoprobe», analizzando Fe, Ti, Mn, Al, Mg e Cr.

Risultati

Significative informazioni sui minerali opachi dei diversi gruppi di campioni sono state ottenute — tramite indagini qualitative e quantitative al microscopio — sulla composizione, struttura, associazioni paragenetiche, tipi di alterazione nonché frequenza.

È risultato che i minerali opachi costituiscono circa il 50% della frazione pesante nei diversi tipi di sedimenti.

I minerali opachi nei diversi tipi di rocce madri e nei sedimenti delle due zone sono costituiti per la maggior parte da ossidi quali magnetite, titanomagnetite, ilmenite ed ematite, fasi cristalline della serie di soluzioni solide magnetite-spinelli e ilmenite-ematite; di conseguenza questi ossidi entrano nel sistema $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$. Come loro prodotti di smistamento ed ossidazione si sono riconosciuti spinelli, ematite, ilmenite, rutile, goethite o limonite. Questi minerali si presentano in grani monomineralici o in grani polimineralici come smistamenti. La magnetite inoltre per pseudomorfose può essere sostituita da ematite (martite). Accanto agli ossidi sono stati riconosciuti solfuri, con predominio della pirite, come granuli monomineralici o come inclusioni.

I risultati dell'analisi modale vengono sintetizzati nelle Tabelle 1 e 2 dove le percentuali dei vari tipi di granuli si riferiscono al totale degli opachi. Nella Tabella 1 si riferiscono i valori medi dei vari tipi di granuli individuati nelle diverse rocce madri delle Montagne Rocciose. Nella Tabella 2 si procede al confronto fra i valori medi dei minerali opachi contenuti nei sedimenti delle Montagne Rocciose sia con quelli delle relative rocce madri che con quelli dei corrispondenti sedimenti dei Monti Appalachi. Si danno qui di seguito i risultati delle osservazioni relative alla diverse specie.

Magnetite e Titanomagnetite (Ti)Mt

Questi minerali sono stati considerati as-

sieme nell'analisi modale; e nelle Tabelle il termine (Ti)magnetite indica il contenuto di ambedue.

La (Ti)magnetite è l'ossido più comune sia nelle rocce che nei sedimenti. Nelle Montagne Rocciose le rocce intrusive e quelle effusive hanno contenuti di magnetite simili, mentre in quelle metamorfiche si hanno alti valori per lo gneiss (52%) e più bassi per l'anfibolite (25%) (Tab. 1). Nei sedimenti derivati vengono mantenuti questi rapporti relativi anche se le quantità assolute sono minori e questo fenomeno è ancora più marcato per i sedimenti appalachiani.

La magnetite ha un caratteristico colore grigio scuro. Alcuni granuli di magnetite sono parzialmente alterati e in questi casi il processo si sviluppa a partire dal centro del granulo lasciando inalterati i bordi. I grani di titanomagnetite sono per lo più otticamente omogenei, talvolta contengono inclusioni di solfuri (essenzialmente pirite e pirrotina) o smistamenti di spinelli. Un'altra caratteristica della titanomagnetite è l'abbondanza di inclusioni traslucide, che potrebbero derivare da un raffreddamento molto veloce (RIEZEBOS, 1979). È presente anche in elementi relativamente privi di inclusioni, colorati in grigio-marrone. L'aumento dell'intensità del color marrone coincide con un aumento di Ti rilevato tramite indagini preliminari alla microsonda.

Smistamenti (Ti)Magnetite-Ilmenite (Ti)Mt-II

Frequenti sono i granuli che presentano smistamenti lamellari di ilmenite secondo {111} della (Ti)magnetite, risultanti probabilmente da ossidazione di quest'ultima. In sedimenti delle Montagne Rocciose sono presenti smistamenti lamellari ben evidenti in due differenti piani.

I granuli a smistamento in solido nelle rocce delle Montagne Rocciose hanno bassi contenuti nelle intrusive, medi nelle metamorfiche e più elevati nelle effusive. Un simile trend, pur con diminuzione dei contenuti totali, si osserva sia nei sedimenti derivati che nei sedimenti appalachiani.

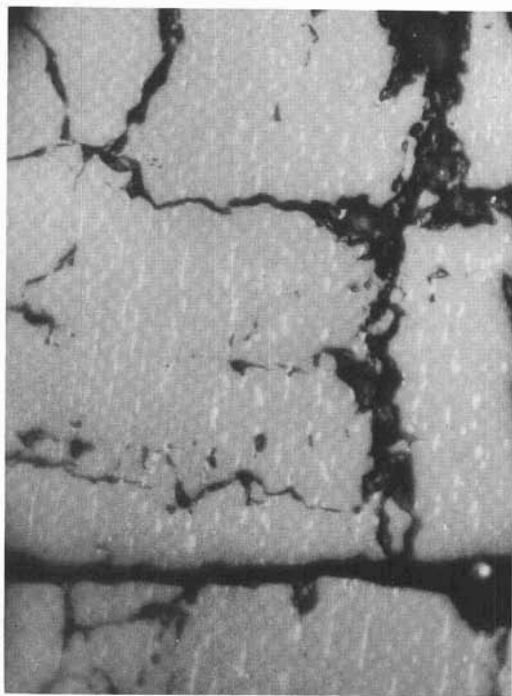


Fig. 3. — Smistamento di magnetite (grigia) ed ematite (bianca) in roccia madre granitica del Batolite Tobacco Root. (40 X, immersione in olio, N //, luce riflessa). — Intergrowth of magnetite (grey) and hematite (white) in a parent rock granite of the Tobacco Root Batholith. (40 X, oil immersion, N //, reflected light).

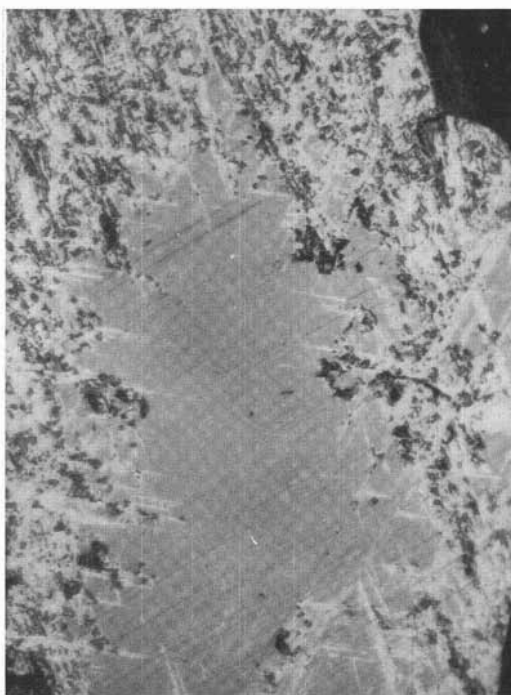


Fig. 4. — Alterazione di magnetite detritica (grigia) in martite (bianca) in un granulo di sabbia olocenica del Batolite Boulder. (40 X, immersione in olio, N //, luce riflessa). — Alteration of detrital magnetite (grey) to martite (white); the grain is from Holocene sand derived from the Boulder Batholith. (40 X, oil immersion, N //, reflected light).

Smistamenti (Ti)Magnetite-Ematite (Ti)Mt-Em

La magnetite si trova frequentemente alterata in ematite, come lamelle (Fig. 3) o sotto forma mirmechitica. Talvolta le lamelle di ematite formano un intreccio molto fitto, per cui è difficile riconoscere il minerale ospite; si tratta di pseudomorfofosi con formazione di martite (Fig. 4).

Nella Fig. 3, di un granulo incluso in roccia madre, sono evidenti piccole lamelle di ematite tutte appartenenti allo stesso piano e di un'unica generazione. La Fig. 4, di un granulo proveniente da sedimento, rappresenta lo stadio iniziale di trasformazione in martite, fenomeno assai frequente nei granuli contenuti nelle sabbie. Soluzioni a temperatura piuttosto alta possono essere generalmente la causa di tale processo, ma questa trasformazione si può realizzare anche a più bassa temperatura (RIEZEBOS, 1979).

L'associazione (Ti)magnetite-ematite nelle

rocce delle Montagne Rocciose raggiunge valori molto alti nelle rocce intrusive subendo una drastica diminuzione nelle effusive ed ulteriore decremento nelle metamorfiche. Nelle sabbie derivate questo andamento è mantenuto, mentre si può osservare un arricchimento rispetto alle rocce madri. Anche nei sedimenti dei Monti Appalachi questo smistamento presenta le stesse variazioni pur avendo quantità relative inferiori.

Ilmenite II

Tra i minerali opachi granuli di ilmenite privi di inclusioni sono presenti per lo più in basse percentuali. I contenuti nelle rocce delle Montagne Rocciose sono crescenti da quelle intrusive a quelle effusive con un marcato aumento, mentre per i sedimenti sia derivati che appalachiani le percentuali di tale minerale sono pressoché costantemente scarse.

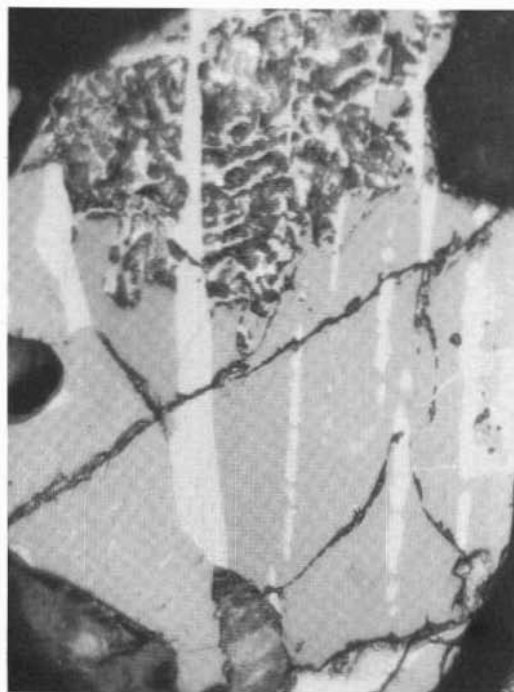


Fig. 5. — Smistamento di ilmenite (grigia) ed ematite in due generazioni (bianca) di un granulo detritico di sabbie oloceniche derivate da un plutone granitico degli Appalachi. (40 X, immersione in olio, N //, luce riflessa). — Exsolution of ilmenite (grey) and hematite (white) in two generations in a detrital grain in Holocene sands derived from an Appalachian granitic pluton. (40 X, oil immersion, N //, reflected light).

Smistamenti Ilmenite-Ematite Il-Em

L'ilmenite mostra frequentemente tessitura con smistamenti soprattutto di ematite presente in lamelle o lenti secondo {0001}. Talvolta si possono osservare anche granuli di ematite con lamelle di ilmenite secondo {0001} (Fig. 5). Granuli multifase di ilmenite-ematite con smistamenti lamellari ben orientati sono frequenti nei sedimenti (Fig. 5), dove le lamelle di ematite sono ben orientate secondo due direzioni e sono chiaramente visibili due distinte generazioni. Questi smistamenti ben orientati sono invece rari nelle rocce madri.

Si possono osservare inoltre granuli di ematite arrotondati, che inglobano lenti di ilmenite ben sviluppate, tra le quali si trovano lamelle più fini e di forma più allungata dello stesso minerale.

Esistono anche associazioni di ematite-

ilmenite con lamelle di smistamento reciproco: si tratta di granuli di ematite che racchiudono al centro plaghe di ilmenite a grande sviluppo, sotto forma di spessi «mantelli», generati da un'estesa migrazione di questo minerale durante lo smistamento. Questi mantelli racchiudono a loro volta una seconda generazione di ematite in lenti sottili.

L'ilmenite si trova anche sotto forma di granuli contenenti al centro lenti estremamente fini di ematite smistata secondo {0001}.

Questi tipi di smistamenti si rinvengono nelle rocce delle Montagne Rocciose con percentuali pressoché costanti sia per le intrusive, che per le metamorfiche, che per le effusive. Un tale andamento si ritrova anche nei sedimenti derivati, arricchiti rispetto alle rocce madri. Mentre per i sedimenti dei Monti Appalachi le sabbie da rocce intrusive presentano una quantità più elevata di quelle da rocce metamorfiche. In ogni caso i contenuti in assoluto sono molto più elevati di quelle delle sabbie delle Montagne Rocciose.

Smistamenti (Ti)Magnetite-Ilmenite-Ematite (Ti)Mt-Il-Em

Come visibile in Tabella 2 sono stati evidenziati anche smistamenti di (Ti)magnetite-ilmenite-ematite, seppur in percentuali piuttosto scarse. Si notano granuli con spesse lamelle «sandwich» di ilmenite che dividono il granulo in due parti: una relativamente poco ossidata ricca di ilmenite, l'altra fortemente ossidata con fasci intrecciati di ematite «trillis» e smistamenti di magnetite. Altri granuli di ilmenite presentano smistamenti di magnetite dal bordo verso l'interno, e di ematite al centro. Quest'ultimo tipo di tessitura è prevalente nelle rocce. Nei sedimenti si riscontrano inoltre granuli di ilmenite con smistamenti lamellari di ematite e di magnetite specialmente concentrate lungo i bordi.

Nei campioni di rocce delle Montagne Rocciose questi granuli presentano un contenuto decrescente dalle metamorfiche, alle effusive, alle intrusive. Mentre i sedimenti derivati da rocce effusive presentano il valore più elevato, che decresce in quelli dovuti a rocce metamorfiche a quelli dovuti a rocce intrusive. Nei sedimenti dei Monti Appalachi i valori sono pressoché costanti.

Ematite Em

L'ematite è presente nelle rocce delle Montagne Rocciose in basse percentuali o addirittura assente nelle rocce metamorfiche. Nelle

sabbie derivate le quantità sono costanti, mentre nelle sabbie appalchiane i contenuti sono più scarsi e addirittura assenti in quelle da rocce metamorfiche.

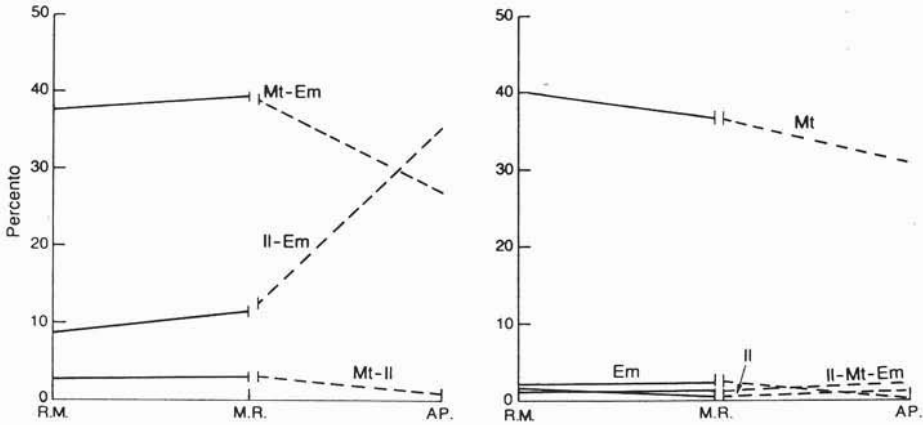


Fig. 6. — I diagrammi mettono a confronto le percentuali degli ossidi opachi nelle rocce madri intrusive (R.M.) e nelle sabbie derivate oloceniche provenienti dalle Montagne Rocciose (M.R.). Si mostra inoltre il confronto fra le sabbie delle Montagne Rocciose e le sabbie dei Monti Appalachi (AP.). Il clima umido degli Appalachi contribuisce in misura maggiore all'alterazione dei granuli detritici di quanto non faccia il clima semi-arido delle Rocciose. — Plot compares the relative abundances of opaque oxide minerals in igneous parent rocks (R.M.) and Holocene daughter sands in the Rocky Mountains (M.R.) and compares the Rocky Mountains sands with the sands of the Appalachian Mountains (AP.). Humid climate in the Appalachian contributes to a higher degree of alteration of detrital particles than that in the semi-arid climate of the Rockies.

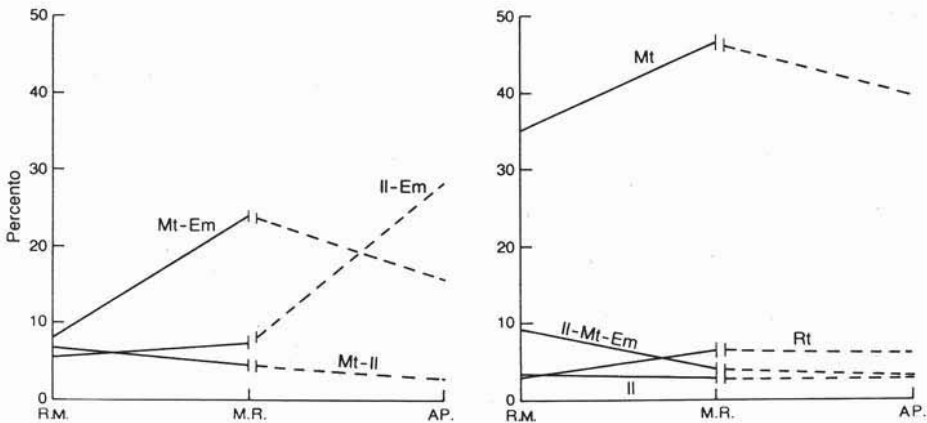


Fig. 7. — I diagrammi mettono a confronto le percentuali degli ossidi opachi nelle rocce madri metamorfiche (R.M.) e nelle sabbie derivate oloceniche provenienti dalle Montagne Rocciose (M.R.). Si mostra inoltre il confronto fra sabbie delle Montagne Rocciose e le sabbie dei Monti Appalachi (AP.). Il clima umido degli Appalachi contribuisce in misura maggiore all'alterazione dei granuli detritici di quanto non faccia il clima semi-arido delle Rocciose. — Plot compares the relative abundances of opaque oxide minerals in metamorphic parent rocks (R.M.) and Holocene daughter sands in the Rocky Mountains (M.R.) and compares the Rocky Mountains sands with the sands of the Appalachian Mountains (AP.). Humid climate in the Appalachian contributes to a higher degree of alteration of detrital particles than that in the semi-arid climate of the Rockies.

TABELLA 3

Confronto tra i valori dei rapporti per i tre tipi di smistamenti che nelle sabbie oloceniche costituiscono circa l'80% dei granuli multifase — Comparison of the ratios of the three types intergrowth pairs of opaque oxide minerals that constitute about 80% of the multiphase opaque particles in Holocene sands

	ROCCHE MADRI			SABBIE				
	I	M	V	I		M		V
				S-A	U	S-A	U	S-A
$\frac{I1-Em}{(T1)Mt-Em}$	0.2	0.7	0.5	0.3	1.3	0.3	1.7	0.3
$\frac{(T1)Mt}{(T1)Mt-Em}$	1.1	4.3	2.8	0.9	1.1	1.9	2.5	1.0
$\frac{I1-Em}{(T1)Mt-I1}$	2.6	0.8	0.6	4.1	17.8	1.7	9.7	1.3

I = rocce intrusive; M = rocce metamorfiche; V = rocce vulcaniche; S-A = clima semi-arido; U = clima umido. — I = igneous rocks; M = metamorphic rocks; V = volcanic rocks; S-A = semi-arid climate; U = humid climate.

Goethite / Limonite

Nei campioni studiati sono presenti talvolta in piccole percentuali anche granuli di goethite. Nelle rocce delle Montagne Rocciose questo termine è molto scarso e addirittura assente nelle rocce effusive. Tale andamento è mantenuto anche nelle sabbie derivate. Anche le sabbie appalchiane presentano contenuti molto bassi.

La goethite probabilmente si è formata attraverso processi di ossidazione e precipitazione; comunque i lineamenti tessiturali caratteristici dovuti al primo meccanismo sono difficili da riconoscere. I granuli di goethite si presentano con diverse tonalità di grigio e ciò è probabilmente dovuto alla presenza di materiale argilloso. Sono stati trovati anche granuli di pirite associati a goethite, che si presuppongono originati per sostituzione di pirite su goethite. In altri granuli invece la goethite mette in evidenza una tessitura colloforme e zonata, che risulta probabilmente da deposizioni di gel ripetute nel tempo.

Rutilo Rt

La presenza di granuli di rutilo è stata evidenziata nelle rocce delle Montagne Rocciose

esclusivamente in quelle metamorfiche ed anche nei sedimenti derivati. I valori più alti si hanno in quelli dovuti al disfacimento di queste rocce. Quantità apprezzabili sono state riconosciute anche nei sedimenti derivati da rocce effusive. Le sabbie dei Monti Appalachi presentano quantità simili a quelle individuate nei sedimenti delle Montagne Rocciose. Nelle rocce madri questo minerale è di genesi primaria; nei sedimenti una fase TiO_2 può anche derivare, sotto condizioni di ossidazione a bassa temperatura, dall'alterazione dell'ilmenite.

Un'ulteriore conferma sulla composizione dei vari ossidi, determinata con le indagini al microscopio, si è ottenuta da analisi preliminari alla microsonda elettronica. Tali analisi sono state effettuate su granuli polimineralici presentanti ancora superfici inalterate, contenuti in sedimenti delle due aree studiate e in sedimenti provenienti dal lago Erie. I risultati di queste indagini, ancora in fase di sviluppo, verranno pubblicati in una prossima specifica nota.

Discussione

I risultati qui esposti, ottenuti dallo studio microscopico, portano a concludere che i mi-

nerali opachi possono assumere importante valore per l'interpretazione:

— dell'origine dei sedimenti sia come provenienza sia come natura della roccia madre e delle condizioni chimico-fisiche di formazione di questa;

— degli effetti di condizioni climatiche diverse sui materiali nei processi di alterazione nonché del grado di maturità dei sedimenti stessi.

La variazione nei valori percentuali dei minerali opachi — individuata nelle due regioni climatiche prese in esame — nel passaggio da rocce madri intrusive e metamorfiche a sedimenti è bene illustrata nelle Figure 6 e 7.

Si può constatare che i sedimenti formati in ambiente semi-arido da rocce intrusive (Fig. 6) presentano per i vari minerali opachi, con l'eccezione della magnetite, valori abbastanza simili o poco maggiori rispetto a quelli delle rocce madri. I sedimenti invece formati in ambiente umido presentano una diminuzione nei contenuti, ad eccezione dei granuli polimineralici di Il-Em.

Facendo analoghe considerazioni per i sedimenti derivati da rocce metamorfiche (Fig. 7), si riscontra che l'andamento delle variazioni delle percentuali è diverso. Così, ad esempio, nei sedimenti di ambiente a clima semi-arido il contenuto dei granuli di (Ti)Mt-Em e di (Ti)Mt aumenta bruscamente rispetto a quello delle rocce madri. Nei sedimenti della zona a clima umido invece si nota per i vari minerali opachi un comportamento analogo a quello riscontrato per sedimenti derivati da rocce madri intrusive.

Prendendo dapprima in esame i granuli polimineralici — che come si può ricavare dai valori della Tabella 2 costituiscono buona parte dei minerali opachi con percentuale dal 30 all'80% sul totale di questi — si possono fare varie considerazioni. Ad esempio, la diminuzione degli smistamenti lamellari di magnetite e di ilmenite nei sedimenti rispetto alle rocce madri è attribuibile ad alterazione pedogenetica con trasformazione della magnetite in ematite e dell'ilmenite in rutilo. Gli elevati contenuti degli stessi smistamenti nelle rocce effusive rispetto a quelle intrusive e metamorfiche portano a sostenere la supposizione già evidenziata in letteratura (RIEZEBOS, 1979)

che la loro formazione sia più frequente in condizioni di veloce raffreddamento. Un secondo smistamento lamellare frequente in tutti i campioni esaminati è l'ilmenite-ematite, soprattutto ben rappresentato nei sedimenti a clima umido. Dal comportamento di questi due smistamenti (magnetite-ilmenite ed ilmenite-ematite) sotto diverse condizioni climatiche si deduce che l'ilmenite ha maggiore resistenza all'alterazione della magnetite, confermando quanto già scritto in PETTIJON, 1975.

Questa deduzione trova supporto anche nell'aumento dei contenuti dello smistamento magnetite-ematite e di granuli monomineralici di magnetite, individuato in sedimenti semi-aridi. Come è chiaramente visibile nei diagrammi delle Figure 6 e 7 la magnetite è più stabile in ambiente semi-arido che in ambiente umido.

Sulla base della constatazione che non vi sono state notevoli variazioni fra le percentuali di opachi individuate per le rocce madri delle Montagne Rocciose e quelle dei loro sedimenti, si deduce che le associazioni mineralogiche e le tessiture dei minerali sono state ampiamente conservate durante il processo sedimentario. Di conseguenza i minerali opachi detritici mediante le loro caratteristiche tessiturali e i loro contenuti possono fornire importanti informazioni petrogenetiche sulle rispettive rocce madri.

Interessanti relazioni si possono ricavare dall'esame dei rapporti individuati fra alcuni smistamenti (Tabella 3). Dal confronto fra i valori dei rapporti rocce madri intrusive e sedimenti derivati in ambiente semi-arido, risulta che i valori dei rapporti Il-Em/(Ti)Mt-Em e (Ti)Mt/(Ti)Mt-Em non differiscono molto fra loro, mentre quello del rapporto Il-Em/(Ti)Mt-Il aumenta sensibilmente. Dal confronto fra i valori di questi stessi rapporti per rocce madri metamorfiche e sedimenti relativi risulta che il valore del rapporto (Ti)Mt/(Ti)Mt-Em cala notevolmente mentre aumenta quello del rapporto Il-Em/(Ti)Mt-Il. Detti valori indicano che possono esistere gradi di stabilità diversi per i vari smistamenti. L'aumento nelle sabbie a clima umido dei granuli polimineralici contenenti Em evidenzia che questi sono stati sottoposti ad un lungo

fenomeno di ossidazione.

Tale fatto è ancora più evidente se si confrontano i valori dei rapporti di sabbie provenienti da ambienti climatici diversi e da tipi di rocce madri differenti.

Dai valori del rapporto $\text{Il-Em}/(\text{Ti})\text{Mt-II}$ si può anche dedurre che i granuli polimineralici $(\text{Ti})\text{Mt-II}$ sono instabili. Durante il trasporto e la deposizione, soprattutto in clima umido, si verificano infatti processi di ossidazione con formazione di ematite e distruzione di magnetite.

Da queste indagini iniziali sulle associazioni di minerali opachi si può dedurre che il clima influenza la trasformazione di questi minerali. Su tale base si può tentare di stabilire per i diversi grani polimineralici una scala di stabilità, che in ordine crescente è: magnetite-ilmenite, magnetite-ematite e ilmenite-ematite.

Le analisi preliminari alla microsonda elettronica su grani polimineralici, che hanno conservato le originarie caratteristiche, hanno dimostrato che è possibile risalire alle condizioni chimico-fisiche di formazione di questi ultimi nelle rocce madri (BASU e MOLINAROLI, 1986). Gli smistamenti pertanto possono essere utilizzati come indicatori di condizioni petrogenetiche e quindi di equilibrio chimico-fisico in termini T^0 e f_{O_2} .

Conclusioni

1) I minerali opachi costituiscono circa il 50% dei minerali pesanti nei sedimenti detritici di composizione silicatica. Tra questi minerali i granuli multifase sono presenti in quantità variabili tra il 30 e l'80% con diversi tipi di tessiture e questi smistamenti possono essere considerati effettivi frammenti di roccia;

2) nelle rocce intrusive sono comuni smistamenti di magnetite titanifera con ematite ed ilmenite con ematite. Nelle rocce metamorfiche sono comuni magnetite titanifera e smistamenti di magnetite titanifera con ematite;

3) percentuali simili degli stessi smistamenti sono state riscontrate anche nei sedimenti derivati, specialmente in quelli di clima semi-arido. Ciò suggerisce che il contenuto di questi ossidi opachi detritici può essere uti-

lizzato per fornire informazioni sulle rispettive rocce madri;

4) processi di alterazione, anche pedogenetici, tendono a trasformare magnetite in ematite ed ilmenite in rutilo. In clima umido l'alterazione della magnetite è molto più diffusa di quella dell'ilmenite. Da ciò e dai valori dei rapporti fra alcuni smistamenti può essere dedotta per i vari ossidi una scala di stabilità che in ordine crescente risulta: magnetite-ilmenite; magnetite-ematite e ilmenite-ematite;

5) i dati ottenuti suggeriscono che l'alterazione degli ossidi dovuta alla degradazione e al trasporto non ha distrutto totalmente le informazioni riguardanti la petrogenesi di rocce madri che possono essere ancora conservate nei minerali detritici.

Ringraziamenti. — Si ringraziano le Proff. O Hieke Merlin e L. Menegazzo Vitturi per la lettura critica del manoscritto.

Le ricerche sono state svolte presso il Dep. of Geology, Indiana University, dove E. Molinaroli fruiva di una borsa M.P.I. per studi di perfezionamento all'estero.

La ricerca è stata finanziata dall'U.S.NSF. contributo n. EAR 8407807 Indiana University.

BIBLIOGRAFIA

- BASU A. (1976) - *Petrology of fluvial sand derived from plutonic source rocks: implication to paleoclimatic interpretation*. Jour. Sed. Petr., 46, 694-709.
- BASU A., MOLINAROLI E. (1986) - *Provenance of detrital opaque particles. (abs.)* SEPM Mid-year meeting, 6.
- DARBY D.A. (1984) - *Trace elements in ilmenite: a way to discriminate provenance or age in coastal sands*. Bull. Geol. Soc. Amer., 95, 1208-1218.
- HAGGERTY S.E. (1976 a) - *Oxidation of opaque mineral oxides in Basalts*. In: Oxide Minerals, Miner. Soc. Amer. ed. Short Course, 3, 3, Hg1-Hg98.
- HAGGERTY S.E. (1976 b) - *Opaque mineral oxides in terrestrial igneous rocks*. In: Oxide Minerals, Miner. Soc. Amer. ed. Short Course, 3, 8, Hg101-Hg277.
- HAROLD W. (1978) - *Tectonic lithofacies map of the Appalachian orogen (2 sheets)*. Canadian Contrib., n. 5, IGCP, Proj. 27, Memorial Univ., St. John's, Canada.
- HISCOTT R. (1979) - *Provenance of Ordovician deep-water sandstones, Tournalle formation, Quebec, and implications for initiation of tectonic orogeny*. Can. Jour. Earth Sci., 15, 1579-1597.
- LINDSLEY D.H. (1976) - *Experimental studies of oxide minerals*. In: Oxide Minerals, Miner. Soc. Amer. ed. Short Course, 3, L61-L84.

- LUEPKE G. (1980) - *Opaque minerals as aids in distinguishing between source and sorting effects on beach-sand mineralogy in south-western Oregon*. Jour. Sed. Petr., 50, 2, 489-496.
- OKADA H., ARAI S. (1982) - Abs., 11th ISA Cong., Hamilton, Canada, 84.
- PETTIJON F.J. (1975) - *Sedimentary Rocks*. 3rd. ed., Harper and Row ed., New York, 597 pp.
- RAMDOHR P. (1980) - *The ore minerals and their intergrowths*. International Series in Earth Sciences, 2nd. Ed., Pergamon Press, 35, 1200 pp.
- REYNOLDS I.M. (1984) - *Tectonically deformed ilmenite in Titaniferous iron ores of the Mambula Complex, Zululand, South Africa*. Can. Mineral., 22, 411-416.
- RIEZEBOS P.A. (1979) - *Compositional downstream variation of opaque and translucent heavy residues in some modern Rio Magdalena sands (Columbia)*. Sed. Geol., 24, 197-225.
- RUMBLE D. (1976) - *Oxide minerals in metamorphic rocks*. In: Oxide Minerals, Miner. Soc. Amer. ed. Short Course, 3, R1-R20.
- STENDAL H. (1979) - *Heavy minerals in stream sediments, south-west Norway*. Jour. Geochem. Explor., 10, 91-102.
- STUMPFEL E. (1958) - *Erzmikroskopische Untersuchungen an Schwermineralien in Sanden*. Geol. Jd., 73, 685-724.
- SUTTNER L.J., BASU A., MACK G. (1981) - *Climate and the origin of quartzarenites*. Jour. Sed. Petr., 51, 4, 1235-1246.
- TURNER P. (1980) - *Continental Red Beds*. Developments in Sedimentology, Elsevier Amsterdam, 502 pp.
- VITALIANO C., CORDUA W.S. (1979) - *Geologic map of southern Tobacco Root Mountains, Madison County, Montana*. Geol. Soc. Amer., Map and Chart Series MC-31.