MODELO EXPLORATÓRIO PARA A PROSPECÇÃO DE DEPÓSITOS DE Zn-Pb UTILIZANDO DADOS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL E ESPECTRAL DO SENSOR GEOSCAN MKII: ESTUDO DE CASO NO DEPÓSITO SALOBRO, PORTEIRINHA (MG)

TATI DE ALMEIDA¹, CARLOS ROBERTO DE SOUZA FILHO¹, FRANCISCO ROBÉRIO DE ABREU², ALVARO PENTEADO CRÓSTA¹

Abstract *AN EXPLORATION MODEL FOR DETECTION OF Zn-Pb DEPOSITS USING GEOSCAN MK-II'S HIGH SPATIAL AND SPECTRAL RESOLUTION DATA: A CASE STUDY IN THE SALOBRO DEPOSIT, PORTEIRINHA (MG)*

The goal of this paper was two-folded. Firstly, based on the available literature, descriptive models were compiled for generic stratabound, sedimentary-hosted Zn-Pb deposits, and optimum spectral bandwidths covered by contemporary multispectral sensors were suggested for detection of their primary geologic features. Secondly, the detection model was tested in the Salobro Zn-Pb deposit (N-NE portion of the Minas Gerais State), considering GEOSCAN data that consist of 24 spectral bands at 5m spectral resolution. Before the conceptual detection model was tested in the Salobro deposit, a geologic surveying followed by petrographic and spectral analysis were accomplished in order to tune the model to a list of local geologic observational phenomena at the surface (e.g., favourable host rocks, alteration patterns, structural controls) that might lend themselves to remote sensing investigation. The list of observational phenomena were then filtered by a set of physical environmental constraints (climate, vegetation and soil cover) to produce a new set of landscape attributes (detectable phenomena) that stood a reasonable chance of being detected and exploited in this particular study area. Dense vegetation (even in dry seasons) and soil (either in situ or transported) cover most of rocks throughout the area of the deposit, which limits considerably the observational features, screening the detectable features to a few. Among the main detectable features are the Zn-Pb ore zone (ferruginous metachert) and banded iron formations closely associated to it. Key spectral bandwidths to detecting these two sets of rocks and that are simultaneously available within GEOSCAN data, comprise: (i) 400-950nm— covering the visible and near infrared region of the spectrum, for mapping iron oxides and hydroxides; and (ii) 8500-12500nm— covering the thermal region, for mapping silica-rich rocks. A reasoned thematic mapping approach, favoured in this study, tailored image processing of GEOSCAN data to the specific attributes of interest, focusing on the detectable features yielded from the model. In this view, image processing was split in two steps: (i) a basic toolkit for image processing, including colour composite images, band ratios and principal component transformations, were applied to the data aiming to discriminate between the key rocks of the deposit; (ii) spectral classifiers (SAM and SFF) were then employed to identify such rocks based on spectral libraries. As predicted by the detection model, both sets of techniques, particularly the ordinary ones (e.g., band 20 - 9170nm $\pm$ 530nm; band 14 - 2176nm $\pm$ 44nm and band 6 - 740nm $\pm$ 23nm, in RGB, merged with the digital elevation model of the area), were able to successfully map the surface expression of the ore zone and the banded iron formations within the deposit. However, most of the other geologic features associated to the deposit was Masked by vegetation and soil cover. This paper has demonstrated that theoretical exploration models based on remote sensing data can sufficiently support the indirect targeting of base metal deposits. However, the physical environment at the surface, as well as the choice of remote sensing data, may constrain the suitability of the model for a particular scale. Using the Salobro deposit as a control, this work showed that the application of a specific detection model, coupled with the moderately high spatial and spectral resolution of GEOSCAN data, was able to frame the ore zone accurately, an achievement that has been rarely repeated in tropical terrains.

Keywords: remote sensing, GEOSCAN imagery, mineral exploration, Zn-Pb deposits.

Resumo A utilização de um modelo prospectivo voltado às características geológicas e espectrais das unidades litológicas do depósito Salobro permitiu a detecção, por sensoriamento remoto multiespectral, de um horizonte mineralizado em Zn-Pb, previamente reconhecido nos trabalhos de campo desenvolvidos pela Docegeo-CVRD. O depósito Salobro, localizado na porção N/NE do Estado de Minas Gerais, é composto por rochas metassedimentares pertencentes à Sequência Salobro. Esta sequência é subdividida em 3 unidades: Unidade A (quartzo-muscovita xistos grossos); Unidade B (metaconglomerados, anfíbio xistos laminados, horizonte mineralizado e formações ferríferas bandadas) e Unidade C (muscovita-clorita-quartzo xistos). As rochas associadas e hospedeiras, o controle estratigráfico, o tipo de minério e as estruturas reconhecidas no depósito Salobro, indicam que a mineralização de Zn-Pb é similar àquelas classificadas como do tipo estratiforme hospedadas em sedimentos (EHS), metamorfasada em grau anfibolito médio e retro-metamorfisada no fácies xisto verde alto. As características geológicas da região do depósito e a análise petrográfica e espectral das unidades aflorantes permitiram a confecção de um modelo exploratório baseado em dados e técnicas de sensoriamento remoto, onde foram enfocados, principalmente: (i) rochas encaixantes e minerais de minério, (ii) alteração primária e secundária no *pipe*, (iii) controle do minério, e (iv) estrutura associada. O modelo exploratório foi aplicado a imagens de alta resolução espacial (5m) e espectral

1 - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Caixa Postal 6152, 13083-970, Campinas, São Paulo, E-mail: tati_almeida@pop.com.br; beto@ige.unicamp.br, alvaro@ige.unicamp.br

2 - 317 Lexington Ave. #258, San Antonio, Texas, USA, 78215. E-mail: frandeabreu@earthlink.net

(24 bandas, abrangendo o visível, infravermelho próximo, infravermelho de ondas curtas e infra-vermelho termal) obtidas pelo sensor GEOSCAN MKII em agosto de 1992. Estas imagens foram processadas por dois conjuntos de técnicas: um primeiro voltado ao realce e discriminação entre materiais geológicos (composições coloridas, operações aritméticas e principais componentes); e um segundo, visando a identificação sistemática (classificação espectral) desses materiais (*SAM* e *SFF*). O processamento das imagens GEOSCAN do depósito Salobro através dessas técnicas possibilitou a delimitação da expressão superficial das formações ferríferas bandadas e do horizonte *metachert* ferruginoso (horizonte mineralizado em Zn-Pb). A utilização do modelo digital do terreno (MDT) permitiu a fusão destas imagens à topografia da área e demonstrou que a melhor resposta espectral desses litotipos encontra-se nos altos topográficos, onde há pouco ou nenhum solo transportado e pouca influência da vegetação. Como base nos resultados obtidos nessa pesquisa, foi demonstrado que modelos exploratórios baseados em dados e técnicas de sensoriamento remoto podem ser importantes na prospecção de depósitos de metais base, desde que os aspectos fisiográficos do alvo sejam bem conhecidos e incorporados na estratégia de prospecção.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, imagens GEOSCAN, exploração mineral, depósitos de Zn-Pb.

INTRODUÇÃO Cerca de 75% das reservas mundiais de Zn-Pb são encontradas em depósitos do tipo “estratiforme, hospedado em sedimentos” (Holm *et al.* 1999). Apesar de bem descritos na literatura, pouco foi realizado no sentido de demonstrar quais, dentre as suas características, podem ser convenientemente detectadas por sensoriamento remoto multiespectral (Spatz & Wilson 1997). Isso resulta na falta de uma estratégia para a prospecção de Zn-Pb, utilizando sensoriamento remoto, também sentida na busca de outros tipos de depósitos, como enfatizado por diversos autores (e.g., Largie *et al.* 1993, Spatz 1997, Spatz & Wilson 1997, Spatz 1999, Swalf 2000, Almeida 2000).

No Brasil, a descoberta de depósitos estratiformes de Zn-Pb hospedados em sedimentos é limitada a poucos casos, dos quais destacam-se: (i) as antigas minas do Perau e Canoas, no distrito mineiro do Vale da Ribeira, Paraná (Daitx 1996); (ii) a mina desativada de Boquirá, na região central da Bahia (Fleischer e Espourteille, 1999); (iii) a mina de Vazante, na região oeste de Minas Gerais (Dardenne e Freitas-Silva, 1999); e o depósito Salobro, recentemente descoberto pela DOCEGEO na região norte de Minas Gerais (Abreu & Oliveira 1998). O depósito Salobro possui, segundo DOCEGEO (2001), reservas medidas e inferidas da ordem de 6,5 milhões de toneladas de minério, com teor médio de ~7% de Zn+Pb.

No presente estudo, o depósito Salobro foi utilizado como área teste para a confecção de um modelo prospectivo de depósito Zn-Pb do tipo “estratiforme, hospedado em sedimentos” (EHS), usando dados de sensoriamento remoto em áreas tropicais. A escolha deste depósito foi baseada nos seguintes critérios: (i) potencial econômico; (ii) características fisiográficas, típicas de terrenos tropicais (i.e. cobertura vegetal e perfil intempérico), o que pode tornar o modelo prospectivo de aplicação mais ampla; (iii) existência de mapeamento geológico detalhado; (iv) existência de dados multiespectrais de alta resolução espacial (5m) e espectral (24 bandas), coletados pelo sensor GEOSCAN.

CARACTERÍSTICAS DETECTÁVEIS POR SENSORIAMENTO REMOTO EM DEPÓSITOS DE Zn-Pb DO TIPO EHS Os depósitos do tipo EHS, metamorfizados ou não, ocorrem intercalados a seqüências sedimentares clásticas, químicas e/ou biogênicas, onde a contribuição de rochas vulcânicas é muito pequena ou nula. Este tipo de depósito é associado a rifts intracontinentais ou a falhas de grâbens em margens continentais (Goodfellow *et al.* 1993, MacIntyre 1995) e, segundo Gustafson & Williams (1981), ocorre em maior frequência em terrenos de idades Proterozóica e Fanerozóica.

Os corpos de sulfeto dos depósitos EHS ocorrem como camadas e lentes e apresentam estruturas maciça, bandada ou disseminada (Guilbert & Park 1981, Gustafson & Williams 1981, Goodfellow *et*

al. 1993). As camadas de sulfetos têm espessura centimétrica à métrica e extensão quilométrica. A razão entre a extensão lateral e espessura dos corpos é frequentemente superior a 20 (Largie 1983). O principal sulfeto presente é a pirita, porém em alguns casos predomina a pirrotita. Os minerais de minério são a esfalerita, galena e a calcopirita (Goodfellow *et al.* 1993), que distribuem-se, do centro para as bordas, zonados de acordo com a seguinte ordem: Cu→Pb→Zn→Fe. Porém, em depósitos onde a quantidade de Fe presente é pequena, a zonation observada é Pb→Zn→Ba (Gustafson & Williams 1981). Os corpos de minério distribuem-se em quatro domínios principais, compartimentados em relação ao *vent* hidrotermal, como: (i) fácies sedimentar hidrotermal (ou fácies de minério acamadado); (ii) fácies sedimentar distal; (iii) *vent complex* e; (iv) *feeder pipe* (Goodfellow *et al.* 1993). No entanto, dependendo das relações topográficas, relações de transporte-concentração e diluição-dispersão, as concentrações de sulfetos maciços podem ser depositadas a dezenas de metros do canal abastecedor do sistema hidrotermal (Guilbert & Park 1986, Wilton 1998).

Utilizando as características supracitadas, os dados e resultados apresentados nos trabalhos de Chenkui *et al.* (1991), Largie *et al.* (1993), Spatz (1996, 1997, 1999), Spatz & Wilson (1997), Swalf (2000) e Almeida (2000), e as bibliotecas espectrais digitais da USGS (<http://speclab.cr.usgs.gov>), foram listadas, na Tabela 1, as características destes depósitos passíveis de detecção por sensoriamento remoto e os intervalos espectrais correlacionáveis a cada uma delas.

Vale salientar que este modelo é hipotético e que a influência de fatores externos, tais como vegetação, clima, topografia, iluminação, espalhamento atmosférico, entre outros, não foi considerada. Desta forma, o modelo, antes de aplicado, deve ser necessariamente adaptado, levando-se em consideração estes fatores externos, os quais sempre serão determinantes para o sucesso ou fracasso de aplicações de sensoriamento remoto em exploração mineral.

Em áreas tropicais, por exemplo, onde as superfícies são dominadas por densa cobertura vegetal e espesso manto de intemperismo, as respostas espectrais dos materiais primários, diagnósticos de depósitos de Zn-Pb EHS, podem ser totalmente mascaradas. De modo a contornar essas limitações, a época de aquisição de imagens precisa ser considerada. Na estação seca, aumenta a possibilidade de aquisição de imagens do substrato exposto, função da perda substancial de massa foliar por árvores decíduas. Além disto, ambigüidades espectrais causadas por níveis de solos transportados ou horizontes coluvionares e depositados sobre materiais “*in situ*” podem ser minimizadas, concentrando a triagem de alvos nos altos topográficos. As assinaturas espectrais destes altos devem corresponder à resposta do

Tabela 1 - Principais características dos depósitos de Zn-Pb estratiformes hospedados em rochas sedimentares e intervalos espectrais e resoluções espaciais necessárias para a sua detecção por sensoriamento remoto.

Depósitos de Zn-Pb Estratiformes Hospedados em Rochas Sedimentares		Posições espectrais (μm)		Res. Espacial (m)	
		Multiespec	Hiperespec	Recon. ¹	Dep. ²
Rochas associadas	Rochas sedimentares argiliticas, calcárias, e, raramente, quartzíticas.	VNIR, SWIR 9.5/ 10.5	2.33 9.7	20-30	10-20
Minerais de Minério (princ. e subord.)	Py, Po, Sp, Ga, Cc e Brt. Traços de <i>marcassita</i> , <i>arsenopirita</i> , <i>bismutinita</i> , <i>molibdenita</i> , <i>enargita</i> , <i>millerita</i> , <i>fribergita</i> , <i>cobaltita</i> , <i>vallerita</i> , <i>melnikovita</i> .	0.7-0.9	0.85	10-20	5-8
Minerais do depósito	Depende da rocha hospedeira do minério				
Minerais de alteração	Sílica, turmalina, carbonato, albita e clorita de ambientes de baixa temperatura. Barita e argilas com amônia são citados em alguns depósitos	2.3-2.4	2.24; 2.29; 2.32	10-15	5-7
Estruturas associadas	Falhas regionais normais de alto ângulo, anticlinais com falhas locais e normais associadas	VNIR; SWIR		20-80	10-20
Controle do minério	Seqüências sedimentares favoráveis, estruturas rúpteis de grande porte	VNIR SWIR	VNIR SWIR	30-40	15-20
Alteração primária no pipe (vertical)	Estreita zona com jasperóide, sílica, e pouca illita, caulinita, montmorillonita, com descascificação. Ocorrência distal de amônia.	2.15-2.35 9.5-10.5	2.19, 2.21, 2.33, 2.34; 9.7	15-30	5-8
Alteração secundária	Goethita e pouca jarosita.	0.6-0.7 0.75-1.0	9,0; 9,5	10-30	5-8
Zonação lateral	Silicificação com illita em gradação para abundância em illita-caulinita	9.5-10.5 2.15-1.35	2.19; 2.21, 9.7	10-20	4-6

¹Recon: escala necessária para reconhecimento regional ²Dep: escala necessária para identificação de depósitos

substrato, mesmo que este se encontre parcial ou totalmente alterado por intemperismo.

LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA DO DEPÓSITO SALOBRO A área de estudo localiza-se a 15 Km a oeste da cidade de Porteirinha, situada no extremo norte do Estado de Minas Gerais (Fig. 1a) e encontra-se inscrita na Folha de Janaúba (SD-23-Z-D-IV, escala 1:100.000).

O arcabouço geológico da borda leste do Cráton do São Francisco entre Itacambira e Monte Azul, centro-norte de Minas Gerais, é controlado por uma janela estrutural (Bloco Itacambira-Monte Azul - BIMA) que possibilita a exposição de rochas magmáticas e metamórficas, formadas até o final da orogênese Transamazônica (Drumond *et al.* 1980, Crocco-Rodrigues *et al.* 1992). Guimaraes *et al.* (1993), subdividem as rochas deste bloco, entre a vila de Barroão e a cidade de Porteirinha, em 6 unidades: Complexo Metamórfico Córrego do Cedro, que engloba gnaisses bandados de composição granítica; Grupo Riacho dos Machados, constituído por xistos, anfibólitos e raras formações ferríferas; Suíte Granitóide Gurutuba, de composição tonalítica; Suíte Granitóide Pedra do Urubu; Suíte Monzonítica Paciência e Suíte Granítica Confisco (Fig. 1b).

Santos & Paez (1992) mapearam, em escala de semi-detallhe, uma faixa do Grupo Riacho dos Machados que ocorre isolada entre as cidades de Porteirinha e Janaúba, denominando-a informalmente de Seqüência Salobro (Fig. 1b). Segundo Abreu & Oliveira (1998), trabalhos de prospecção geoquímica possibilitaram a identificação de anomalias de Zn e Pb associadas a terrenos incluídos nessa seqüência. Com o detalhamento destas anomalias foi definido o depósito Salobro, no qual ocorre um horizonte de metachert ferruginoso com porções ricas em Zn e valores anômalos de Pb (Abreu & Oliveira 1998). Estes mesmos trabalhos em escala de detalhe possibilitaram a subdivisão da seqüência Salobro nas unidades informais A, B e C (Fig. 2), descritas a seguir.

Unidade A Unidade basal constituída predominantemente por quartzo-muscovita xistos. As paragêneses minerais, as relações

intergrãos e o bandamento presentes nestes xistos sugerem que os mesmos correspondem a sedimentos alúmino-silicáticos que foram submetidos a metamorfismo em grau anfibolito, com posterior retrometamorfismo na fácies xisto verde.

Unidade B Constituída por três tipos litológicos principais: anfibólio-xistos laminados, metachert ferruginoso e formações ferríferas bandadas. Os anfibólio-xistos laminados apresentam variações composicionais de acordo com a porção estratigráfica em que se encontram, de modo que não existe um único litotipo, mas sim uma intercalação heterogênea entre lâminas e bandas milimétricas de vários tipos de "xistos" e/ou "fels", com predominância constante de anfibólitos (tremolita/actinolita) e minerais do grupo do epidoto. O topo do pacote é marcado por um nível de *metachert* ferruginoso que corresponde a uma rocha quartzosa, com grande quantidade de estruturas *box-work* em superfície, às quais se associam valores anômalos de Pb e Zn em amostras de rocha e solo. Esse último litotipo sustenta relevo de crista alongado na direção WSW-ESSE. No conjunto pode-se interpretar as composições, texturas e estruturas presentes no anfibólio xisto laminado como resultantes do metamorfismo de sedimentos químico-detriticos, submetidos à fácies anfibolito e retrometamorfismo na fácies xisto verde.

As formações ferríferas bandadas são constituídas predominantemente por intercalações submilimétricas entre níveis quartzosos e níveis de magnetita. Essas rochas também sustentam cristas alongadas de direção WSW-ENE e se intercalam vertical e lateralmente com os xistos da Unidade C.

Os tipos litológicos da Unidade B caracterizam um ambiente deposicional com forte contribuição hidrotermal, com a qual a mineralização de Zn pode estar geneticamente associada.

Unidade C No topo da seqüência, essa unidade é composta de muscovita-clorita-quartzo xistos bandados, localmente com pseudomorfos de cristais de estauroлита substituídos por sericita. O bandamento presente geralmente mostra granodecrescência, o

Modelo exploratório para a prospecção de depósitos de Zn-Pb utilizando dados de alta resolução espacial e espectral do sensor Geoscan MKII: estudo de caso no depósito Salobro, Porteirinha (MG)

Figura 1 - (a) Mapa de localização e geologia regional do Bloco Itacambira- Monte Azul (BIMA) no contexto da Faixa de Dobramento Araçuaí (Guimarães et al. 1993). (b) Mapa geológico do BIMA entre os municípios de Itacambira e Monte Azul (Guimarães et al. 1993).

Figura 2 - Mapa geológico do depósito Salobro (modificado DOCEGEO 1999).

que, junto às parageneses minerais, permite a inferência de um protolito turbidítico, posteriormente metamorfisado na fácies anfibolito e retrometamorfisado na fácies xisto verde.

MATERIAIS E MÉTODOS **Imagens do sensor aeroportado GEOSCAN MKII** As imagens utilizadas neste trabalho foram adquiridas no mês de setembro do ano de 1992, utilizando o sensor multiespectral aerotransportado GEOSCAN MK-II. Esse imageador possui 46 bandas espectrais dentre as quais 24 podem ser selecionadas simultaneamente para a captação dos dados entre 450 e 12.000 nm, abrangendo as regiões do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR), infravermelho de ondas curtas (SWIR) e infravermelho termal (TIR) (Tabela 2). O campo de visada desse sensor é de $\pm 45^\circ$ com um campo de visada instantânea de 2.1 a 3.0 miliradianos. Os intervalos espectrais específicos dos dados coletados neste levantamento encontram-se listados na Tabela 2.

Uma das características deste sensor é que o intervalo dinâmico de cada banda espectral é estabelecido através de ajustes de ganho e *offset* (PROSPEC 1993). Para determinar este ajuste é realizado um vôo preliminar sobre a área, estabelecendo-se a intensidade máxima e mínima para cada banda e redistribuindo-se os valores no intervalo dinâmico de 8 bits. Este procedimento, embora facilite o ajuste ótimo do histograma das imagens, inibe a utilização de técnicas simples de correção atmosférica. Visto que esta correção é crítica para o sucesso da aplicação de técnicas de processamento mais sofisticadas (i.e., classificação espectral), utilizou-se neste estudo um algoritmo desenvolvido para amenizar o efeito do espalhamento atmosférico residual. Este algoritmo é denominado de IARR (*Internal Average Relative Reflectance*) e já demonstrou sua eficiência para a correção atmosférica de dados GEOSCAN (Du 1996, Fraser & Agar 1997, Agar & Páveš 1999). A técnica IARR é utilizada principalmente para normalizar imagens de áreas onde o comportamento espectral dos alvos como um todo é pouco conhecido (Roberts et al. 1985, Conel et al. 1985, Kruse 1990). O algoritmo gera um espectro médio considerando todos os pixels da imagem sob estudo, sendo em seguida dividido pelo espectro de cada pixel dessa imagem.

Espectrorradiômetro FieldSpec Full Resolution (FR) Com o

advento de espectrômetros portáteis de alta resolução espectral, cada vez mais a espectroscopia de reflectância está sendo difundida tanto para auxiliar o complexo entendimento entre as interações matéria e energia, base para o uso do sensoriamento remoto (Maracci 1992, Curtiss & Goetz 1994), como para o auxílio à identificação de minerais, mapeamento de zonas de alteração hidrotermal, estudos cristalográficos, entre outros (Duke 1994, Martinez-Alonso et al. 1997 in Passos 1999).

O instrumento utilizado nesse estudo, o espectrorradiômetro *FieldSpec Full Resolution*, detecta radiação eletromagnética no intervalo espectral entre 350nm e 2500nm. Esse instrumento foi utilizado para as medições dos materiais geológicos presentes no depósito Salobro, sob fonte artificial de iluminação (lâmpada halógena de 3000° K de temperatura) e lente redutora do campo de visada de 1°, posicionada a uma distância de aproximadamente 20cm do material alvo, o que proporcionou um campo de visada instantânea de 0,35 cm. A calibração do aparelho foi realizada através de uma placa de referência, constituída por um composto ótico sintético (*Spectralon*), que se comporta como uma superfície lambertiana. A coleta e o processamento dos dados foram efetuados com o auxílio de um *lap top* e *software* controlador. Este software, opcionalmente, trabalha integrado ao *Spectral Angle Mapper* (SAM, Kruse et al. 1993), um programa capaz de analisar automaticamente o conteúdo mineralógico de uma curva espectral, com base em bibliotecas espectrais de referência, tais como a do *United States Geological Survey - USGS* (<http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>).

A figura 3 resume as principais etapas desenvolvidas durante a realização da pesquisa, que envolveu duas etapas principais: (i) levantamento bibliográfico das características, detectáveis por sensoriamento remoto, de depósitos tipo de Zn-Pb estratiforme hospedado em sedimentos e; (ii) adaptação deste modelo teórico em um caso prático no depósito Salobro.

ASSINATURAS ESPECTRAIS DOS LITOTIPOS DO DEPÓSITO SALOBRO

A espectroscopia de reflectância é um método que não requer preparação de amostras, e que reúne rapidez e economicidade na caracterização de minerais e rochas. No entanto, como já discutido nos trabalhos de Passos (1999) e Almeida (2000), é necessário um rigoroso controle da mineralogia,

Tabela 2 - Especificações das bandas do sensor GEOSCAN MKII para o aerolevantamento de Riacho dos Machados (fonte: PROSPEC 1993).

Banda	Comprimento de onda central (nm)	Largura da banda (nm)	Banda	Comprimento de onda central (nm)	Largura da banda (nm)
1	522	42	13	2136	44
2	583	67	14	2176	44
3	645	71	15	2220	44
4	693	24	16	2264	44
5	717	24	17	2308	44
6	740	23	18	2352	44
7	830	22	19	8640	530
8	873	22	20	9170	530
9	915	21	21	9700	530
10	955	20	22	10220	533
11	2044	44	23	10750	533
12	2088	44	24	11280	533

Figura 3 - Fluxograma dos métodos utilizados neste estudo.

por meio de lâminas delgadas, difratometria de Raios-X e/ou microscopia eletrônica em amostras de referência, para uma maior confiabilidade nos resultados obtidos a partir desta técnica.

As curvas de reflectância espectral obtidas com o *FieldSpec Full Resolution* (FR) foram interpretadas tendo como base os trabalhos de Grove *et al.* (1992) e Clark (1999), e complementadas com análise automática, proporcionada pelo programa SIMIS Field 2.9 (*Spectrometer Independent Mineral Identification Software*) (Macklin 1998).

A análise espectral permitiu uma caracterização mineralógica do depósito Salobro que se aproximou bastante daquela obtida a partir da petrografia e de observações feitas no campo. Somente uma pequena parcela (10-20%) dos dados coletados com o *FieldSpec* e analisados com o programa SIMIS mostraram pouca ou nenhuma correspondência com os dados petrográficos, admitidos como mais precisos. Os resultados menos satisfatórios do estudo espectral foram obtidos nos anfíbios xistos laminados da Unidade B, não tendo sido possível caracterizar uma assinatura espectral única para este conjunto de xistos devido à sua heterogeneidade composicional.

O intemperismo modificou profundamente a mineralogia original das rochas do depósito Salobro, resultando em misturas de minerais primários com seus correspondentes intempéricos. Contudo, as análises espectrais das unidades desse depósito permitem individualizar os litotipos reconhecidos em três grupos espectrais principais: Grupo I - com feições de absorção entre 400-950 nm; Grupo II - com feições em torno de 2200 nm; e Grupo III - com feições entre 2300 nm e 2400 nm.

O Grupo I (Fig. 4) compreende as formações ferríferas bandadas (magnéticas e não magnéticas) e o horizonte de *metachert* ferruginoso. As bandas de absorção desse grupo ocorrem em torno de 400 nm e, subordinadamente, em 950 nm, relacionadas à presença de hidróxidos e óxidos de ferro (goethita, limonita e hematita). A caracterização espectral de várias amostras intemperizadas do minério do depósito Salobro mostrou que a goethita é o mineral de alteração superficial dominante. De acordo com Fraser *et al.* (1985) e Raines *et al.* (1985), a concentração anômala de goethita em *gossans* (detectado em nossos dados

espectrais) pode servir como indicador da presença de jazidas sulfetadas em subsuperfície.

O Grupo II (Fig. 5) engloba rochas ricas em filosilicatos das Unidades A e C. As feições de absorção típicas desse grupo concentram-se em torno de 2200 nm e decorrem da presença abundante de minerais com íons hidroxila coordenados por íons de alumínio (Al-OH) em sua estrutura, destacando-se os aluminossilicatos do grupo das micas (muscovita e a flogopita) e os argilo-minerais (caolinita, esmectita e haloisita).

O Grupo III (Fig. 6) compreende rochas ricas em minerais máficos e inclui os litotipos da Unidade B. As feições de absorção características desse grupo concentram-se entre 2300 nm e 2400 nm e decorrem de minerais que contêm íons hidroxila coordenados por íons de Mg (Mg-OH) em sua estrutura, entre os quais estão tremolita/actinolita, hornblenda e minerais do grupo da clorita.

Os dados indicam que esses três grupos espectrais podem ser detectados por sensores multiespectrais contendo bandas com cobertura independente nessas regiões do espectro (Almeida, 2000) e, portanto, a assinatura espectral de cada um deles pode ser utilizada como guia de prospecção em investigações baseadas em sensoriamento remoto.

MODELO DE DETECÇÃO DO DEPÓSITO SALOBRO UTILIZANDO O SENSOR GEOSCAN

O modelo descritivo e a caracterização do comportamento espectral das feições diagnósticas do depósito Salobro foram sintetizados em um modelo exploratório resumido na Tabela 3. Este “modelo exploratório Salobro” tem como base o sensoriamento remoto multiespectral, com ênfase no sensor GEOSCAN. A Tabela 3 apresenta uma adaptação do modelo exploratório desenvolvido para depósitos de Zn-Pb do tipo EHS, de forma genérica, onde foram integradas: (i) as rochas representativas do depósito Salobro; (ii) suas dimensões aflorantes; (iii) os intervalos espectrais onde essas rochas apresentam bandas de absorção diagnósticas; (iv) e quais, dentre as 24 bandas do sensor GEOSCAN, são adequadas à detecção destas variáveis.

Uma característica particular do sensor GEOSCAN é a de possuir bandas espectrais cobrindo a faixa do infravermelho termal (TIR),

Figura 4 - Grupo Espectral I, com feições de absorção entre 400-950nm (Min = amostras de minério de Zn-Pb; FFM = amostras de formação ferrífera magnética; FFNM = amostra de formação ferrífera não-magnética).

Figura 5 - Grupo Espectral II, com feições de absorção em torno de 2200nm (XB = amostras de quartzo-muscovita xistos da Unidade A; XT = amostras de muscovita-clorita-quartzo xistos da Unidade C)

região onde é possível a detecção de sílica em superfície (Spatz, 1997). Muito embora o espectrorradiômetro *FieldSpec FR* não seja capaz de medir radiação neste intervalo de comprimentos de onda, o que impediu uma avaliação do comportamento espectral dos materiais geológicos presentes em Salobro nesta faixa do espectro, decidiu-se por incluir o uso destas bandas no modelo exploratório. Esta inclusão foi definida em função da rocha hospedeira do minério (*metachert* ferruginoso) tratar-se de uma rocha rica em sílica, e, por conseguinte, potencialmente detectável na faixa TIR (Tabela 3).

MAPEAMENTO REMOTO DA MINERALIZAÇÃO NO

Figura 6 - Grupo Espectral III, com feições de absorção entre 2300nm e 2400nm (GB = amostras de gabbro; XAnf = amostras de anfíblio-xistos laminados da Unidade B).

DEPÓSITO SALOBRO UTILIZANDO DADOS GEOSCAN

Utilizando o modelo exploratório adaptado ao depósito Salobro (Tabela 3) foi realizado o processamento digital das imagens GEOSCAN. Este processamento foi subdividido em dois conjuntos de técnicas: o primeiro, voltado ao realce e discriminação (técnicas “convencionais”/ “tradicionais”) entre materiais geológicos; e o segundo, visando a identificação sistemática (classificação espectral) desses materiais.

Discriminação dos materiais geológicos Para o realce da vegetação presente no depósito Salobro foi utilizada uma composição colorida falsa-cor entre as bandas 17/8/2 (RGB) (Fig. 7). A banda 8, situada na região do infravermelho próximo ($873\text{nm} \pm 22\text{nm}$), detecta um alto de reflectância típico da vegetação (o que também pode ser detectado nas bandas GEOSCAN de 6 à 10). Estando alocada ao canal verde, esta banda permite caracterizar, em tons de verde, áreas onde há presença dominante de matas ciliares (verde mais claro), árvores, arbustos e gramíneas, independente se fotossinteticamente ativas ou não. A banda 2, que cobre o intervalo do verde do espectro visível ($583 \pm 67\text{nm}$) e foi aqui alocada ao canal azul, mapeia alterações de reflectância devido à variações de pigmento (e.g., clorofila) na vegetação (Clark, 1999). Essas alterações, que teoricamente são sutis, também pouco aparecem na imagem. A banda 17, posicionada no infra-vermelho de ondas curtas ($2308\text{nm} \pm 44\text{nm}$), é capaz de discriminar áreas onde rochas e solos estão expostos, além de detectar variações de reflectância na vegetação devido à presença de compostos bioquímicos resistentes (i.e., lignina, celulose e proteína – Clark 1999), podendo indicar áreas com predomínio de vegetação mais seca na imagem. No seu conjunto, a composição colorida 17/8/2 (RGB) (Fig. 7) aponta a presença de vegetação verde e seca recobrendo, quase que por completo, a área do depósito Salobro. Os setores em tons de magenta, ou mesmo vermelho, nessa imagem apresentam exposição total ou parcial de solos e rochas. Tais áreas estão associadas a superfícies ferruginosas formadas por processos de intemperismo das formações ferríferas e do minério (B), por quartzitos do Grupo Macaúbas (A), e áreas com ocupação

Tabela 3 - Intervalos espectrais e bandas do sensor GEOSCAN MKII selecionadas para a detecção das principais feições do depósito Salobro por sensoriamento remoto.

	Deposito Salobro	Espessura aflorante	Intervalo espectral (nm)	Bandas GEOSCAN
Controle do minério	Estratigráfico	150m	400-950 2150-2400	1 - 10 14 - 18
Estruturas associadas	Falha normal de alto ângulo	400m	VNIR, SWIR, TIR	1 - 24
Rochas encaixantes	Anfibólitos xistos (Unidade B)	150m	2300-2400	16 - 18
	Unidades A e C	150m (A) >300m (C)	2200-2300	14 - 16
	Formações Feríferas	200m	400-950	1 - 10
Rochas hospedeiras	Metachert ferruginoso	<5m	400-950	1 - 10
			9500-10500	19 - 20
Minerais de minério	Esfalerita, galena (pirita, pirrotita)	<5m	400-950	1 - 10
Mineralogia do depósito	Actinolita-tremolita, quartzo, horblenda, granada e biotita	150m	2300-2400 9500-10500	16 - 18 20 - 22
Alteração primária	Silicificação e sulfetação	<5m	9500-10500 400-950	20 - 23
Alteração tardia (pós pico metamórfico)	Turmalina, clorita, zoisita, clinozoisita e carbonatos	100m	2200-2400	14 - 18
Alteração intempérica	Goethita e limonita	10m	400-950	1 - 10
Zoneamento lateral	Não identificado			

antrópica (C e D).

A composição colorida falsa-cor 20/14/6 (RGB) foi projetada para o realce de materiais ricos em sílica (banda 20 - 9170nm $\pm$ 530nm), minerais portadores da molécula hidroxila (banda 14 - 2176nm $\pm$ 44nm) e superfícies ricas em hidróxidos de ferro (ion Fe³⁺) (banda 6 740nm $\pm$ 23nm), em tons de vermelho, verde e azul, respectivamente. Adicionalmente, essa composição colorida foi sobreposta ao modelo digital de terreno da área na qual o depósito Salobro encontra-se inscrito (Fig. 8). Essa imagem individualizou o contato entre o Grupo Macaúbas e a Sequência Salobro, porém não foi uma composição adequada para a separação desta sequência do embasamento. Na porção centro-oeste da Sequência Salobro ocorrem áreas contendo pixels que variam entre tons de vermelho e magenta em cristas convexas (A, B e C), indicando que se tratam de superfícies ricas em sílica e hidróxidos de ferro. Estas anomalias apresentam-se alinhadas ao *trend* da foliação principal e correspondem à expressão superficial das formações feríferas bandadas e do nível de *metachert* ferruginoso mineralizado em Zn-Pb. Esta combinação de bandas, construída com base no modelo exploratório, mostrou-se muito eficaz para a discriminação do nível sulfetado e formações feríferas magnéticas, tipos litológicos com estreitas relações genéticas.

Identificação dos materiais geológicos A classificação espectral de imagens de sensoriamento remoto baseia-se na comparação entre a assinatura espectral dos *pixels* de composição desconhecida (imagem) e a assinatura espectral dos materiais de referência (bibliotecas espectrais). Esta biblioteca pode incluir espectros de minerais puros, misturas de alguns minerais, o espectro global de uma rocha ou pixels da própria imagem, para os quais a composição é conhecida. Dois métodos para o mapeamento espectro-mineralógico foram aplicadas nas imagens GEOSCAN visando a identificação mineralógica no depósito Salobro: o método SAM (*Spectral Angle Mapper*, Kruse *et al.* 1993) e o método SFF (*Spectral Feature Fitting*, Boardman & Kruse 1994). Estes métodos, desenvolvidos inicialmente para dados hiperespectrais, têm sido adaptados com sucesso para a classificação de dados multiespectrais, incluindo dados do sensor GEOSCAN (Fraser & Agar 1997, Agar & Pávez 1999).

O SAM é uma técnica de classificação supervisionada que mede a similaridade espectral entre o espectro de reflectância real de cada pixel e o de um espectro de referência. Esta técnica trata os espectros desconhecidos da imagem e os espectros de referência como vetores em um espaço cuja dimensionalidade é igual ao número de bandas espectrais do sensor. No procedimento de classificação, o algoritmo do SAM determina a similaridade entre duas curvas espectrais através do cálculo do ângulo espectral - quanto menor for o ângulo entre os vetores, maior similaridade espectral será atribuída entre o pixel analisado e o material de referência em questão. Uma das limitações deste processo é que somente a direção é considerada para os espectros e não o seu comprimento, o que torna o método insensível a fatores de ganho e a todas as possíveis diferenças de iluminação da cena - os pixels escuros cairão sempre próximos a origem do espaço n-dimensional.

Utilizando os espectros de referência das formações feríferas magnéticas e não-magnéticas e do minério como biblioteca espectral (*endmembers*), foram gerados resultados através do SAM para o mapeamento dos pixels referentes a cada uma destas rochas. Dois resultados foram derivados do SAM. Um primeiro refere-se a um conjunto de imagens, denominadas de *Rule*. Neste caso, para cada espectro de referência utilizado, uma imagem *Rule* foi gerada, de forma que cada pixel possui valor igual ao ângulo espectral. Nas imagens *Rule* os pixels originalmente mais escuros apresentam um menor valor para o ângulo entre os espectros e, conseqüentemente, uma maior similaridade entre os mesmos. Desta forma, por uma questão visual, foi necessário que os histogramas referentes às estas imagens fossem cuidadosamente invertidos e ajustados - os pixels originalmente escuros foram convertidos em mais claros, ficando destacados na cena. O segundo resultado gerado foi um mapa de classificação final. Esse mapa é baseado na similaridade espectral dos pixels da imagem com os materiais de referência selecionados; em geral os resultados que figuram nesse mapa de classificação são incompletos, o que já não ocorre com a análise das imagens *Rule*.

As três imagens *Rule* resultantes do SAM para os três *endmembers* tiveram seus histogramas invertidos e ajustados e foram combinadas em composição colorida RGB (Fig. 9). A análise do resultado mostra que, na porção centro-oeste da área, a resposta

Figura 7 - Composição colorida falsa-cor entre as bandas 17/8/2 ilustrando a distribuição da vegetação na área do depósito Salobro. A: domínio do Grupo Macaúbas; B: domínio das formações ferríferas bandadas e minério; C e D: área com ocupação antrópica.

Figura 8 - Imagem falsa-cor entre as bandas 20/14/6, superposta ao Modelo Digital de Terreno da área do depósito Salobro, ilustrando a distribuição de sílica/ minerais portadores da molécula hidroxila / hidróxidos de ferro no depósito Salobro.

Figura 9 - Classificação espectral pelo método Spectral Angle Mapper. As curvas espectrais das formações ferríferas não-magnética /magnética/minério foram utilizadas como endmembers no processo de classificação. As imagens Rule para cada um dos endmembers foram alocadas, respectivamente, aos canais RGB, resultando na imagem de abundância relativa de cada material.

Figura 10 - Gráficos de dispersão entre as imagens RMS e Scale gerados a partir da classificação espectral SFF (Spectral Feature Fitting).

espectral das formações ferríferas e do minério contribuem proporcionalmente nos pixels da imagem (coloração esbranquiçada - A). Entretanto, não é possível delimitar e distinguir os contatos e o predomínio de um litotipo em relação ao outro, por esta técnica. Além disto, pixels esbranquiçados se espalham por toda a imagem, como na porção norte da área (B), onde estas rochas não ocorrem. Pixels em tons vermelho também encontram-se difusamente espalhados, por razões ainda desconhecidas, no domínio das rochas do Grupo Macaúbas e nas zonas de cisalhamento (C). A técnica SAM, de forma geral, não apresentou bons resultados, provavelmente em função da qualidade da transformação dos dados GEOSCAN para reflectância pelo método IARR.

O *Spectral Feature Fitting* é um método de classificação baseada na identificação das feições espectrais diagnósticas de cada material. A técnica analisa simultaneamente múltiplos materiais, selecionados a partir de espectros de referência utilizando feições diagnósticas de absorção, aumentando assim a capacidade de identificação. Inicialmente, esta técnica remove o contínuo dos pixels da imagem e dos espectros de referência. Cada espectro de referência é então comparado com o espectro desconhecido da imagem, produzindo uma imagem denominada de *Scale*. A partir daí, os espectros de referência e o da imagem com os contínuos removidos são comparados utilizando um algoritmo por mínimos quadrados e um coeficiente linear de correlação. Desta operação, o erro médio quadrático é determinado para cada espectro de referência, produzindo uma imagem *RMS*. Finalmente, uma imagem (*fit*) é produzida para cada mineral de referência resultante da divisão da imagem *Scale* pela do *RMS*.

Os resultados obtidos no processamento das imagens GEOSCAN no depósito Salobro segundo o método SFF não foram satisfatórios. A performance limitada deste método é observada nos *scattergrams* das imagens *scale* e *RMS*, onde foram utilizados

como *endmembers* todos os espectros dos litotipos presentes no depósito Salobro (Fig. 10). Nestes diagramas de dispersão é observada uma concentração anômala de pixels ao longo de uma reta que faz um ângulo alto com o eixo RMS. Isto implica que existe um ajuste inadequado entre os pixels da imagem e os espectros de referência, de forma que os resultados da classificação são considerados muito duvidosos e imprecisos.

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES As características dos depósitos de Zn-Pb do tipo estratiforme hospedado em sedimentos, mais facilmente detectadas por sensoriamento remoto, relacionam-se aos produtos do hidrotermalismo atuante sobre as rochas sedimentares hospedeiras (alterações primárias e secundárias no *pipe*, zoneamento lateral e mineralogia de alteração) e transformações metamórficas posteriores. Isto ocorre neste tipo de depósito pois as seqüências sedimentares hospedeiras não são únicas, variando desde metacherts até calcários, os quais apresentam respostas variadas nas bandas do sensor sob análise - algumas diagnósticas, outras não.

Assim, a adequação do modelo prospectivo realizando um estudo prévio sobre a área de interesse, aumenta a possibilidade de detecção correta de alvos metalogeneticamente importantes. A interpolação de características geológicas, petrográficas e espectrais das unidades aflorantes na área de interesse, com os aspectos fisiográficos que as controlam, pode ser um fator decisivo para o mapeamento dos alvos de prospecção.

No caso do depósito Salobro, os fatores fisiográficos da região inibiram o alcance de melhores resultados a partir do processamento das imagens GEOSCAN, principalmente no tocante à delimitação da seqüência hospedeira do minério de Zn-Pb. O recobrimento quase total da Seqüência Salobro por uma densa vegetação (que mesmo seca apresenta uma resposta espectral específica); a

presença de um espesso nível coluvionar (de aproximadamente 1m de espessura); e ação da alteração intempérica, mascaram, quase por completo, a real resposta espectral do substrato rochoso compreendido pela Sequência Salobro.

A estratégia do processamento dos dados GEOSCAN no depósito Salobro, portanto, foi primeiramente dirigida para o mapeamento de regiões que não apresentam cobertura vegetal e cobertura coluvionar (e.g. altos topográficos). A imagem falsa cor entre as bandas 17, 8 e 2 (RGB) permitiu cartografar a distribuição da vegetação no depósito. Nesta imagem foi possível delimitar pequenas áreas, dentro da sequência Salobro, que apresentam solo e rochas expostas. No produto gerado pela fusão do modelo digital de terreno à imagem falsa cor que representa simultaneamente as concentrações anômalas de sílica, hidroxilas e óxidos e hidróxidos de ferro (bandas 20, 14 e 6 - RGB), foi observado que tais áreas, isentas de vegetação, no interior da sequência, apresentam anomalias significativas de sílica e íons de ferro. Essas

áreas, quando comparadas com a geologia da área, coincidem plausivelmente com as expressões superficiais do nível de metachert ferruginoso (rocha hospedeira da mineralização) e formações ferríferas bandadas. Esse resultado é extremamente importante pois provavelmente trata-se de um dos poucos casos conhecidos na literatura de sensoriamento remoto geológico onde não só rochas indiretamente associadas a mineralização, mas também, o corpo do minério, foi caracterizado por sensores remotos numa região de clima tropical.

Agradecimentos À CVRD-DOCEGEO, pela disponibilização dos dados e suporte logístico em Janaúba-MG. T. Almeida agradece ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela bolsa de estudos de Mestrado. C.R. Souza Filho agradece o suporte do CNPq e FAPESP, respectivamente, pela bolsa de Produtividade em Pesquisa (Proc. No. 301.227/94) e pelo Auxílio à Pesquisa Jovem Pesquisador (Proc. No. 96/11139-2).

Referências

- Abreu F.R. & Oliveira O.A.B. de 1998. Geologia e ocorrências de zinco e chumbo do Depósito Salobro, Porteirinha-MG. In: Congr. Bras. Geol., 40, Belo Horizonte, 1998. *Anais*, SBG, 1, p. 140.
- Agar B. & Pavez A. 1999. Archival data; "Old dogs with new tricks?". In: 13th International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Vancouver, Canadá. *Proceedings* 1: 1-8.
- Almeida T. 2000. *Modelo Exploratórios para a prospecção de Zn-Pb utilizando dados de sensoriamento remoto: Estudo de caso do Depósito Salobro (Porteirinha-MG)*. 132p. (Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas).
- Boardman J.W. & Kruse F.A. 1994. Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Environment Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, I407-I418.
- Chenkui C., Xianfang H., Fusheng Z.D.L., Jun G., Guojuan W., Zhenguo J., Xialio Y., Song F. 1991. Deposit Image Model and optimization of prospect targets. In: 8th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Denver, Colorado (USA). *Proceedings*: 605-612.
- Clark R.N. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and Principles of Spectroscopy. <http://speclab.cr.usgs.gov/PAPERS/refl-mrs/refl4.html>. 14/06/1999.
- Conel J.E., Green R.O., Vane G., Bruegge C.J., Alley R.E., Curtiss B.J. 1987. Airborne imaging spectrometer-2: radiometric spectral characteristics and comparison of ways to compensate for the atmosphere. In: *SPIE*, 834: 140-157.
- Crocchetto-Rodrigues F.A., Vidigal M.L., Carneiro N.M., Greco S.M.C., Freitas M.E., Costa W.D. 1992. *Mapeamento Geológico-Estrutural em escala de 1:50.000 da região de Riacho dos Machados (MG)*. Relatório interno DOCEGEO – Geologia e Mineração.
- Curtiss B. & Goetz A.F.H. 1994. Field Spectrometry: Techniques and Instrumentation. In: *Proceedings of the International Symposium on Spectral Sensing Research*, Boulder-Co: 31-40.
- Daitx E.C. 1996. *Origem e evolução dos depósitos sulfetados tipo Perai (Pb-Zn-Ag) com base nas jazidas Canoas e Perai (Vale do Ribeira, PR)*. 431p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, S.P.).
- Dardenne M.A. & Freitas-Silva F.H. 1999. Pb-Zn ore deposits of Bambuí and Vazante Groups, in São Francisco Craton and Brasília Fold Belt, Brazil. In M.G. Silva e A. Misi (eds.) *Base Metal Deposits of Brazil*. Belo Horizonte, MME/CPRM/DNPM, 75-83.
- DOCEGEO. 2001. *Relatório Anual do Projeto Riacho dos Machados*. DOCEGEO (documento interno).
- Drumond J.B.V., Sperling E.V., Raposo F.O. 1980. *Projeto Porteirinha-Monte Azul (1:50.000). Relatório final*. I DNPM/CPRM, Inédito, 559p.
- Du M. 1996. Mineral mapping at El Abra copper Deposit, Chile, using GEOSCAN 24-Channel scanner data and spectral angle mapper classifier. In: 11th Thematic Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing, Las Vegas. *Proceedings* I: 385-391.
- Fleischer R. & Espourteille F.S. 1999. The Boquira lead-zinc mine in Central Bahia, Brazil. In M.G. Silva e A. Misi (eds.) *Base Metal Deposits of Brazil*. Belo Horizonte, MME/CPRM/DNPM, p. 44-53.
- Fraser S.J. & Agar R.A. 1997. GIS Integration of Airborne Multispectral, Geophysical and other Mineral Exploration Data at the el Halcon Porphyry Copper Prospect, Copiapo, Chile. In: 12th International Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing, Denver, Colorado. *Proceedings* II: 245-252.
- Goodfellow W.D., Lyndon J.W., Turner R.J.W. 1993. Geology and Genesis of Stratiform Sediment Hosted (SEDEX) Zinc-Lead-Silver Sulphide Deposits. In Kirkham, R.V.; Sinclair, W.D.; Thorpe, R.I. & Duke, J.M.(eds.), *Mineral Deposits Modeling: Geological Association of Canada*, Canadá, Special Paper 40: 201-251.
- Grove C.I., Hook S., Paylor E.D. 1992. *Laboratory reflectance Spectra of 160 minerals 0.4 to 2.5micrometer*: JPL Publication 92-2, Pilot Land Data System, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
- Guilbert J.M. & Park C.F. 1986. Deposits related to submarine volcanism and sedimentation. Freeman and Company (ed), *The Geology of Ore Deposits*. New York, 660-675.
- Guimaraes M.L.V., Crocchetto-Rodrigues F.A., Abreu F. R., Oliveira O.A. B., Greco F.M. 1993. Geologia do Bloco Itacambira-Monte Azul entre Barrocas e Porteirinha (MG). In: SBG/ Núcleo MG, VII Simpósio de Geologia de Minas Gerais, *Anais*, 12: 74- 78.

- Gustafson L.B. & Williams N. 1981. Sediment-hosted stratiform deposits of copper, lead and zinc. *Economic Geology*, 75th Anniversary: 139-178.
- Holm O., Pongratz J., McGoldrick P. 1999. Basins, Fluids and Zn-Pb Ores, CODES Special publication 2.
- Kruse F.A. 1990. Artificial Intelligence for analysis of imaging spectrometer data. *Proceedings ISPR Commission VII, Working Group 2: "Analysis of High spectral resolution imaging data"*, Victoria, B.C., Canada, 17-21 September 1990. 59-68.
- Kruse F.A., Lefkoff A.B., Dietz J.B. 1993. Expert System-Based Mineral Mapping in Northern Death Valley, California/Nevada using the airborne visible/infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment*, Special issue on AVIRIS, May-June, 309-336.
- Largie D.A., Lockett N.H., Agar R.A.A., Kroenke M., Lyon R.J.P. 1993. An integrated LANDSAT- MSS, aeromagnetic, air- photographic and GEOSCAN AMSS approach to gold exploration in Nevada. In: 9th Thematic Conference on Remote Sensing Exploration, Environment and Engineering, Pasadena, California (USA). *Proceedings*, 2: 315-322.
- Largie D.E. 1983. Sediment-hosted massive sulphide lead-zinc deposits: An empirical model. In: Sangster, D.F., (ed.), *Sediment- Hosted Stratiform Lead- Zinc Deposits: Mineralogical Association of Canada*, Short Course Handbook, 8: 1-29.
- MacIntyre D. 1995. Sedimentary Exhalative Zn-Pb-Ag. In Lefebure, D.V. & Ray, G.E. (eds.), *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles*, 1: Metallics and Coal, Ed. British Columbia Ministry of Energy of Employment and Investment, Open File 1995-20, 37-39.
- Macklin S. 1998. Simis-Field Version 2.8. *Spectrometer Independent Mineral Identification Software*. User Manual version 2.8.
- Maracci G. 1992. Field and laboratory narrow band spectrometers and the techniques employed. In: Toselli, F. & Bodechtel, J. (eds.). *Imaging Spectroscopy: Fundamentals and Prospective Applications*. 33-46.
- Passos R.V. 1999. *Caracterização da geometria de zonas de alteração hidrotermal- Estudo de caso no depósito aurífero de Brumal, Quadrilátero Ferrífero, MG*. 180p. (Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.).
- PROSPEC-Prospecção e aerolevantamentos 1993. *Aerolevantamento multispectral com o sistema GEOSCAN MKII. Área de Baía-Serrinha – MG*. DOCEGEO- Relatório interno. 66p.
- Roberts D.A., Yamaguchi Y., Lyon R.J.P. 1985. Calibration of airborne imaging spectrometer data to percent reflectance using field measurements. *Proceedings of the 19th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. 21-25.
- Santos L.D. & Paes V.J.C. 1992. *Mapeamento Geológico da Serra do Coco e Imediações, Município de Porteirinha/MG*. 27p. (Trabalho de Graduação, IGC-UFMG, Belo Horizonte).
- Spatz, D.M. 1999. Remote Sensing characteristics of sediment-hosted stratiform copper deposits. In: 13th International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Vancouver, Canadá. *Proceedings*, 1:214-221.
- Spatz D.M. 1997. Remote sensing characteristics of the sediment- and volcanic- hosted precious metal systems: imagery selection for exploration and development. *International Journal of Remote Sensing*, 18, n° 7: 1413-1438.
- Spatz D.M. & Wilson R.T. 1997. Remote sensing characteristics of the volcanic- associated massive sulfide systems. In: 12th International Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing. Denver, Colorado. *Proceedings* I: 1-12.
- Spatz D.M. 1996. Remote sensing characteristics of precious metal systems: The sediment-hosted and detachment related deposits, 11th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Ann Arbor, *Proceedings*, I: 13-22.
- Swalf P. S. 2000. *Modelo Exploratório para depósitos auríferos do tipo Morro do Ouro com base em dados e técnicas de sensoriamento remoto*. 118p. (Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas).
- Wilton D. 1998. SEDEX- Type Massive Sulphide Deposits In: http://www.bc-mining-house.com/prospecting_school/dp_msdx.html.

Manuscrito SR-01

Recebido em 12 de agosto de 2002

Revisão dos autores em 20 de fevereiro de 2003

Revisão aceita em 03 de abril de 2003