ANÁLISE ESPACIAL GUIADA PELOS DADOS (*DATA-DRIVEN*): O USO DE REDES NEURAIS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL POLI-MINERÁLICO NA REGIÃO CENTRO-LESTE DA BAHIA

RODRIGO PARREIRA NÓBREGA & CARLOS ROBERTO DE SOUZA FILHO

Abstract *DATA-DRIVEN SPATIAL ANALYSIS: THE USE OF NEURAL NETWORKS TO EVALUATE THE POLI-MINERALIC POTENTIAL OF THE CENTRAL-EASTERN PORTION OF THE BAHIA STATE* This paper focussed on the use of Geographical Information Systems to combine spatial data from different sources; to identify and describe spatial associations present in the data; and to use models for analysis and prediction of spatial phenomena related to mineral deposits (mineral potential mapping), in the central-eastern portion of the Bahia State, Brazil. Employing geological, geophysical and geochemical data, the work involved several pre-processing and processing steps, including the conversion of heterogeneous datasets to a common format and coordinate system; extensive data processing of thematic data aiming to extract useful information for input in the GIS analysis; and multi-map combination and decisive assembly of mineral potential maps for the study area. The prediction of mineral potential for known deposits in the study area, including asbestos, iron, manganese and others, was made through the data-driven approach, and the various input maps were combined using artificial neural network analysis. The results derived from this model were interesting though inhibited by the lack of a more representative number of occurrences for each type of deposit, a critical issue for the success in any data-driven modelling.

Keywords: neural networks, spatial analysis, Geographical Information Systems, mineral deposits, Bahia.

Resumo O objetivo deste artigo foi o de realizar análises espaciais através de Sistema de Informações Geográficas visando a produção de mapas de favorabilidade, ou mapas potenciais, para diversos bens minerais na região centro-leste do Estado da Bahia. De posse de um banco de dados geológico, geofísico e geoquímico, o estudo compreendeu a conversão dos dados para um formato adequado; vasto processamento de dados visando à extração de informações necessárias para as análises; e a produção final de mapas de favorabilidade mineral. A definição de áreas potenciais para depósitos previamente conhecidos na região, incluindo amianto, ferro, manganês, entre outros, foi realizada com o auxílio das redes neurais artificiais, em uma abordagem guiada pelos dados (*data-driven*), fazendo uso da tecnologia de inteligência artificial. Os resultados obtidos através dessa análise foram interessantes, muito embora com certo grau de ambigüidade, função da pequena quantidade de depósitos conhecidos na região, o que é essencial para o sucesso das análises do tipo *data-driven*.

Palavras-chave: redes neurais, análise espacial, Sistemas de Informações Geográficas, depósitos minerais, Bahia.

INTRODUÇÃO Com o advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a partir da década de 1960, inúmeras técnicas foram desenvolvidas para auxiliar na interpretação e análise de dados espaciais. Métodos que utilizam álgebra cartográfica e métodos de extração de significado a partir de dados multi-temáticos representam um enorme avanço em comparação à simples integração e visualização de dados disponíveis em qualquer SIG.

Diversas definições de SIG podem ser encontradas em Maguire *et al.* (1991), porém um conceito simples é dado por Bonham-Carter (1994), que o define como um sistema computacional que gerencia dados espaciais. Segundo este autor, estes sistemas tiveram um tremendo impacto em muitos campos de aplicação, por permitirem a manipulação e análise de camadas (*layers*) individuais de dados espaciais, e por fornecerem ferramentas para análise e modelamento das inter-relações entre essas camadas. A pesquisa mineral, especificamente, necessita de considerações simultâneas sobre diversos tipos de evidências espaciais para os depósitos minerais, como geologia, estruturas, e características geoquímicas e geofísicas de uma região, e sua relação com depósitos previamente conhecidos.

Harris *et al.* (2000) descreveram as características de consulta,

manipulação, visualização e análise de dados de um SIG, e como estas ferramentas têm sido usadas na geração de mapas de favorabilidade (ou potencial) mineral, através da análise espacial. Bonham-Carter (1994) define análise espacial como o processo de inferência de significados a partir dos dados, o que deve ser usado como fator para predição de áreas de favorabilidade através de modelos de mineralização. Em pesquisa mineral, mapas de favorabilidade representam áreas classificadas (ou ordenadas), indicando o maior ou menor potencial de ocorrência de depósitos minerais ainda por serem descobertos.

Bonham-Carter (1997) classifica as várias técnicas de mapeamento de potencial mineral em duas abordagens distintas: a *knowledge-driven*, onde os parâmetros do modelo de mineralização são definidos por um especialista, e que compreende os métodos de lógica booleana e fuzzy e a crença Dempster-Shafer; e a *data-driven*, na qual o modelo é calculado a partir dos dados (ocorrências conhecidas), compreendendo os métodos da Regressão Logística, Ponderação de Evidências e Redes Neurais.

O método das redes neurais oferece uma abordagem vantajosa à questão do mapeamento da favorabilidade mineral, pois as redes neurais representam um sistema computacional adaptativo que

pode aprender, ou adquirir conhecimento, a partir dos dados, mediante técnicas de inteligência artificial. Segundo Brown *et al.* (2000), as redes neurais possuem algumas propriedades que as tornam adequadas ao reconhecimento de padrões e à classificação de dados espaciais, entre as quais: (i) a habilidade em extrair padrões ocultos em conjuntos de dados que podem ser imperceptíveis aos humanos e às técnicas estatísticas tradicionais; (ii) a capacidade de analisar dados sem nenhum conhecimento prévio, não necessitando de um modelo de depósito mineral; (iii) a possibilidade de trabalhar com dados ruidosos, limitados, interdependentes ou não-lineares; (iv) a possibilidade de adição contínua de novos dados; (v) a facilidade para a análise de grandes conjuntos de dados.

Devido às suas características, no método das redes neurais o conhecimento é adquirido mediante um processo de aprendizado a partir de exemplos (Brown *et al.* 2000), os quais, em pesquisa mineral, são representados por ocorrências minerais conhecidas. No processo de aprendizado, o conhecimento armazenado é distribuído através da rede de dados na forma de valores ponderados, modificados como resultado do treinamento.

Visto o imenso potencial desse método de análise espacial para exploração mineral, o objetivo deste trabalho foi o de utilizar a Análise por Redes Neurais (ARNs), no ambiente de um Sistema de Informações Georreferenciadas, para avaliar a favorabilidade mineral na região centro-leste do estado da Bahia, partindo-se de um pressuposto básico: “dada uma área com conhecimento geológico prévio e depósitos minerais conhecidos, quais seriam os setores prováveis onde poderíamos encontrar novas ocorrências?”. A flexibilidade do método permite que se façam diferentes análises com *commodities* minerais distintos, possibilitando, por exemplo, que órgãos de estímulo à pesquisa mineral forneçam mapas detalhados de favorabilidade à pequenos e grandes mineradores.

Neste trabalho, foram utilizadas diversas ferramentas de SIG, geoestatística e de processamento de imagens para processar dados geológicos, geoquímicos e geofísicos, os quais servirão de entrada para a análise espacial por meio de redes neurais.

GEOLOGIA A área estudada (Fig. 1) localiza-se na região centro-oriental do Estado da Bahia, abrangendo parte dos municípios de Baixa Grande, Macajuba, Rui Barbosa, Ipirá e Itaberaba. Na área mapeada por Rangel *et al.* (1988) foram encontradas rochas migmatíticas de grau metamórfico da fácies anfibolito e rochas granulíticas de composição variando de granítica a tonalítica, em parte apresentando estruturas migmatíticas. Esses autores descreveram ainda rochas supracrustais metamorfisadas, como quartzitos, rochas calcossilicáticas e anfibolitos, ocorrendo tanto no domínio do complexo metamórfico-migmatítico como no do complexo granulítico (Fig. 1).

Rangel *et al.* (1988) apresentam as dificuldades de se estabelecer uma coluna estratigráfica para esses terrenos de alto grau metamórfico, principalmente em função da história complexa de eventos tectono-metamórficos polifásicos que os moldaram. Apesar disso, esses autores esboçam a seguinte estratigrafia, do topo para a base, para a região centro-oriental da Bahia (Fig. 1): Cobertura detrítica; Granitos; Granitóides; Complexo granulítico; Complexo metamórfico-migmatítico; Unidade Ipirá (seqüência metassedimentar químico-pelítica e seqüência metaígneia máfica-ultramáfica).

A seqüência metaígneia máfica-ultramáfica da Unidade Ipirá é constituída por anfibolitos, gabros, peridotitos, serpentinitos e piroxenitos. A seqüência metassedimentar químico (exalativa?)-pelítica é composta por quartzitos, formação ferrífera, chert,

calcossilicáticas e gnaisses kinzigíticos. Rangel *et al.* (1988) admitem que a maior parte da subunidade máfica-ultramáfica inferior corresponde a relictos de um greenstone belt Arqueano, o qual teria sido submetido à fácies anfibolito alto, migmatizado e posteriormente alçado a níveis mais elevados da crosta. Da mesma maneira, as extensas faixas de metassedimentos químico-pelíticos e exalativos foram posicionadas na subunidade superior do greenstone belt (Rangel *et al.* 1988). O complexo metamórfico-migmatítico é constituído de rochas gnáissicas de fácies anfibolito de médio a alto grau, com estruturas migmatíticas de baixa a alta mobilidade, incluindo metatexitos e diatexitos. O complexo granulítico é constituído de rochas que foram submetidas ao metamorfismo de alto grau da fácies granulito. Em sua maior parte, apresenta rochas de composição granítica a tonalítica com hiperstênio e hornblenda-granitóide com mesopertita. Os granitóides são litotipos provenientes de extensa metassomatose potássica que afetou principalmente as rochas granulíticas, resultando na formação de granitóides porfiroblásticos devido à forte blastese de K-feldspato que frequentemente ocorre como augen. Granitos apresentam-se em duas categorias, os sintectônicos e os pós-tectônicos. Os primeiros estão parcialmente estruturados e concordantes com a estruturação regional. Os seguintes ocorrem principalmente como corpos filoneanos cortando os augen-granitóides. As coberturas detríticas não consolidadas Terciário-Quaternárias encerram o esquema cronoestratigráfico da área.

Nesta análise por RNAs, as ocorrências minerais exercem uma influência fundamental. Na área estudada são encontradas ocorrências minerais de talco, amianto, apatita, calcário, ferro, manganês, cristal de rocha e quartzo (Fig. 1 e Tabela 1), bem como ocorrências de grafita, argila e feldspato.

BASE DE DADOS Além da geologia supracitada, foram utilizados neste estudo, dados aerogeofísicos e geoquímicos.

Dados Aerogeofísicos Compreendem a magnetometria (campo total) e a gamaespectrometria (contagem total e canais de potássio, tório e urânio). O levantamento aerogeofísico foi realizado em 1975, no âmbito de um convênio entre o Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) e a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), para a aquisição, processamento e interpretação de dados magnetométricos e radiométricos no Brasil. Esse levantamento foi realizado segundo a direção NS, a uma altura de voo de 150 m, com espaçamento entre as linhas de voo (*flight-lines*) de 1 Km e entre as linhas de controle (*tie-lines*) de 20 Km. As leituras do aeromagnetômetro foram realizadas a cada 100 m e do aerogamaespectrômetro a cada 1 segundo.

Dados Geoquímicos Abrangem 862 amostras de sedimento de corrente, analisadas para 30 elementos por espectrografia de emissão ótica semi-quantitativa (Fe, Mg, Ca, Ti, Mn, Ag, Au, As, B, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, V, W, Y, Zn e Zr) e, adicionalmente, por espectrometria de absorção atômica (Cu, Ni, Co, Pb, Zn, Fe, Mn e As) (Rangel *et al.* 1988). Para os elementos analisados por ambos os métodos, optou-se por utilizar resultados de absorção atômica, devido à sua maior sensibilidade (Riddle & Dekker 1993).

Completem o acervo utilizado nas análises os dados referentes à base cartográfica da região, incluindo a hidrografia (rede de drenagens) e na hipsometria (topografia).

Figura 1 - Mapa geológico da porção centro-oriental do Estado da Bahia (Folha Itaberaba) e ocorrências minerais investigadas neste estudo (adaptado de Rangel et al. 1988).

Tabela 1 - Ocorrências minerais na área estudada.

Substância	Município	Localidade	Status	Mineralogia
Amianto	Itaberaba	Faz. Campo das Pedras	ocorrência	Amianto, opala, calcedônia
Amianto	Itaberaba	Faz. Lagoa da Onça e Faz. Testa Branca	mina paralisada	Crisotila, vemiculita, magnetita, opala/calcedônia
Amianto	Ipirá	Faz. Poço Dantas	ocorrência	Crisotila
Amianto	Itaberaba	Faz. Solidão	ocorrência	Crisotila, serpentina, calcedônia
Apatita	Ipirá	Faz. Canto do Morro	ocorrência	Apatita, calcita, calcedônia, quartzo, pirita
Apatita	Ipirá	Faz. Retiro	ocorrência	Apatita, vermiculita, calcita, flogopita, grafite
Apatita	Ipirá	Faz. Pedra Branca	ocorrência	Apatita, quartzo, calcita, vermiculita, flogopita
Apatita	Ipirá	Faz. Painelas	ocorrência	Apatita, calcita, vermiculita, flogopita, grafite
Apatita	Ipirá	Pau de Colher	ocorrência	Apatita, vermiculita, calcita, calcedônia, biotita
Argila	Ipirá	Faz. Jaguarão	garimpo	Argila, quartzo
Argila	Ipirá	Faz. Conquista (Faz. Fontinha)	garimpo	Argila
Calcário	Ipirá	Faz. Morro do Cesário	ocorrência	
Cristal de Rocha	Baixa Grande	Faz. Junco	ocorrência	Cristal de rocha
Cristal de Rocha	Baixa Grande	Faz. Soledade	garimpo	Cristal de rocha
Cristal de Rocha	Itaberaba	Faz. São Mateus	ocorrência	Cristal de rocha
Feldspato	Baixa Grande	Faz. Ipoeira	ocorrência	Feldspato, calcedônia, quartzo leitoso
Ferro	Itaberaba	Faz. Campestre/Faz. Quixaba	ocorrência	Magnetita, hematita, quartzo
Ferro	Itaberaba	Roca Velha	ocorrência	Hematita, magnetita
Grafita	Ipirá	Faz. Cacimba	ocorrência	Grafita, quartzo
Manganês	Ipirá	Faz. Candeias	ocorrência	Pirolusita
Quartzo	Baixa Grande	Faz. Itapicuru	ocorrência	Quartzo leitoso
Talco	Baixa Grande	Faz. Santana	ocorrência	Talco, serpentina, magnetita
Talco	Itaberaba	Faz. Marinhos/Faz. São Lourenço	ocorrência	Talco, antofilita, esteatita
Talco	Itaberaba	Faz. Bonita	ocorrência	Talco, magnetita
Talco	Itaberaba	Faz. Lagoa Escondida	ocorrência	Talco, magnetita

MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE DADOS GEOLOGIA

O mapa geológico apresentado na Figura 1 foi gerado a partir da generalização da geologia original, que consiste em um complexo mapa litológico contendo 21 unidades distintas (Rangel et al. 1988). Baseando-se no esboço estratigráfico elaborado por estes autores, os litotipos foram agrupados nas 7 principais unidades que compõem o arcabouço geológico da área, através da descrição litológica das unidades estratigráficas propostas.

As principais estruturas geológicas documentadas no mapa geológico foram utilizadas para produção de um mapa temático de zonas ao redor de falhamentos (através de *buffering*). Este mapa é ponderado de forma que regiões próximas à falhas comportam maior importância relativa, indicando áreas passíveis de terem sofrido influência de fluidos hidrotermais canalizados ao longo dessas estruturas. Neste estudo foram consideradas zonas de influência de 1000 metros ao redor das principais falhas. Uma síntese

do método proposto para o processamento dos dados geológicos é fornecida na figura 2.

Geofísica MAGNETOMETRIA Os dados do campo magnético total foram obtidos no formato tabular, em arquivos do tipo ASCII (XYZ). O primeiro passo efetuado no processamento destes dados foi a verificação da contiguidade do campo total, através do cálculo da autocorrelação espacial dos dados (Sawada 1999), usando-se o software *Rook's Case* (Sawada, op cit). Os dados mostraram autocorrelação positiva, possibilitando a geração de superfícies contínuas. Os valores pontuais do campo magnético total foram então convertidos para valores de campo magnético local com a retirada do efeito causado pelo campo geomagnético. Para efeito de comparação, duas abordagens foram testadas: (i) uma simples aproximação, com a subtração de uma superfície polinomial de primeira ordem calculada a partir dos pontos amostrados; (ii) outra, mais correta, através da retirada do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) calculado para a data do levantamento (Luyendyk 1997). Superfícies contínuas foram geradas para o campo magnético local pelos métodos de interpolação do inverso do quadrado da distância, mínima curvatura e krigagem, envolvendo, para este último, o cálculo dos variogramas direcionais. Critérios para a escolha da superfície que melhor representa a distribuição discreta dos dados do campo local foram fornecidos pelas técnicas da Justificação Interpolada (Berry 1997) e Gradiente INR (Nóbrega 2001).

A imagem resultante da interpolação apresentou ruídos indesejáveis, fazendo-se necessário o uso de técnicas de filtragem para remoção de ruídos. A primeira correção aplicada foi o micro-nivelamento (Minty 1991, Luyendyk 1997), para retirar erros de nivelamento residuais dos dados aeromagnéticos. Para remover o efeito causado pelas linhas de voo e *tie-lines* foi realizada a filtragem no domínio da frequência (Souza Filho & Denniss 1997, Gonzalez & Wintz 1977), utilizando filtro cosseno bidirecional. A suavização definitiva dos ruídos foi realizada com aplicação de filtragem no domínio espacial por convolução de um filtro passa-baixas 3x3, resultando na imagem de campo magnético local (Fig. 3).

A partir do mapa de intensidades magnéticas locais pode-se determinar outros produtos importantes para a geração de mapas de favorabilidade mineral, como as derivadas horizontais e a derivada vertical do campo magnético, utilizadas para a produção do mapa de sinal analítico (Milligan & Gunn 1997).

A estatística das imagens de campo magnético local e sinal analítico foi calculada para determinação de *background* e limiares, e conseqüente produção de mapas de anomalias magnéticas, os quais foram utilizados na análise espacial (Fig. 4). Os principais métodos e etapas de processamento dos dados magnetométricos são apresentados no fluxograma da figura 5.

GAMAESPECTROMETRIA De maneira similar ao processamento dos dados magnetométricos, os dados relativos à leitura de contagem total, potássio, tório e urânio (originalmente em formato ASCII) foram submetidos à determinação da autocorrelação espacial para verificação de contigüidade (Sawada 1999). Constatou-se uma autocorrelação positiva para todos os dados, possibilitando a geração de superfícies contínuas. Os canais da radiometria foram convertidos de seus valores quantitativos, em contagens por segundo, para semi-quantitativos (Amaral & Pascholati 1998). O potássio foi expresso em porcentagens (K%), e tório e urânio foram calculados para seus equivalentes em partes por milhão (eTh e eU). Os canais de K%, eTh, eU e contagem total

Figura 2 - Método utilizado no processamento dos dados geológicos.

Figura 3 - Campo magnético local corrigido.

foram interpolados através dos métodos inverso do quadrado da distância, mínima curvatura e krigagem, com o cálculo das variogramas para este último, e em diferentes resoluções. De maneira semelhante a magnetometria, as superfícies contínuas foram selecionadas mediante critérios determinados pelas técnicas da Interpolação Justificada (Berry 1997) e do Gradiente INR (Nóbrega 2001). A remoção de ruídos nos canais de radiometria causados pelas linhas de voo e *tie-lines* foi realizada por uma filtragem no domínio da frequência por meio de uma transformação de Fourier (Souza Filho & Denniss 1997, Gonzales & Wintz 1977), utilizando-se o filtro cosseno bidirecional. A suavização final das imagens foi obtida por filtragem no domínio espacial, utilizando-se um filtro de

Figura 4 - Anomalias magnéticas de campo local (a) e sinal analítico (b).

Figura 5 - Etapas do processamento dos dados aeromagnetométricos.

convolução passa-baixas de ordem 3x3.

A determinação de áreas relacionadas às anomalias radiométricas foi realizada segundo o método descrito por Saunders

et al. (1993) e Pires (1995). Os mapas de anomalias radiométricas finais (Fig. 6) foram obtidos a partir do cálculo da estatística para cada um dos quatro canais, de modo a se determinar seus respectivos valores de limiar e *background*. O processamento aplicado aos dados aerogamaespectrométricos pode ser observado no fluxograma da figura 7.

Geoquímica Neste trabalho optou-se por uma análise mais simplificada da distribuição dos elementos químicos pela superfície, sem um rigor maior quanto ao fato de que anomalias de sedimento de corrente são, por definição, transportadas. Neste caso, para se converter teores de elementos químicos amostrados pontualmente para áreas anômalas, foram executadas interpolações através do Gradiente INR (Nóbrega 2001), uma para cada elemento analisado.

Posteriormente, foi calculada a estatística de cada uma das distribuições químicas, de modo a se determinar os limiares e *background* (Nóbrega 2001) para a produção dos mapas de anomalias geoquímicas a serem utilizados nas ARNs (Fig. 8).

ANÁLISE POR REDES NEURAIS (ANR) O método das redes neurais (Haykin 2001, Kartalopoulos 1996, Clothiaux e Bachmann 1994, Masters 1993, Lippman 1989) oferece diversas vantagens em relação a outros métodos para a análise de dados, de diferentes fontes, utilizados em pesquisa mineral regional ou predição de prospectividade mineral (Brown *et al.* 2000). Métodos estatísticos como a probabilidade bayesiana e ponderação de evidências (Agterberg *et al.* 1993) necessitam de um grande número de ocorrências minerais conhecidas para estimar a importância relativa das evidências geológicas associadas aos depósitos. Métodos conceituais (*knowledge-driven*) como *Index Overlay* ou lógica fuzzy (Bonham-Carter 1994) necessitam de um especialista em depósitos minerais para estabelecer um modelo, normalmente definindo parâmetros subjetivos. Áreas onde poucos depósitos são conhecidos, ou para as quais o modelo metalogenético é precário ou não estabelecido, dificilmente podem ser investigadas por estas técnicas.

Redes neurais artificiais são modelos computacionais distribuídos, paralelos, adaptativos e inspirados no raciocínio humano (Brown *et al.* 2000). Essas redes são compostas por elementos de processamento simples chamados de neurônios, os

Figura 6 - Mapas de anomalias radiométricas de contagem total, potássio, tório e urânio. Branco: anomalias negativas. Preto: anomalias positivas.

Figura 7 - Processamento dos dados aerogamaespectrométricos.

quais são interconectados por *links* associados a coeficientes numéricos (pesos) que indicam a força de cada conexão (Haykin 2001, Kartalopoulos 1996). Uma rede neural é constituída por uma camada de entrada (mapas evidenciais), uma camada de saída (resultado), e uma ou duas camadas ocultas, contendo a função que irá determinar os coeficientes numéricos a serem associados aos neurônios, permitindo a sua classificação (Haykin 2001, Brown *et al.* 2000) (Fig. 9).

A camada de entrada é composta por vetores em um espaço n -dimensional (sendo n o número de mapas evidenciais) formados pela combinação individual dos valores dos pixels dos mapas

evidenciais (Fig. 10). A determinação dos vetores da camada de entrada se dá de maneira análoga à forma na qual bandas de imagens de sensoriamento remoto são classificadas para se obter assinaturas de minerais de alteração hidrotermal (Brown *et al.* 2000). Assim, dados geológicos, geofísicos e geoquímicos no formato digital, podem ser superpostos em SIG para produzir uma imagem na qual a assinatura dos depósitos minerais pode ser extraída, com base em pontos de treinamento relacionados a depósitos conhecidos, de modo a prever a localização de novos depósitos.

Diversas funções podem ser utilizadas na camada oculta. As mais utilizadas são as MLPs (*Multi-Layer Perceptrons*, Brown *et al.* 2000) e as RBFs (*Radial Basis Functions*; Looney & Yu 2000). Enquanto nas redes neurais MLP a função da camada oculta envolve operações simples de adição, multiplicação e uma transformação não-linear aos sinais de entrada, as RBFs utilizam funções radiais para determinar a proximidade do vetor de entrada daqueles determinados na fase de treinamento (Fig. 11) - que representam os depósitos conhecidos. Segundo Looney & Yu (2000), as RBFs são simples e o treinamento é efetuado mais rapidamente que em redes MLPs, além de permitirem a interpretação como sistemas baseados em regras fuzzy.

No presente trabalho optou-se por utilizar a abordagem da função de base radial RBF-LN (*Radial Basis Functional Link Network*), através do software DataXplore (Looney & Yu 2000), para combinar os diferentes bancos de dados. Para cada ocorrência mineral conhecida na área, os mapas de entrada foram selecionados de acordo com as características (Klein & Hurlbut 1985) do bem mineral em questão (Tabela 2).

Os mapas de favorabilidade mineral resultantes apresentaram, em geral, uma grande dispersão quanto aos seus máximos. A figura 12a exemplifica essa dispersão para o amianto, o que se repete para outros bens minerais. Isto se dá devido ao baixo número de pontos de treinamento existentes na área, fazendo com que a função de base radial não tenha parâmetros de entrada suficientes para determinar os clusters que definem o depósito mineral. Uma maneira de minimizar este efeito em áreas onde o número de ocorrências é pequeno, como no caso da área estudada, consiste em se utilizar o conhecimento geológico e limitar os alvos, através de máscaras representando litotipos, apenas aos tipos litológicos compatíveis com determinado tipo de depósito (Fig. 12b). Os mapas finais de favorabilidade para todos os bens minerais abordados nesse estudo são apresentados nas Figuras 13a-g.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS Observando-se os mapas da Figura 13 nota-se que o método das redes neurais produziu uma boa distribuição de alvos potenciais para os diversos bens

Figura 8 - Processamento dos dados geoquímicos. As amostras (a) são interpoladas para cada elemento químico, níquel neste exemplo; (b) seus limiares e background são utilizados para a produção do mapa de anomalias (c).

Figura 9 - Arquitetura da rede neural artificial utilizada neste estudo (mod. de Brown et al. 2000).

minerais, principalmente após a aplicação das máscaras litológicas que limitam os alvos apenas aos litotipos que, sabidamente, têm a possibilidade de portar o depósito mineral em questão.

Os mapas de apatita (Fig. 13a), quartzo/cristal de rocha (16c), ferro (16e) e manganês (16f) mostraram uma boa correlação entre as ocorrências conhecidas e os alvos definidos pela análise, permitindo inferir que os alvos distantes dos depósitos conhecidos sejam realmente potenciais portadores de mineralização.

Em alguns mapas (calcário, 16b, feldspato, 16d, talco, 16g) pode-se notar que as ocorrências conhecidas não se localizam sobre os máximos determinados pela rede neural, embora estejam situados em áreas de relativa alta favorabilidade. Isto ocorre devido à escassez de pontos de treinamento que irão definir os vetores formadores dos *clusters* resultantes da Função de Base Radial (RBF). Quanto maior o número de ocorrências e maior a

Figura 10 - Determinação dos vetores da camada de entrada (Brown et al. 2000).

Figura 11 - Definição de um cluster por meio de uma Função de Base Radial (RBF), in Looney & Yu (2000). ' x_1 , x_2 ': valores do vetor de entrada ' x '; ' v ': centro do agrupamento (cluster); ' y ': RBF. A todos os pontos ' x ' equidistantes do centro ' v ' são atribuídos o mesmo valor de ' y '.

Tabela 2 - Dados utilizados na análise por redes neurais para 9 bens minerais documentados na Folha Itaberaba: (i) geologia (distinta para cada commodity); (ii) distância às principais estruturas; (iii) distância ao contato geológico; (iv) magnetometria (campo local); (v) gamaespectrometria (4 canais) e (vi) anomalias geoquímicas diversas.

Substância	Geologia	Estrutura	Contato	Magneto- metria	Gama- espectrometria	Ca	Fe	Mg	Mn
Amianto	X	X		X	X	X	X	X	
Apatita	X	X	X	X	X	X			
Calcário	X	X		X	X	X		X	
Cristal de Rocha	X	X		X	X				
Feldspato	X	X		X	X	X			
Ferro	X	X		X	X		X		
Manganês	X	X		X	X				X
Quartzo									
Talco	X	X	X	X	X			X

Figura 12 - Mapa de favorabilidade mineral para amianto, antes (a) e após (b) a aplicação da máscara que limita os alvos apenas às áreas onde afloram tipos litológicos comumente associados a esse mineral.

consistência destas (do ponto de vista geológico-geofísico-geoquímico), mais bem definidos serão os agrupamentos e, conseqüentemente, os alvos de prospecção – bem como o ajuste entre a verdade terrestre e os mapas derivados da análise.

CONCLUSÕES Os resultados obtidos com a análise espacial por redes neurais artificiais permitem algumas considerações relevantes. A primeira consideração é que este método permite, uma vez que um bom acervo de dados esteja disponível, avaliar de maneira rápida e flexível a potencialidade mineral de determinada região de modo a incentivar a mineração por pequenos ou grandes produtores. A disponibilização gratuita, pelo Geological Survey of Canada, do software que executa essa análise permite que os custos sejam reduzidos para áreas com profundo conhecimento geológico, geofísico e geoquímico. Contudo, os resultados devem ser avaliados com critério, sobretudo geológico, pois nenhum processamento computacional pode substituir o conhecimento da geologia de uma área.

A abordagem da análise direcionada pelos dados (*data-driven*) executada no método das redes neurais não necessita de modelos metalogenéticos e nem de um especialista em mineralizações, evitando-se o direcionamento dos resultados por critérios

subjetivos. Por outro lado, esse direcionamento será dado pela qualidade e pela quantidade de dados disponíveis e, portanto, um bom acervo de dados é fundamental para a confiabilidade dos resultados oriundos desta análise.

Observou-se ainda que a qualidade dos alvos resultantes da análise é uma função do número de pontos de treinamento, ou seja, depósitos minerais conhecidos. Isto significa que quanto mais depósitos forem conhecidos, mais bem definidas serão suas assinaturas geológico-geofísico-geoquímicas, em analogia às assinaturas espectrais em imagens de sensoriamento remoto.

O significado dos alvos foge ao escopo desse estudo, os quais somente poderão ser investigados na medida em que dados de maior detalhe estejam disponíveis para cada tipo de mineralização considerada na análise.

Agradecimentos À Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM) pela disponibilização dos dados do Projeto Itaberaba. Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida a R.P.Nóbrega e pela bolsa de Produtividade em Pesquisa (Proc. No. 301.227/94) concedida a C.R. de Souza Filho. Os autores são gratos ainda ao trabalho dos revisores da RBG, cujas críticas e sugestões foram importantes para o aprimoramento do artigo.

Figura 13 - Mapa de favorabilidade mineral para (a) apatita; (b) calcário; (c) quartzito/cristal de rocha; (d) feldspato; (e) ferro; (f) manganês; (g) talco.

Referências

- Agterberg F.P., Bonham-Carter G.F., Cheng Q., Wright D.F. 1993. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping. In Davis, J.C. and Herzfeld, U.C. (eds.), 1993, *Computers in Geology: 25 years of progress*, Oxford University Press, Oxford, 13-22.
- Amaral G. & Pascholati E.M. 1998. Transformação dos dados aerogeofísicos do Projeto Rio das Velhas para uso em integração de dados. *Anais do XL Congresso Brasileiro de Geologia*. Belo Horizonte, SBG-MG, 29-32.
- Berry J.K. 1997. Justifiable Interpolation. *GIS World*, 2: p.34-35.
- Bonham-Carter G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists – Modelling with GIS*. Pergamon, 400p.
- Bonham-Carter G.F. 1997. GIS methods for integrating exploration data sets. *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International*

Conference on Mineral Exploration, 59-64.

Brown W.M., Gedeon T.D., Groves D.I., Barnes R.G. 2000. Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping, *Australian Journal of Earth Sciences*, **47**(4): 757-770.

Clothiaux E.E., Bachmann C.M. 1994. Neural Networks and their applications. In: Hewitson, B. C.; Crane, R. G. (eds), *Neural Nets: Applications in Geography*; Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 11-52.

Gonzalez R.C. & Wintz P. 1977. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley, 502p.

Harris J.R., Wilkinson L., Grunsky E.C., 2000. Effective use and interpretation of lithogeochemical data in regional mineral exploration programs: application of Geographic Information Systems (GIS) technology. *Ore Geology Reviews*, **16**:107-143.

Haykin S. 2001. *Redes Neurais princípios e Prática*. Porto Alegre, Bookman, 900p.

Klein C. & Hurlbut Jr. C.S. 1985. *Manual of Mineralogy*. 20th Ed., John Wiley & Sons, 402p.

Kartalopoulos S.V. 1996. *Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic Basic Concepts and Applications*. Piscataway, N.J., IEEE Press, 98p.

Lippman R.P. 1989. Review of Neural Networks for Speech Recognition. *Neural Computation*, **1**:1-38.

Looney C.G. & Yu H. 2000. *Special software development for Neural Network and Fuzzy Clustering analysis in Geological Information Systems*. Geological Survey of Canada, 34p.

Luyendyk A.P.J. 1997. Processing of airborne magnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2): 31-38.

Maguire D.J., Goodchild M.F., Rhind D.W. 1991. *Geographic Information Systems*, Vol. 1. New York, Longman Scientific & Technical - John Wiley & Sons, Inc., 250p.

Masters T. 1993. *Practical Neural Network Recipes in C++*. Academic Press, San Diego, 284p.

Milligan P.R. & Gunn P.J. 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**:63-75

Minty B.R.S. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. *Exploration Geophysics*, **22**:591-592

Nóbrega R.P. 2001. *Análise espacial knowledge-driven e data-driven: o uso das lógicas booleana, fuzzy e redes neurais para geração de mapas de favorabilidade mineral na região centro-leste da Bahia*. Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 72p.

Pires A.C.B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Rev. Bras. Geoc.*, **25**:61-68

Rangel P.A., Moraes A.M.V., Toledo L.A.A., Fróes R.J.B. 1988. *Projeto Itaberaba – Relatório Final*. Volume 1. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, Salvador. 138p.

Riddle C. & Dekker M. 1993. *Analysis of Geological Materials*, 463 p.

Sawada M. 1999. ROOKCASE: An Excel 97/2000 Visual Basic (VB) Add-in for Exploring Global and Local Spatial Autocorrelation. *Bull. Ecol. Soc. Am.*, **80**:231-234.

Saunders D.F., Burson K.R., Branch J.F., Thompson C.K. 1993. Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. *Geophysics*, **58**:1417-1427

Souza Filho C.R. & Denniss A. 1997. Periodic noise suppression techniques applied to remote sensing images. *Boletim IG-USP, Sér. Cient.*, **28**:23-61.

Manuscrito SR-14

Recebido em 30 de setembro de 2002

Revisão dos autores em 21 de março de 2003

Revisão aceita em 20 de abril de 2003