

**DONNÉES GÉOCHIMIQUES SUR LE CUIVRE, LE PLOMB ET LE ZINC
DANS LES SÉDIMENTS PRÉCAMBRIENS
DU BASSIN DU RIO RIBEIRA DE IGUAPE (SUD-EST DU BRÉSIL)
ET DANS LEUR MANTEAU SUPERFICIEL (1)**

J. R. de ARRUDA*, J. YURMANI**, J. M. WACKERMANN***

* Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Brésil.

** Élève de P.O.R.S.T.O.M., Universidade de São Paulo.

*** O.R.S.T.O.M., Universidade de São Paulo.

RÉSUMÉ

L'étude de la distribution du cuivre, du plomb et du zinc dans les arènes d'allération météorique permet de caractériser leur répartition dans les métasédiments précambriens et les trois processus de concentration reconnus : dépôts minéralisés par variations séquentielles et latérales de faciès — remobilisations à la faveur d'accidents tectoniques — enrichissements dus au métamorphisme de contact. La méthodologie de prospection préconisée s'appuie sur des courbes d'iso-écarts-types et porte une attention particulière aux formations calcomagnésiennes et aux variations de faciès sédimentologiques.

MOTS-CLÉS : Brésil. Précambrien. Géochimie. Cuivre. Plomb. Zinc.

RESUMO

O estudo da distribuição do cobre, chumbo e zinco em materiais provenientes de alteração meteórica, permite caracterizar sua repartição nos metassedimentos precambrianos e os tres processos de concentração reconhecidos : variações faciológicas, remobilizações favorecidas por eventos tectônicos e enriquecimento durante o metamorfismo de contato. A metodologia de prospecção indicada baseia-se em curvas do tipo iso-desvios padrão, além de estudos detalhados de formações calcomagnesianas e variações de fácies sedimentares.

PALAVRAS CHAVES : Brasil. Precambriano. Geoquímica. Cobre. Chumbo. Zinco.

ABSTRACT

GEOCHEMICAL DATA ABOUT COPPER, LEAD AND ZINC IN THE PRECAMBRIAN SEDIMENTS OF THE RIO RIBEIRA
DE IGUAPE BASIN (IN THE SOUTH-EAST OF BRAZIL) AND IN THEIR MANTLE

A statistical study, based on copper, lead and zinc contents of the weathered mantle covering precambrian metasediments, furnishes informations about their distributions related with normal formations and enriched areas : sedimentological variations—tectonical structures—contact metamorphism. Geochemical prospecting utilizes maps with standard deviation curves and requires detailed study of the impure limestones and tremolite schists and also of the facies changes.

KEY WORDS: Brazil. Precambrian. Geochemistry. Copper. Lead. Zinc.

(1) Étude s'inscrivant dans le cadre de la convention passée entre l'O.R.S.T.O.M. et l'Université de Sao-Paulo. Travail réalisé grâce au support financier de la FAPESP et du CNPq et à l'aide matérielle et financière de la Compagnie des Ciments Portland MARINGA (São Paulo).

INTRODUCTION

Les formations précambriennes métamorphiques de la région du « Vale do Rio Ribeira de Iguape » (sud de l'État de São Paulo et nord de l'État du Paraná) recèlent d'abondants indices de minéralisations en cuivre, plomb et zinc. Un certain nombre de ces minéralisations ont été exploitées ou le sont encore à l'heure actuelle. L'argent constitue localement un sous-produit des minerais de plomb.

La région a été l'objet de nombreux travaux stratigraphiques, pétrographiques, structuraux, et surtout géologiques (plus de deux cents publications et rapports) et constitue ainsi une des zones les plus étudiées du Brésil. Une compilation de ces travaux, complétée par des observations de terrain et de photographies aériennes, a donné lieu à une synthèse et une carte géologique à l'échelle de 1.100.000 et 1.200.000 (MELCHER *et al.*, 1973), entre les longitudes Ouest 48° et 49° 30' et les latitudes Sud 24° et 25°. L'inventaire des quelque 75 minéralisations répertoriées a été successivement mis à jour par BARBOSA et PASSOS GUIMARAES (1946), MELCHER (1968), CASSEDANNE et MELLO (1970), CASSEDANNE (1972), KNECHT (1974) et les rapports annuels du « Projeto Sudeste do Estado de São Paulo » (C.P.R.M., principalement 1972).

Les monographies relatives aux concentrations les plus importantes ont proposé des modes de genèse variés pour les sulfures primaires : minéralisation hydrothermale liée à une intrusion granitique (BASTIAN, 1946); substitution mésothermale de couches sédimentaires (DAMASCENO, 1967); skarnification minéralisante due au métamorphisme général (DE ARRUDA, 1971); mise en place hydrothermale contrôlée par une structure anticlinale (SOUZA, 1972). Des analyses isotopiques du plomb (DAMASCENO, 1966, CASSEDANNE et LASSERRE, 1969, 1970) ont montré, par ailleurs, que l'âge de cet élément impliqué dans les minéralisations des métasédiments est, en règle

générale, nettement plus ancien (1100 à 1300 MA) que celui des granites voisins (510 à 580 MA). Le programme de recherches géochimiques entrepris par l'Institut de Géosciences de l'Université de São Paulo s'est proposé comme but d'élucider ces divergences ayant trait à la genèse des minéralisations et d'étudier le comportement des trois éléments principaux, impliqués, dans les matériaux d'altération et les sols, afin d'en dégager des règles de prospection.

CADRE GÉOLOGIQUE

Les sédiments précambriens étudiés (environ 3 500 m d'épaisseur) recouvrent, en discordance, un socle cristallin, affleurant dans de rares fonds de vallées et formé de migmatites, gneiss et schistes (Précambrien moyen à inférieur). Ils sont recouverts, dans la partie septentrionale de la région, par des dépôts horizontaux, discordants, constitués principalement par des grès, des arkoses, des conglomérats, des tillites, d'âge dévonien (formation *Furnas*) et permo-carbonifère (groupe *Tubarão*). Leur sédimentation s'est ainsi opérée durant le Précambrien supérieur (groupe *Açungui* ou *São Roque*). L'étude de leurs caractères sédimentologiques (PETRI et SUGUIO, 1969) a permis de proposer une chronologie relative des formations précédemment distinguées par MARINI *et al.* (1967). La formation la plus ancienne (*Selwa*), constituée de gneiss, quartzites, schistes et metabasites, est surmontée par trois formations contemporaines, individualisées par des variations latérales de faciès : les séricitoschistes et les quartzites sont omniprésents mais alternent avec des calcaires, des conglomérats et des faciès rythmiques dans la formation *Voluvera* (sud), avec des dolomites (présence de « *Gryptozoon* ») dans la formation *Capiru* et avec des faciès aréno-dolomitiques (présence de « *Collenia* ») dans la formation *Itaiacoca* (ou *Agua Clara*, au nord). Néanmoins la densité des

TABLEAU I

Paramètres des distributions du cuivre, du plomb et du zinc dans les métasédiments non allérés des zones F et T. Valeurs des moyennes \bar{x} et des écarts-types 1s, 2s et 3s en grammes/l (g/l ou p.p.m.)

Formations	Cuivre						Plomb						Zinc					
	n	\bar{x}	p	1s	2s	3s	n	\bar{x}	p	1s	2s	3s	n	\bar{x}	p	1s	2s	3s
Schistes à séricites.....	26	42	2,71	114	309	840	25	12	1,75	21	37	64	27	65	2,13	138	293	622
Schistes à chlorites.....	5	53	2,12	112	237	500	5	9	1,54	14	22	34	5	36	1,85	67	125	232
Schistes à trémolites.....	29	36	2,85	103	295	843	30	14	1,57	22	35	54	31	78	2,19	171	375	822
Quartzites.....	11	28	3,43	96	329	1128	12	10	1,85	19	36	69	12	21	3,23	68	220	713
Calcaires.....	19	22	2,36	52	123	291	19	13	1,55	20	31	47	19	23	3,17	73	232	735

failles est à l'origine d'un compartimentage en nombreux blocs structuraux indépendants qui rend délicate l'ébauche de séquences stratigraphiques à caractère régional.

Les traits sédimentologiques observés dans l'ensemble de la région, tels que la fréquence de stratifications entrecroisées et de ripple-marks, la prédominance de termes psammitiques et de successions cycliques, la présence de stromatolithes de type « Collenia », attestent une genèse marine en milieu littoral. Les variations géographiques de ces traits conduisent PETRI et SUGUO (*op. cit.*) à en déduire une zonalité entre le sud (influence marine plus marquée) et le nord (milieux continentaux et mixtes). Après leur dépôt, ces sédiments ont subi l'action d'un métamorphisme général de type « schistes verts » à « amphibolites » et qui conserve généralement les traits sédimentaires initiaux. Un gradient, croissant du nord-ouest vers le sud-est, a été noté lors des études à caractère régional (MELFI *et al.*, 1965).

De nombreux massifs granitiques ont été cartographiés par MELCHER *et al.* (*op. cit.*). Des massifs concordants avec la structure régionale (nord-est), de faciès équigranulaire à porphyroïde, montrent localement, soit des passages graduels avec les sédiments encaissants, soit des bordures nettes et discordantes, pouvant être accompagnées d'une auréole de métamorphisme de contact. Une synthèse chronologique faite par CORDANI et KAWASHITA (1971), à partir de datations par rubidium-strontium, indique un âge de 650 MA pour la phase orogénique principale (ceinture Ribeira du Cycle brésilien), responsable de la mise en place des granites concordants, du métamorphisme général des dépôts sédimentaires antérieurs et des plis et failles d'orientation générale nord-est. Néanmoins nous avons pu observer sur le terrain et les photographies aériennes des blocs où ces traits structuraux de direction nord-est se superposent, en les effaçant partiellement, à des traits de direction grossièrement perpendiculaire, suggérant localement une phase orogénique antérieure, soulignée par des dykes intrusifs, basiques, mésozoïques. Celle-ci pourrait correspondre au Cycle Minas-Uruaçu, identifié plus au nord et daté à -900 à -1 300 M.A., âge compatible avec ceux des sédiments concernés (plomb). Les massifs granitiques porphyroïdes, tarditectoniques, se sont mis en place entre -600 et -650 M.A., alors que les intrusions post-tectoniques ont un âge d'environ 540 M.A.

DISTRIBUTION DU CUIVRE, DU PLOMB ET DU ZINC DANS LES SÉDIMENTS PRÉCAMBRIENS ET LEUR COUVERTURE MÉTÉORIQUE

Afin de disposer d'une densité de données exploitables statistiquement, quatre zones ont été étudiées en détail :

« F » et « T »	: longitude Ouest	48° 54'	—	latitude Sud	24° 00'
« D »	—	48° 43'	—	—	24° 16'
« P »	—	48° 56'	—	—	24° 50'

Sédiments non altérés

Les tests graphiques indiquent que le modèle de distribution gaussienne, en fonction du logarithme des teneurs (« log-normale ») s'avère le mieux adapté à la représentation de la répartition des concentrations de chacun des trois éléments dans chaque formation sédimentaire. Dans le cas général, les courbes cumulatives, représentant les pourcentages d'échantillons inférieurs et égaux à une teneur donnée, sont monomodales. Elles peuvent alors être définies par la valeur de la moyenne t des teneurs (correspondant au pourcentage 50) et la pente p de la droite représentative, ou la teneur relative à un écart-type ($1s$, soit 84,0 %).

Le tableau I indique les valeurs de ces paramètres pour les formations saines rencontrées (n échantillons) dans les zones F et T, en écartant les échantillons à minéralisation visible. La moyenne t fournit une estimation, couramment utilisée, du fond géochimique de chaque sédiment. Les valeurs $2s$ (2 écarts-types, soit 97,7 %) et $3s$ (3 écarts-types, soit 98,87 %) correspondent aux limites anomalous préconisées respectivement par LEPÉLTIER (1969), pour les prospections à mailles larges, et par MEZENCEV (1964), pour les investigations à mailles resserrées. Elles marquent les seuils au-delà desquels la probabilité qu'une teneur plus forte fasse partie de la distribution concernée (de basses teneurs) est quasi nulle. Les teneurs plus élevées sont ainsi anomalous, correspondant à une autre distribution, de teneurs élevées, ou à des concentrations accidentelles. Ce sont ces enrichissements, anomaux par rapport à la distribution de fond d'un élément, qui peuvent présenter un intérêt économique. Ils ont une probabilité de dépasser les seuils d'exploitabilité (Cu : 1 %, Pb et Zn : 4 %) d'autant plus grande que les limites anomalous sont élevées. Les seuils $2s$ et $3s$ élevés caractérisent les distributions à moyenne et (ou) à pente fortes. Ainsi pour les zones F et T les limites d'anomalies sont maximales pour les trois éléments contenus dans les faciès de schistes à tremolites. Ces métasédiments présentent fréquemment des structures rythmiques, avec des alternances de couches plus ou moins riches en quartz, calcite, amphiboles et séricites, avec accessoirement des feldspaths, des épidotes et des chlorites. A l'opposé, l'ensemble des paramètres relatifs aux calcaires (clairs, pauvres en silicates, dans ces zones) sont les plus faibles.

Dans la zone D les diagrammes de fréquences cumulées montrent que dans les faciès schisteux sains la distribution du plomb est monomodale

($\bar{t} = 19$ g/t, $p = 1,63$) alors que celle du cuivre et du zinc correspond à une superposition de deux distributions. L'une à teneurs basses (Cu : $\bar{t} = 16$ g/t, $p = 3,58$ — Zn : $\bar{t} = 23$ g/t, $p = 5,43$), l'autre à teneurs élevées (Cu : $\bar{t} = 25$ g/t, $p = 3,10$ — Zn : $\bar{t} = 62$ g/t, $p = 2,58$). L'étude des lames minces indique que les teneurs fortes coïncident avec les passées arkosiques (feldspaths sodiques).

Les valeurs des coefficients de corrélation de Pearson, calculés à partir des logarithmes des teneurs dans les métasédiments sains (distribution log-normale) et dépassant les seuils de signification pour une probabilité de 0,01 donnent des indications sur les liaisons entre les éléments dans chaque formation. Les teneurs en *cuivre* et en *zinc* varient dans le même sens dans les *schistes à séricites* et dans les *calcaires* alors que dans les *schistes à trémolites* ce sont les teneurs en *plomb* qui varient conjointement avec celles du *zinc*.

Le report des pourcentages des trois éléments sur des diagrammes triangulaires montre une large dispersion des points représentatifs des échantillons relatifs à un faciès donné. Mis à part les granites, regroupés près de la base plomb-zinc (pauvreté relative en cuivre), les autres formations ne présentent pas de groupements caractéristiques pour ce qui concerne les roches non altérées.

Influence de l'altération superficielle

Des coupes verticales étudiées dans les zones F, T et P (44 profils) permettent d'évaluer l'influence des processus supergènes sur les teneurs des trois éléments et sur les paramètres de leur distribution. Les minéraux aluminosilicatés s'altèrent, dans l'ensemble de la région, en kaolinite (les chlorites partiellement en pseudo-chlorites), les séricites, et dans une moindre mesure les trémolites, étant relativement résistantes. Le fer passe dans les hématites et goethites, dispersées dans l'argile secondaire ou sous forme de concrétions et pellicules dans l'horizon pédologique. Les calcaires se dissolvent très progressivement en laissant un matériel poreux résiduel, à quartz et séricites, localement marqué par des cristallites secondaires de taille micrométrique. Les couches quartzitiques sont très résistantes et alimentent la majeure partie des graviers de l'horizon superficiel. Les carbonates et oxydes supergènes de cuivre, plomb et zinc n'ont pu être rencontrés dans les matériaux d'altération et les sols formés sur les sédiments non minéralisés (absence de sulfures, phosphates ou carbonates initiaux). Les trois éléments sont donc liés aux silicates résiduels, aux argiles et aux oxydes-hydroxydes secondaires. Ces liaisons font l'objet d'une étude en cours. L'horizon pédologique superficiel (de type « latosol ») est principale-

ment formé de matériaux colluvionnaires (riches en débris de roche de taille centimétrique). Son épaisseur est généralement de 20 à 30 cm sur les pentes faibles et n'atteint 40 à 50 cm qu'à la base des versants à pentes fortes.

L'analyse de deux profils de la zone T (pentes de 30 %) fournit des indications concordantes. Les schistes sériciteux sont altérés sur 3 mètres en un matériau à structure conservée ; le sol, constitué en grande partie de colluvions (débris rocheux mélangés), atteint une épaisseur de 20 cm. Les variations relatives des teneurs par rapport aux valeurs trouvées à la base des profils montrent un accroissement graduel vers le haut des profils, y compris dans les sols, pour les trois éléments (tableau II).

TABLEAU II

Variations relatives des teneurs dans deux profils T

Profondeur (m)	Cuivre	Plomb	Zinc
0,20	2,2	1,4	2,5
1,00	2,6	1,3	2,0
1,50	1,5	1,3	1,4
3,00	1,0	1,0	1,0

Les matériaux résiduels superficiels concentrent ainsi nettement le cuivre et le zinc, et dans une moindre mesure le plomb, par rapport au substratum. L'analyse de deux fractions séparées du même échantillon, prélevé à 1 m de profondeur, précise que la concentration des trois éléments est sensiblement plus élevée dans les fractions fines que dans les résidus rocheux et graviers de taille supérieure à 2 mm : rapport de 1,5 pour le cuivre et le plomb, de 2,0 pour le zinc.

D'autre part, l'étude statistique de 13 profils sur schistes à séricites, 9 profils sur schistes à trémolites et minéraux calcosilicatés, 20 profils sur quartzites, dans la zone P, fournit des précisions sur l'évolution des paramètres des distributions des éléments à 20, 40, 60, 80, 100 cm de profondeur. La figure 1, qui illustre ces variations, montre que la moyenne relative au cuivre baisse progressivement vers la surface, à partir de 1 m, pour les schistes sériciteux et les quartzites, alors qu'elle augmente légèrement au-dessus de 60 cm pour les schistes calcomagnésiens. La moyenne relative au plomb dans les quartzites est très stable ; elle baisse très légèrement pour les schistes potassiques et augmente, au contraire, au-dessus de 60 cm pour les schistes calcomagnésiens. Pour le zinc on note un léger accroissement dans les

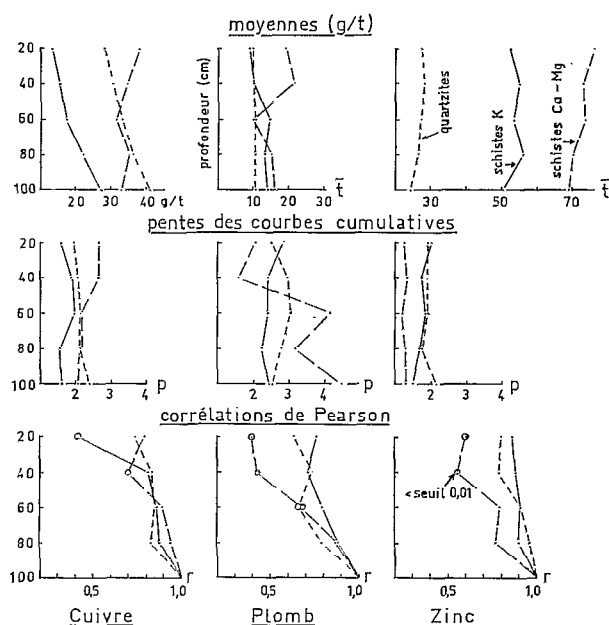


Fig. 1. — Variation des paramètres des distributions en fonction de la profondeur.

trois catégories de profils. Ainsi l'arène et le sol dérivant des faciès calcomagnésiens, les plus altérables parmi les différentes formations, concentrent le plus les trois éléments étudiés.

La *pente* des courbes cumulatives, liée à l'écart-type, fournit également une appréciation du *contraste* géochimique : en effet lorsque la gamme des teneurs est large (contraste fort entre teneurs élevées et basses) la pente de la droite cumulative est faible, et inversement. On note ainsi sur la figure 1 que la pente, et par voie de conséquence le contraste, varient peu pour le cuivre et le zinc (léger accroissement de la pente pour le cuivre des schistes calcomagnésiens). En ce qui concerne le plomb, le contraste diminue légèrement dans les horizons superficiels pour les schistes sériciteux et les quartzites, et augmente nettement, au contraire, pour les schistes calcomagnésiens.

Les *coefficients de corrélation de Pearson* entre les teneurs (valeurs logarithmiques) à une profondeur donnée dans l'ensemble des profils d'une catégorie de faciès et les teneurs mesurées à la base de ces mêmes profils (1 mètre) permettent de sélectionner les niveaux qui fournissent une image satisfaisante de la distribution des teneurs en profondeur. En règle générale les coefficients, toujours positifs, décroissent progressivement vers le haut. Les valeurs restent supérieures aux seuils correspondant à une probabilité de 0,01 dans les quartzites et les schistes à séricites, sauf pour le cuivre dans les sols superficiels

recouvrant les schistes (figure 1). En ce qui concerne les faciès calcomagnésiens, les coefficients sont inférieurs au seuil dans les horizons superficiels jusqu'à la profondeur de 40 cm pour le cuivre et le zinc, jusqu'à 60 cm pour le plomb.

Globalement, les variations des trois paramètres sont peu marquées pour des profondeurs dépassant 60 cm, même dans le cas des faciès à trémolites et silicates calciques pour lesquels les oscillations sont maximales. L'obtention d'une image représentative des distributions de teneurs dans le socle est donc conditionnée par des prises d'échantillons au-dessous de 60 cm. Les études géochimiques par réseau de mailles faites dans les zones F, T et P ont ainsi été effectuées à partir d'échantillons prélevés aux profondeurs 60-80 cm. De plus, l'absence de rupture marquée dans l'ensemble des courbes de la figure 1 indique que les transferts latéraux superficiels, mécaniques ou chimiques, sont de faible extension et entraînent peu de mélanges de matériaux issus de faciès différents ou de zones minéralisées.

DISTRIBUTION DANS LES ARÈNES MÉTÉORIQUES DE ZONES MINÉRALISÉES

Il ressort des données du chapitre précédent que chaque formation est caractérisée par une distribution log-normale des éléments en traces présents, même dans le cas de sédiments rythmiques (faciès à trémolites). Lorsque cette distribution est plurimodale, le lot d'échantillons s'avère englober des matériaux de composition différente par suite de variations séquentielles ou latérales de faciès.

Les échantillons minéralisés sont généralement considérés comme correspondant à des valeurs anormales par rapport à la distribution de l'élément dans l'ensemble de la formation. Si tel est le cas pour les sulfures dispersés dans une formation, il n'en est pas de même pour les zones minéralisées étendues. En l'absence d'un échantillonnage systématique de matériaux sains dans une telle zone il est possible d'étudier la distribution des teneurs à partir des données géochimiques de surface. Nous avons vu, en effet, que la distorsion des distributions du cuivre, du plomb et du zinc, dans l'arène météorique, est relativement faible.

Nous avons pu observer trois types de minéralisations dans les métasédiments précambriens de la région :

— Les couches minéralisées, liées à un faciès sédimentaire donné et concordantes avec les traits sédimentologiques (stratiformes, stratifications entrecroisées, boudinages). Leur épaisseur varie du simple lit millimétrique à la formation, exploitable, de un à quelques mètres de puissance. Des variations latérales de faciès provoquent le passage de minéra-

lisations sulfurées à des minéraux carbonatés, phosphatés, barytifères et à l'encaissant stérile (BARBOUR et DE OLIVEIRA, 1979); cette même séquence peut être reproduite à l'échelle de boules décimétriques à couches concentriques successives (minéralisation plombo-zincifère de Perau).

— Les zones minéralisées liées à des structures et matériaux d'origine tectonique (failles, plis à faible rayon de courbure). La perméabilité et la porosité de ces zones ont facilité les transferts et la fixation des éléments, initialement dispersés dans les sédiments encaissants, sous l'action du métamorphisme général ou de l'altération météorique. Une minéralisation cuprifère de ce type, liée à une structure anticlinale, a été décrite par SOUZA (1972).

— Les minéralisations liées à des auréoles de métamorphisme de contact et au pyrométamorphisme général. Elles constituent une grande partie des indices et gisements de plomb, notamment à Panielas et Rocha où cet élément, dispersé dans les calcaires et à point de fusion bas, a été reconcentré au mur de filons acides et basiques s'ils sont inclinés, sur les deux parois s'ils sont verticaux. Le skarn cuprifère de Santa Blandina (DE ARRUDA, 1971) peut être classé dans cette catégorie (pyrométamorphisme sans liaison directe avec le granite affleurant proche).

Les trois catégories de minéralisations ont été respectivement rencontrées dans les zones P, T et F pour lesquelles nous disposons d'échantillons d'arènes prélevés selon un réseau de 100×50 m (profondeur 60-80 cm).

Minéralisation concordante

Dans la zone d'étude P les diagrammes cumulatifs de fréquence montrent que le cuivre et le plomb sont distribués de façon bimodale dans les schistes à trémolites, alors que dans les quartzites et les schistes à séricites la distribution du cuivre correspond à la superposition de trois courbes différentes (fig. 2).

Le report des pourcentages respectifs des teneurs en cuivre, plomb et zinc sur des diagrammes triangulaires indique, pour chaque faciès, un regroupement des points figuratifs en nuages denses et à contours définis, alors que dans le cas des roches saines les points s'avèrent nettement plus dispersés. Dans le cas des distributions non unimodales le diagramme triangulaire permet de distinguer le nuage de points correspondant à la distribution de teneurs élevées (B) du nuage de points relatif à la distribution de teneurs basses (A), ainsi que les points isolés ou le nuage de points (C) correspondant à des concentrations anormales de l'un des éléments par rapport à l'une ou l'autre distribution. Ainsi sur le diagramme de la figure 3 les trois groupements de points A, B

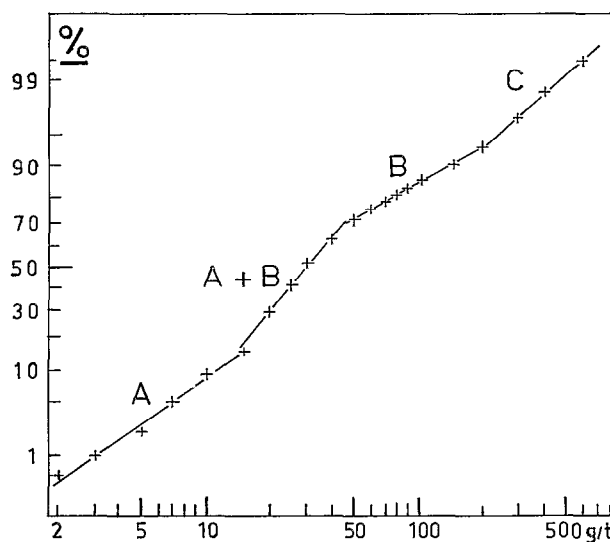


Fig. 2. — Diagramme des fréquences cumulées des teneurs en cuivre dans l'arène sur schistes sériciteux de la zone P.

et C correspondent aux trois segments de courbes cumulatives A, B et C, relatives à la distribution du cuivre dans les schistes à séricites. Les nuages de points permettent ainsi de classer les échantillons dans l'une ou l'autre distribution, alors que sur les diagrammes cumulatifs ou sur les histogrammes les différentes courbes interfèrent les unes sur les autres (interférence apparente A+B et interférence non apparente B+C dans le cas de la figure 2).

Les courbes cumulatives de fréquences correspondant à chacun des groupes A, B et C des trois éléments, déterminés au moyen des diagrammes triangulaires relatifs à chaque formation, se révèlent bien unimodales. Leurs paramètres sont rassemblés dans le tableau III. Les quartzites, les schistes à séricites et à trémolites révèlent une double distribution de teneurs en cuivre : la distribution des fortes teneurs possède des seuils anormaux élevés, particulièrement pour les schistes à trémolites. Par contre les seuils d'anomalies et les teneurs anormales rencontrées dans 18 échantillons de quartzites et schistes sériciteux sont faibles.

Le report des échantillons correspondant à l'ensemble des distributions de teneurs élevées en cuivre (groupe B) sur une carte géologique montre que ceux-ci sont disposés en strates parallèles aux limites des trois formations concernées. Une première strate de teneurs élevées se situe au toit des quartzites et au mur des schistes à séricites qui leur sont superposés ; une deuxième se situe à la base des schistes à trémolites et déborde localement sur la formation calcosilicatée ou sur les schistes sériciteux auxquels ils succèdent stratigraphiquement.

TABLEAU III

Paramètres des distributions dans les arènes de la zone P

	Teneurs basses						Teneurs élevées						Concentrations anormales					
	n	\bar{t}	p	1s	2s	3s	n	\bar{t}	p	1s	2s	3s	n	\bar{t}	p	1s	2s	3s
Cuivre																		
Schistes à séricites.....	144	23	1,83	42	77	140	50	79	2,01	159	320	644	10	348	1,45	505	733	1063
Schistes à trémolites.....	47	29	1,65	48	79	132	18	183	1,89	346	654	1237						
Faciès calcosilic.....	21	22	1,53	34	53	81							1	(282)				
Quartzites.....	30	21	1,91	40	76	145	28	53	2,36	125	295	695	8	163	1,95	318	620	1210
Plomb																		
Schistes à séricites.....	204	19	2,34	44	102	236							1	(570)				
Schistes à trémolites.....	60	9	3,61	32	114	405	5	46	3,09	142	438	1353						
Faciès calcosilic.....	22	12	2,52	30	75	188												
Quartzites.....	62	7	3,39	24	82	282												
Zinc																		
Schistes à séricites.....	203	66	1,72	114	197	340	2	(310)										
Schistes à trémolites.....	65	76	1,48	112	165	243												
Faciès calcosilic.....	22	64	1,28	82	105	135												
Quartzites.....	66	27	2,11	57	120	254												

Ainsi les conditions sédimentaires favorables à la concentration du cuivre sont optimales dans le faciès à trémolite (magnésien) mais peuvent être également remplies à la faveur de changements de faciès. BARBOUR et DE OLIVEIRA (*op. cit.*) ont observé une liaison analogue en ce qui concerne le plomb, le zinc, le cuivre et le baryum (au toit), concentrés dans des conglomérats et brèches intraformationnelles déposés entre des schistes à séricites et trémolites et des schistes calcaires. Un deuxième niveau riche en cuivre est localisé au passage entre un faciès clastique et un faciès chimique.

Dans la zone P des diverticules à fortes teneurs, perpendiculaires aux strates décrites précédemment, peuvent être localement expliqués par l'existence d'un colluvionnement important sur des pentes fortes, mais dans le cas général ils correspondent à des variations latérales de faciès (conditions sédimentaires) à la faveur de chenaux, larges d'environ 200 m, dont l'influence peut se poursuivre au-delà des variations séquentielles, générales, de faciès. Les échantillons à teneurs élevées en plomb, en nombre réduit par rapport au cuivre, se situent également au droit de ces strates et diverticules. La distribution relative du groupe C, susceptible d'un intérêt économique du point de vue des teneurs, représente ainsi une variation anormale des

conditions de la sédimentation par rapport à la sédimentation responsable des teneurs du groupe B. La notion de gisement est également tributaire du volume que représente cette sédimentation anormale.

Le calcul du coefficient de corrélation de Pearson entre les teneurs relatives aux différents groupes montre que les liaisons entre les éléments ne sont pas modifiées d'un groupe A au groupe B. On note ainsi des corrélations positives fortes cuivre-plomb et cuivre-zinc dans les deux groupes d'échantillons sur schistes et quartzites, l'absence de coefficient significatif en ce qui concerne les autres formations. Les teneurs anormales en cuivre et plomb correspondent, au contraire, à des valeurs très faibles des coefficients (sauf en ce qui concerne le cuivre et le zinc des quartzites), rompant ainsi les liaisons originelles dues aux processus sédimentaires normaux.

Minéralisation liée à un accident tectonique

La zone d'investigation T est marquée par des minéralisations cuprifères, en très minces lits locaux dans les schistes à trémolites et en imprégnations plus massives dans un matériau bréchique. Les affleurements et les tranchées n'ont permis que la

TABLEAU IV

Paramètres des distributions dans les arènes de la zone T

	Teneurs basses						Concentrations anormales					
	n	\bar{t}	p	1s	2s	3s	n	\bar{t}	p	1s	2s	3s
Cuivre												
Schistes à séricites.....	21	35	2,15	75	161	344	3	(65)	(2,33)	(151)	(351)	(815)
Schistes à chlorites.....	42	54	1,49	80	119	176	1	(120)				
Schistes à trémolites.....	37	101	1,56	158	247	387	6	437	2,18	953	2078	4532
Calcaires.....	28	49	1,33	65	86	114						
Granites.....	28	7	1,67	12	21	35						
Plomb												
Schistes à séricites.....	23	25	3,16	79	250	789	1	(152)				
Schistes à chlorites.....	41	28	1,39	39	54	76	2	(160)				
Schistes à trémolites.....	40	34	1,75	60	106	187	3	(414)	(1,77)	(733)	(1298)	(2298)
Calcaires.....	28	32	1,61	52	85	137						
Granites.....	28	23	1,43	33	47	68						
Zinc												
Schistes à séricites.....	24	33	2,45	81	199	488						
Schistes à chlorites.....	43	56	1,48	83	123	182						
Schistes à trémolites.....	43	85	1,58	134	211	333						
Calcaires.....	28	66	1,52	100	152	230						
Granites.....	28	34	1,52	52	80	122						

découverte de carbonates de cuivre (principalement la malachite) mais la présence de sulfures en profondeur est vraisemblable (comparaison avec des indices proches, analogues). La zone de brèche apparaît liée à une structure de pli-faille visible à l'affleurement et précisé par des mesures de magnétométrie et d'électromagnétisme.

La représentation graphique des fréquences cumulées de teneurs et les diagrammes triangulaires montrent que dans ce cas il n'apparaît qu'un groupe de teneurs correspondant à une distribution de fond, unique, pour les trois éléments, dans chacune des formations. Les points figuratifs qui s'écartent des groupes A, en se rapprochant de l'un des sommets du triangle cuivre-plomb-zinc, correspondent à des teneurs anormales. Celles-ci sont élevées, en ce qui concerne le cuivre, pour les schistes à trémolites, qui possèdent également un fond géochimique supérieur à celui des autres faciès (tabl. IV). Les échantillons à concentrations anormales sont localisés dans la zone du pli faillé. Les courbes d'isoteneurs tracées sur une carte géologique montrent effectivement un enrichissement net pour le cuivre et le plomb à l'intersection de la structure du pli-faille avec les schistes à trémolites.

Les coefficients de Pearson indiquent, pour les teneurs de fond dans les arènes, des corrélations positives fortes (supérieures au seuil de probabilité 0,01) pour les trois couples cuivre-plomb, cuivre-zinc et plomb-zinc à l'aplomb des schistes à séricites et à chlorites ; pour les couples cuivre-plomb et plomb-zinc dans les schistes à trémolites et pour le seul couple cuivre-zinc dans les arènes sur faciès calcaires. La comparaison avec les corrélations observées pour les teneurs dans les roches saines de l'ensemble des zones F et T montre que l'altération météorique maintient les corrélations spécifiques des roches saines (cuivre-zinc dans les micaschistes et les calcaires, plomb-zinc dans les schistes à trémolites) mais y surajoute des variations conjuguées de teneurs pour les couples cuivre-plomb dans les schistes à séricites, chlorites et trémolites et plomb-zinc dans les schistes à séricites (et chlorites). Par contre, les enrichissements anormaux, correspondant aux transferts hypogènes (métamorphisme général ou dynamométamorphisme) et (ou) supergènes du cuivre et du plomb, dispersés ou en fines couches dans les schistes à trémolites, vers la zone-piège bréchique, poreuse et perméable, effacent ces corrélations initiales.

Minéralisation liée à une auréole de métamorphisme de contact

La carte d'isoteneurs en cuivre de la zone F fait ressortir deux ensembles à fortes teneurs, correspondant à des schistes à trémolites situés au contact d'un granite dioritique, hétérogène, à grain variable, localement riche en biotites. L'étude d'affleurements, de coupes et de puits montre que le granite est intrusif (apophysés) dans les schistes à amphiboles et dans les calcaires situés à leur mur. Au contact, sur une épaisseur d'ordre décimétrique à métrique, ou dans des enclaves, on observe l'existence non généralisée, de minéraux dus à un métamorphisme de contact. Les tactites (skarns) qui en résultent sont constitués de pyroxènes (diopside) et grenats toujours zonés (grossulaire), d'épidotes en bâtonnets, de microcline, de talc, d'apatite et de gerbes de trémolite, dans une matrice de quartz microcristallin. Des sulfures, ou carbonates secondaires, de cuivre y apparaissent par endroits, mais l'ensemble de ces tactites est caractérisé par des teneurs générales élevées en cuivre.

Les paramètres des distributions des teneurs dans l'arène formée à partir de ces skarns sont rassemblés dans le tableau V. La moyenne et les teneurs d'écart-types relatives au plomb et au zinc sont comparables aux valeurs de la distribution des teneurs basses dans l'arène résultant des schistes amphiboliques de la zone voisine T (tabl. IV). Par contre, en ce qui concerne le cuivre, ces valeurs sont nettement accrues, mais inférieures à celles dues à la remobilisation dans la partie tectonisée de la zone T (tabl. IV). Comme dans les autres cas de concentrations anormales, les coefficients angulaires p des courbes de fréquences cumulées relatifs aux trois éléments sont accrues par rapport à ceux des distributions de fond. D'autre part, la zone de skarns est caractérisée par un coefficient de corrélation positif, supérieur au seuil de probabilité 0,01, pour le couple de teneurs cuivre-zinc.

TABLEAU V

Paramètres des distributions dans les tactites de la zone F (42 échantillons d'arènes sur schistes à trémolites) (teneurs 1 et 1s, 2s et 3s en g/t)

	\bar{t}	p	1s	2s	3s
Cuivre.....	244	2,16	527	1138	2458
Plomb.....	31	2,67	83	222	595
Zinc.....	47	2,23	105	235	524

MÉTHODOLOGIE DE PROSPECTION GÉOCHIMIQUE

L'ensemble des observations de terrain et de laboratoire, ainsi que les données géochimiques exposées ci-dessus, permettent d'élaborer une méthodologie de prospection géochimique des trois éléments adaptée aux formations métasédimentaires précambriennes et à leur couverture météorique dans le sud-est du Brésil. Cette méthode a été notamment testée dans les zones F et T. Les étapes successives sont les suivantes :

— Reconnaissance géologique générale du secteur : prise d'échantillons de roches saines (affleurements accessibles) et étude structurale régionale (mesures sur le terrain et aéro-photo-interprétation). Une attention spéciale est requise vis-à-vis des schistes à trémolites, des schistes à épidotes (pouvant dériver de feldspaths ou d'amphiboles, donc indicateurs de tactites ou de faciès magnésiens), des calcaires de couleur foncée (présence de silicates liés aux trois éléments), des contacts entre deux faciès sédimentaires de nature différente et des intrusions ignées. L'analyse microscopique et diffractométrique des échantillons sert à dresser une ébauche de carte géologique et à classer les données analytiques sur les éléments en traces selon les faciès. Pour chaque formation les courbes de fréquences cumulées et les diagrammes triangulaires (ou les dendogrammes) servent à identifier les groupes de teneurs de fond (basses), élevées ou anormales. L'existence de ces deux derniers groupes dans une formation constitue un indice favorable à la présence de minéralisations.

— Une prospection géochimique superficielle peut être réalisée sur un ou plusieurs secteurs si l'étude précédente a révélé l'existence de caractères favorables pour une minéralisation : formation à teneurs anormales ou élevées (distinctes du fond), présence d'accidents tectoniques ou de tactites au contact d'intrusions ignées. Dans les zones F et T cette phase a été entreprise par suite de l'existence de telles structures et de teneurs anormales : supérieures à 1 000 g/t pour le cuivre et 400 g/t pour le plomb. La maille utilisée (100 × 50 m) s'est révélée judicieuse puisque la superposition ultérieure d'une maille 50 × 50 m, afin de détailler les aires à fortes teneurs, n'a pas révélé d'autres groupes de teneurs anormales. Dans un premier stade sont analysés les échantillons correspondant à une maille 100 × 100 m. Des analyses complémentaires sont ensuite effectuées sur les échantillons intermédiaires, récoltés initialement, pour les seules aires à fortes teneurs. La profondeur de prélèvement, à la tarière, entre 60 et 80 cm, est adaptée aux arènes et sols de la région. Pour des sols à caractères particuliers, des tests préalables sont indispensables. Les teneurs en éléments traces (dosage sur la fraction fine, inférieure

à 2 mm) font l'objet de tests de regroupements, pour chaque faciès, soit à l'aide de diagrammes rectangulaires (2 éléments), triangulaires (3 éléments) ou d'analyse par la méthode des grappes (plus de 3 éléments). Les histogrammes ou les courbes cumulatives relatifs à chacun des groupes servent à tester la nature unimodale de la distribution d'un élément dans chaque groupe.

Les paramètres des distributions obtenues permettent alors une nouvelle sélection des faciès et structures favorables à l'obtention de teneurs anormales. Ils servent également à la transformation des teneurs en valeurs d'écart-types, relatives à chaque distribution dans chaque faciès. Cette transformation peut être obtenue à l'aide des courbes de fréquences cumulées ou, plus rapidement, par la régression linéaire basée sur les deux couples de valeurs : $\log. \bar{t}$ — écart-type = 0 et $\log(ls)$ — écart-type = 1. Les données obtenues permettent l'établissement d'une carte à courbes d'iso-écart-types, pour chacun des éléments. L'emploi de ces courbes est préférable à celles représentant les iso-teneurs car elles permettent de classer chaque teneur par rapport à la distribution dont elle fait partie. Ainsi, selon l'exemple de la zone T reproduit dans la figure 4, une teneur de 100 g/t en cuivre correspond au fond géochimique (écart-type = 0) dans l'arène sur les schistes à trémolites alors que sur les schistes à séricites la même teneur correspond à un écart-type de 1,4 et sur le granite porphyroïde à un écart-type de 4,9 (valeur fortement anormale). Cette représentation banalise les teneurs, même élevées, sans intérêt géologique et fait ressortir, à l'opposé, les aires correspondant à des enrichissements anormaux quels que soient les faciès concernés. Sur la figure 3 apparaît nettement une aire centrale anormale liée à l'intersection d'un pli faillé avec des schistes à trémolites ou à épidotes et séricites. L'aire anormale située en haut de la carte n'apparaît pas avec les courbes d'isoteneurs (schistes à séricites). En outre, on distingue nettement les déformations des courbes, dues à des transferts latéraux sur les pentes très fortes, par opposition aux aires caractérisées par des teneurs inférieures aux différents fonds des formations.

Les corrections généralement apportées aux valeurs brutes des teneurs, pour tenir compte de l'appartenance de l'échantillon à un type donné de faciès géochimique et du degré d'altération du matériau prélevé, sont rendues inutiles. En effet les paramètres de la distribution des teneurs dans l'arène superposée à un type de faciès fournissent des critères de sélection des seuils anormaux spécifiques du faciès lithologique et du matériau altéré rencontré à la profondeur de prélèvement choisie.

— La troisième phase de l'investigation concerne

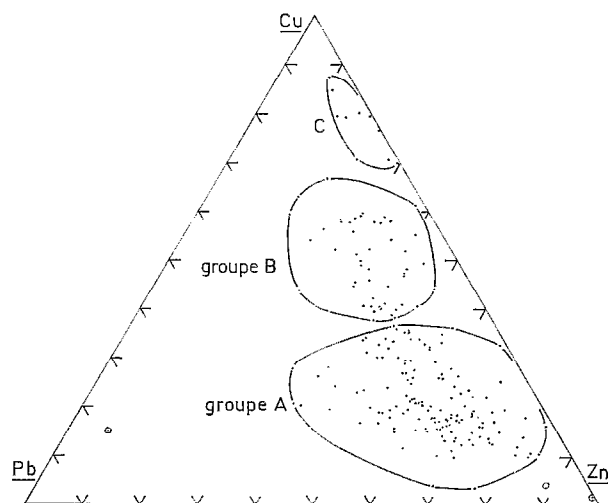


Fig. 3. — Pourcentages des teneurs en cuivre, plomb et zinc dans l'arène sur schistes sériciteux de la zone P.

les secteurs délimités par des valeurs dépassant 3 écarts-types sur les cartes décrites ci-dessus. Cette limite s'est révélée judicieuse : les puits et tranchées ont révélé la présence de minéralisations, à teneurs dépassant le seuil d'exploitabilité, exclusivement dans ces secteurs. L'extension des anomalies dans l'arène apparaît peu différente de celle trouvée dans le soubassement. L'auréole de dispersion autour des minéralisations ne dépasse pas quelques dizaines de mètres.

En ce qui concerne les seuils de teneurs anormales à prendre en considération, d'après les contrôles de terrain, les limites inférieures de teneurs dans les arènes liées à des minéralisations dans les schistes à trémolites sont les suivantes :

+ concentrations par variation dans la distribution :
cuivre : 1 300 g/t — plomb : 1 400 g/t — zinc : ?

+ concentration par accident tectonique ou métamorphisme de contact :

cuivre : 400 g/t — plomb : 200 g/t — zinc : 400 g/t.

CONCLUSION

L'étude de la distribution du cuivre, du plomb et du zinc dans les métasédiments précambriens et dans leur manteau d'altération a mis en évidence la relative stabilité de ces éléments soumis à l'altération superficielle. Le rôle des processus météoriques apparaît subordonné, aussi bien pour les traces dispersées dans les roches (léger enrichissement dans les arènes) que dans le cas des minéralisations à minéraux spécifiques : leur oxydation et carbonatation ne s'accompagne dans aucun gisement étudié

La prospection géochimique de surface nécessite la connaissance des paramètres des différents groupes de distributions de teneurs, délimités par des représentations graphiques. La conversion des teneurs en *valeurs d'écart-types* facilite la comparaison des données relatives à des formations différentes, et

J. R. DE ARRUDA, J. YURMANI, J. M. WACKERMANN

permet la sélection des aires anomaliques (seuil correspondant à 3 écarts-types) sur la carte de courbes d'iso-écarts-types.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M.
le 20 mai 1980.*

BIBLIOGRAPHIE

- BARBOSA (A. F.) e PASSOS GUIMARÃES (J. E.), 1946. — Contribuição ao conhecimento da Província Metalogenética da Região da Ribeira, Estado de São Paulo. *An. II Congr. Panam. Eng. Minas e Geol.*, 2 : 35-100.
- BARBOUR (A. P.) e DE OLIVEIRA (M. A. F.), 1979. — Pb, Zn, Cu e Ba do distrito do Perau, PR. Modelo sedimentar para sulfetos do Vale do Ribeira. *Relatorio multigr.* I.G.-U.S.P., São Paulo, 28 p.
- BASTIAN (L.), 1946. — Ocorrências de minério de chumbo em Lageado, Município de Iporanga. *Rev. Inst. Geogr. Geol.*, 4 : 406-434.
- CASSEDANNE (J.) e LASSERRE (M.), 1969. — Análise isotópica pelo método do chumbo de algumas galenas brasileiras. Descrição do método utilizado. *Min. e Met.*, vol. XLIX, 293 : 215-224.
- CASSEDANNE (J.) e LASSERRE (M.), 1970. — Análise isotópica pelo método do chumbo de uma segunda série de galenas brasileiras. *Min. e Met.*, vol. LI, 301 : 31-40.
- CASSEDANNE (J.) e MELLO (Z. F. de), 1970. — Revisão das jazidas de chumbo e zinco do Grupo São Roque. la parte : rochas encaixantes. *Min. e Met.*, vol. LI, 303 : 113-120.
- CASSEDANNE (J.), 1972. — Les gites de plomb et de zinc du Brésil et leur répartition linéamentaire. Thèse Univ. Clermont-Ferrand, 336 p., *multigr.*
- CORDANI (U. G.) e KAWASHITA (K.), 1971. — Estudo geocronológico, pelo método Rb-Sr, de rochas graníticas intrusivas no Grupo Açungui. *An. XXV Congr. Bras. Geol.*, 1 : 105-110.
- DAMASCENO (E. C.), 1966. — Nota sobre a composição isotópica de chumbo em galena de jazidas do Vale da Ribeira. *An. do XX Congr. Bras. Geol.*, 1 : 39-40.
- DAMASCENO (E. C.), 1967. — Geologia da Mina do Paqueiro (Paraná). Tese de Doutorado, F.F.C.L.-U.S.P., São Paulo, *multigr.*
- DE ARRUDA (M. R.), 1971. — Mineralogia da Mina de Cobre Santa Blandina, em Itapeva, Estado de São Paulo. Tese de Doutorado I.G.A.-U.S.P., 180 p., *multigr.*
- KNECHT (Th.), 1974. — Reconhecimento geológico e mineralógico de algumas regiões no Vale do Ribeira de Iguape. Secr. Agricultura, Coordenadoria da Pesquisa de Recursos Naturais. Convênio I.G.G./D.A.E.E.
- LEPELTIER (C.), 1969. — A simplified statistic treatment of geochemical data by graphical representation. *Econ. Geol.*, 64 : 538-550.
- MARINI (O. J.), TREIN (E.) e FUCK (R. A.), 1967. — O Grupo Açungui no Estado do Paraná. In «Geologia do Pré-Devoniano e intrusivas subseqüentes da porção oriental do Estado do Paraná». *Bol. Paran. Geoci.*, 23 a 25 : 43-103.
- MELCHER (G. C.), 1968. — Contribuição ao conhecimento do Distrito Mineral do Ribeira de Iguape, Estados de São Paulo e Paraná. Tese de Livre-Docência. Escola Politécnica, U.S.P., 122 p., *multigr.*
- MELCHER (G. C.), GOMES (C. B.), CORDANI (U. G.), BETTENCOURT (J. S.), DAMASCENO (E. C.), GIRARDI (V. A. V.) e MELFI (A. J.), 1973. — Geologia e petrologia das rochas metamórficas e graníticas associadas do Vale do Rio Ribeira de Iguape, SP e PR. *Rev. Bras. Geoc.*, 3 : 97-123.
- MELFI (A. J.), CORDANI (U. G.) e BITTENCOURT (I.), 1965. — Reconhecimento fotogeológico de parte do Grupo Açungui. *Bragantia*, 24 : 447-474.
- MEZENGEV (O. K.) *et al.*, 1964. — Traitement statistique des données des recherches géochimiques. *Razvedka Okhr. Nedr.*, S.S.S.R., 30, 10 : 10-15. *Traduction* MARKOVIC, B.R.G.M., n° 4791, Paris.
- PETRI (S.) e SUGUIO (K.), 1969. — Sobre os metassedimentos do Grupo Açungui do Extremo Sul do Estado de São Paulo. Secr. Serv. Obras Publicas, D.A.E.E., Serv. Vale Ribeira, 1-98.
- Projeto Sudeste do Estado de São Paulo. Relatório Geológico Preliminar, 1972. Ministério das Minas e Energia. Convenio DNPM-CPRM.
- SOUZA (I. M.), 1972. — Mineralogia da jazida de cobre do Ribeirão do Perau, Paraná. Tese de Doutorado, I.G.-U.S.P., 213 p., *multigr.*