

Aplicação da Abordagem da Importação Semântica (IS) para caracterização de contatos geológicos

FÁBIO ROQUE DA SILVA MOREIRA
RAIMUNDO DE ALMEIDA FILHO
GILBERTO CÂMARA

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12201-097 - São José dos Campos - SP, Brasil
fmoreira@ltd.inpe.br
rai@ltd.inpe.br
gilberto@dpi.inpe.br

Abstract

This work describes the use of semantic import approach (SI) as a way to characterize the sort of geological boundaries in GIS projects. The technique applies fuzzy sets to represent the nature of the lithological boundary (defined and inferred) in a spatial inference modelling study for mapping potential areas for radioactive mineral prospecting, in the Poços de Caldas alkaline complex.

Keywords: semantic import approach for boundaries, fuzzy sets.

Introdução

Cartograficamente, contatos são definidos por linhas que podem representar uma limitação na representação espacial das evidências necessárias em um modelamento desenvolvido em SIG. Essa imposição cartográfica simples e eficiente suprime a informação sobre a natureza da mudança espacial e tem criado a idéia em usuários de mapas temáticos, que solos, vegetação, ou contatos geológicos são sempre em qualquer lugar abruptamente definidos, e que as unidades são sempre homogêneas livres de erros de classificação ou posicionamento.

Por outro lado é sabido que variações em solo, vegetação ou geologia podem ocorrer abruptamente ou gradualmente. Um dique intrusivo pode formar contatos geológicos abruptos numa escala centimétrica, porém variações em textura de depósitos aluviais podem ocorrer sobre centenas de metros ou quilômetros. E mais, as classes (atributos) delimitadas pelos polígonos podem apresentar ambigüidades ou incertezas que normalmente são mais acentuadas nas zonas próximas aos contatos (zona de transição).

O problema da imprecisão dos contatos corresponde à discrepância existente entre as condições do mundo real e as informações apresentada pelo traçado dos contatos em um mapa. Esse problema tem dois aspectos; imprecisão natural e localização (Wang e Brent Hall, 1996).

O presente trabalho pretende aplicar a abordagem da Importação Semântica (IS), desenvolvida por Burrough e McDonnell (1998), na representação dos tipos de contato (definido, inferido) de unidades litológicas consideradas em um modelo prospectivo desenvolvido para definição de cenários potenciais a ocorrência de minerais radioativos no complexo alcalino de Poços de Caldas. As unidades litológicas favoráveis foram combinadas com outras evidências (anomalia gama-radiométrica e dados estruturais) em um processo de inferência espacial

definido pela teoria dos conjuntos *fuzzy*. O resultado foi comparado aos obtidos por Almeida Filho (1995) que aplicou as técnicas média ponderada e booleana.

Geologia

O Platô de Poços de Caldas localiza-se na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo, a aproximadamente 300 Km da cidade de São Paulo (**Figura 1c**). O maciço de formato aproximado circular possui uma área de 750 Km², com diâmetro maior de cerca de 35Km de comprimento. As rochas constituintes são de filiação alcalina com idade Mesozóica- Cenozóica, sendo as mais abundantes de filiação nefelinas-sienitos (tinguaítos, fonólitos, foiaítos) conforme mapa litológico da **Figura 1a**.

Os diversos tipos litológicos de origem alcalina podem ser subdivididos em três grupos principais: - brechas, tufos e aglomerados; - rochas efusivas e hipabissais; e – rochas plutônicas (Fraenkel et al., 1985). As brechas, tufos e aglomerados correspondem ao material vulcânico aflorante na porção noroeste do maciço. As rochas efusivas e hipabissais são representadas por fonólitos e tinguaítos respectivamente. As rochas plutônicas ocorrem como encaixantes para as efusivas e hipabissais e são constituídas por foiaítos e por lujaritos, e em menor proporção chibinitos.

Outro aspecto importante é a existência de uma “rocha potássica”, resultante da alteração por processos hidrotermais e de intemperismo do tinguaíto (Fraenkel et al., 1985), a qual constitui importante controle para as mineralizações uraníferas no maciço.

Aspectos estruturais

O complexo alcalino apresenta dois grandes sistemas de falhamentos, com direções predominantes em N60W e N40E, estando o primeiro relacionado com a tectônica regional e o segundo com o processo formador da caldeira (Fraenkel et al., 1985). Almeida Filho e Paradella (1977), através da interpretação de imagens MSS, indicam a existência de 7 estruturas circulares no interior da caldeira de Poços de Caldas, possivelmente associadas a presença de cones vulcânicos (**Figura 1b**). A presença de várias ocorrências minerais radioativas ao longo destas estruturas, levou os autores a considerarem que estas feições constituíram o controle estrutural regional.

Evolução do maciço

O complexo alcalino de Poços de Caldas trata-se de uma estrutura vulcânica circular que teve as primeiras manifestações no Cretáceo superior (87m.a.) e evoluiu através de fases sucessivas por 27 m.a.. Estudos realizados por Ellert (1959) reconhecem a existência de 6 fases na formação do complexo alcalino: 1) soerguimento do embasamento; 2) atividades vulcânicas; 3) formação de caldeiras; 4) atividade magmática alcalina; 5) formação dos diques anelares; 6) intrusões de foiaítos, chibinitos e lujaritos.

Mineralizações

O complexo alcalino encerra 48 ocorrências e indícios conhecidos de mineralizações radioativas (**Figura 1b**). As mineralizações podem ser agrupadas em três associações: urânio-zircônio, tório-terras raras e urânio-molibdênio (Tolbert, 1966; Fraenkel et al., 1985; Almeida Filho, 1995).

As associações urânio-zircônio constituem os depósitos mais comuns, ocorrendo como depósitos aluviais, eluviais e em veios e lentes. As associações tório-terras raras representam o segundo tipo de mineralizações radioativas do maciço sendo o depósito de Morro de Ferro o mais significativo (Tolbert,1966). As associações urânio-molibdênio estão associadas a superposição de eventos tectônicos, hidrotermais e meteóricos, que formam faixas filoneanas ou corpos lenticulares, sendo as rochas encaixantes foiaítos e tinguaiítos hidrotermalizados.

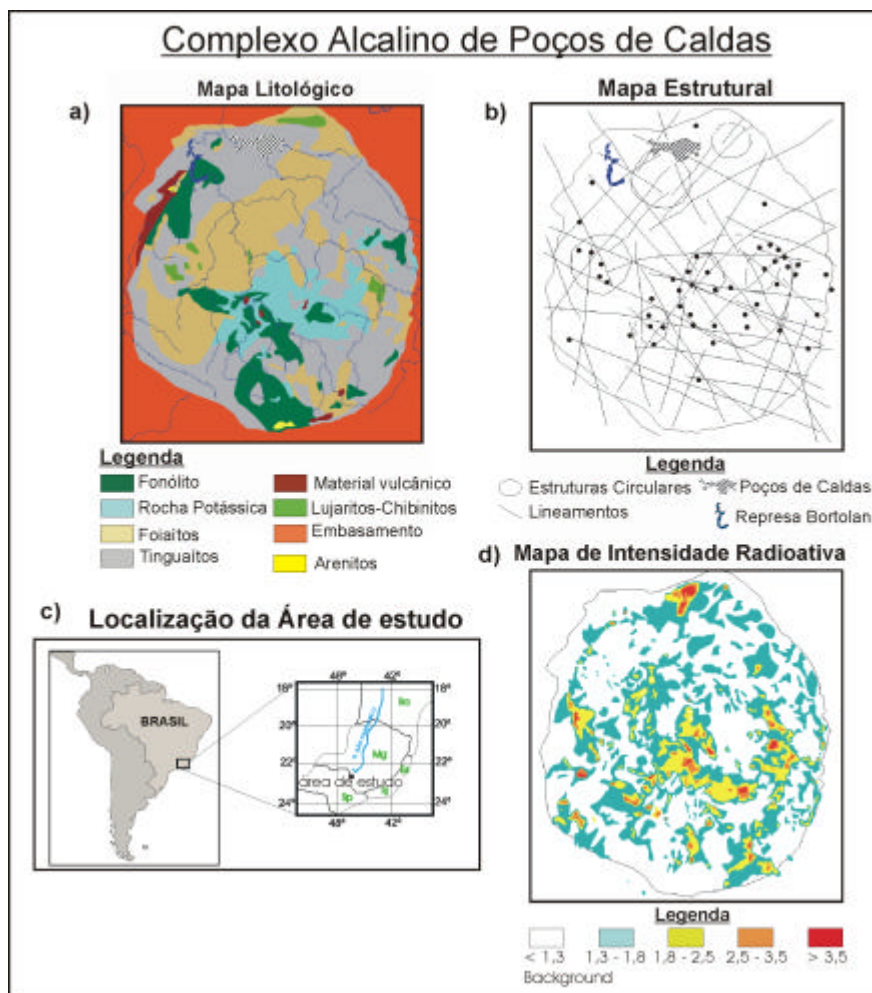


Figura 1 – Localização do Complexo Alcalino de Poços de Caldas e mapas litológico, estrutural e de intensidade gama-radiometria.

Modelo Prospectivo

Almeida Filho (1995) relata a dificuldade da elaboração de um modelo prospectivo para o maciço de Poços de Caldas, devido a alta complexidade dos fenômenos envolvidos no processo formador do complexo alcalino e das mineralizações associadas. O processo envolve aspectos tectônicos, estruturais, litológicos e intempéricos, que apresentam particularidades de região para região. Entretanto o autor identifica características comuns as ocorrências minerais no maciço alcalino, as quais foram assumidas como critérios diagnósticos a pesquisa de minerais radioativos na área:

litologias favoráveis: presença de controles litológicos representados por rochas potássicas, material vulcânico, e corpos intrusivos de foiaítos;

falhamentos/fraturamentos: presença de intrincados padrões de falhamentos e fraturamentos, condicionando o alojamento de veios e lentes mineralizados;

estruturas circulares: presença de cones vulcânicos no interior da cratera, condicionando a ocorrência de mineralizações radioativas em suas bordas;

gama-radiometria: presença de valores anômalos de radioatividade total, indicativa da presença de minerais radioativos (Almeida Filho, 1995) (**Figura 1d**).

Desse modo, o modelo prospectivo para a definição de áreas potenciais a ocorrências de minerais radioativos fundamentou-se basicamente em três pontos: dados gama-radioativos, litologia favorável e feições estruturais.

Banco de Dados Geográfico

Para a realização do estudo foi utilizado um banco de dados gerado por Almeida Filho (1995). Os dados selecionados do banco de dados estão apresentados na **Tabela 1**, onde estão explicitados o formato e respectivos atributos.

Tabela 1 – Tipos, formatos e atributos dos dados. Modificado de Almeida Filho (1995).

Dados	Formatos	Atributos
Cidade, principais drenagens	Vetorial	Infra-estrutura
Mapa Litológico	Vetorial e matricial	Informações litológicas
Contatos litológicos	Vetorial e matricial	Zonas de contatos
Gama-radiometria	Vetorial e matricial	Radioatividade (contagem total)
Feições estruturais	Vetorial	Falhas/fraturas e estr. circulares
Ocorrências minerais	Vetorial	Verdade de campo

Estes dados encontram-se sob projeção UTM/SAD69, sendo utilizado como referência cartográfica as folhas de Poços de Caldas, Santa Rita de Caldas e Andrada, na escala 1:50.000, produzidas pela fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (Almeida Filho, 1995).

Metodologia

A teoria dos conjuntos *fuzzy* tem sido amplamente utilizada em trabalhos de inferência espacial desenvolvidos em SGI's (Burrough, 1989; Burrough e Heuvelink, 1992; Banai, 1993; Altman,1994). As vantagens do modelamento *fuzzy* são inúmeras quando comparadas aos modelamentos convencionais que forçam os especialistas à definirem regras dicotômicas rígidas com contatos normalmente artificiais que diminuem a habilidade de articular eficientemente soluções para problemas complexos, tão comum em processos naturais.

Entretanto essa visão dicotômica (booleana) é assumida pela corrente maioria dos SIG's que consideram que fenômenos naturais podem ser modelados por objetos discretos, tais como pontos, linhas e polígonos ou "pixels " os quais têm atributos exatos. Essa representação espacial de dados imprecisos para dados rígidos introduz erros desnecessários em um estágio muito inicial do processo de inferência espacial (Altman, 1994).

Os sistemas de inferências baseados em *lógica fuzzy*, por outro lado, possibilitam a captura do conhecimento próximo ao *modelo cognitivo* utilizado pelos especialistas na análise de problemas. Nesta visão de modelamento de sistemas complexos, os mecanismos subentendidos são representados de modo lingüístico, através de variáveis lingüísticas o que permite lidar de um modo melhor com dados imprecisos, incompletos, ambíguos, e/ou vagos, tão comuns em sistemas geológicos.

Para a realização da inferência *fuzzy* foi necessário que toda as evidências (litologia, anomalia gama-radiométrica, estrutural) estivessem em formato numérico (MNT). Sendo assim, os mapas temáticos foram ponderados para valores que variavam entre 0 e 1 (membros *fuzzy*). Essa graduação pretende expressar de um modo semelhante ao modelo cognitivo humano o grau de aceitação da evidência para com o modelo prospectivo proposto.

No caso das unidades litológicas, a atribuição dos membros *fuzzy* foi um pouco mais complexa. O objetivo foi gerar um plano de informação que expressasse o grau de aceitação de cada unidade litológica com o modelo prospectivo considerando também a informação semântica dos diferentes contatos (definido e inferido).

A primeira etapa foi a construção de um PI em formato temático com 2 classes de máscaras que diferenciavam os corpos litológicos com contatos definidos dos inferidos. Este PI serviu de condicionante espacial durante a aplicação das diferentes funções membro *fuzzy*. A seguir foi editado o plano de informação litológico, o objetivo foi individualizar cada unidade litológica em diferentes PI's binário de modo que em cada PI estivesse apenas uma unidade litológica confrontada com as demais. Ou seja, se o desejo for confrontar a rocha potássica com as demais, os contatos das outras unidades devem ser eliminados de modo que fique apenas os contatos da rocha potássica. Em teoria de conjuntos seria o conjunto A confrontado com o não-A ($\bar{A} = T - A$).

Posteriormente foram construídos mapas de distância distribuídos em grades regulares (superfícies contínuas) que adotaram como ponto de partida os contatos das unidades litológicas. Estes PI's serviram de base numérica para a aplicação das funções membro *fuzzy* que devem mapear a informação dos tipos de contato.

O próximo passo foi a construção dos PI's com os membros *fuzzy* que expressassem o grau de aceitação de cada unidade litológica considerando o tipo de contato. Os PI's foram obtidos através de programas condicionais que aplicavam as funções membro *fuzzy* sobre os mapas de distância de cada unidade litológica controlados pelas máscaras e por um corredor de 100m de largura ao longo dos contatos inferidos. A formulação abaixo exemplifica a aplicação das diferentes funções membro *fuzzy* controladas pelos condicionantes espaciais para a rocha potássica:

$MF_{R.potássica} = 0$ Se (Classe.Máscara = contato definido E Classe.PI binário = Não-R.potássica);

$MF_{R.potássica} = 1$ Se (Classe.Máscara = contato definido E Classe.PI binário = R.potássica);

$MF_{R.potássica} = (0.005 * dist) + 0.5$ Se (Classe.Máscara = contato inferido E Classe.PI binário = R.potássica E distância ≤ 100);

$MF_{R.potássica} = (-0.005 * dist) + 0.5$ Se (Classe.Máscara = contato inferido E Classe.PI binário = Não-R.potássica E distância ≤ 100).

O corredor de 100m equívale a zona de transição e serve para delimitar a região onde os membros *fuzzy* expressam no espaço a possibilidade da localização dos contatos inferidos. A localização dos contatos inferidos, originalmente desenhados, coincidem com o ponto de cruzamento $MF = 0.5$. Os pontos dentro das unidades litológicas e da zona de transição retornam valores entre 1 e 0.5, e aqueles do lado de fora do contato mas dentro da zona de transição recebem valores de membro menores que 0.5 conforme o distanciamento do contato.

A **Figura 2** ilustra o resultado do procedimento aplicado à rocha potássica e ao material vulcânico. Na figura da esquerda está representado os membros *fuzzy* da rocha potássica em uma grade regular sobreposta às duas unidades separadas pelo contato rígido original. Na da direita tem-se os membros *fuzzy* da rocha vulcânica, onde as linhas pontilhadas demarcam a zona de transição de 100m. As funções membro *fuzzy* lineares que graduum os elementos são mostradas no topo da figura.

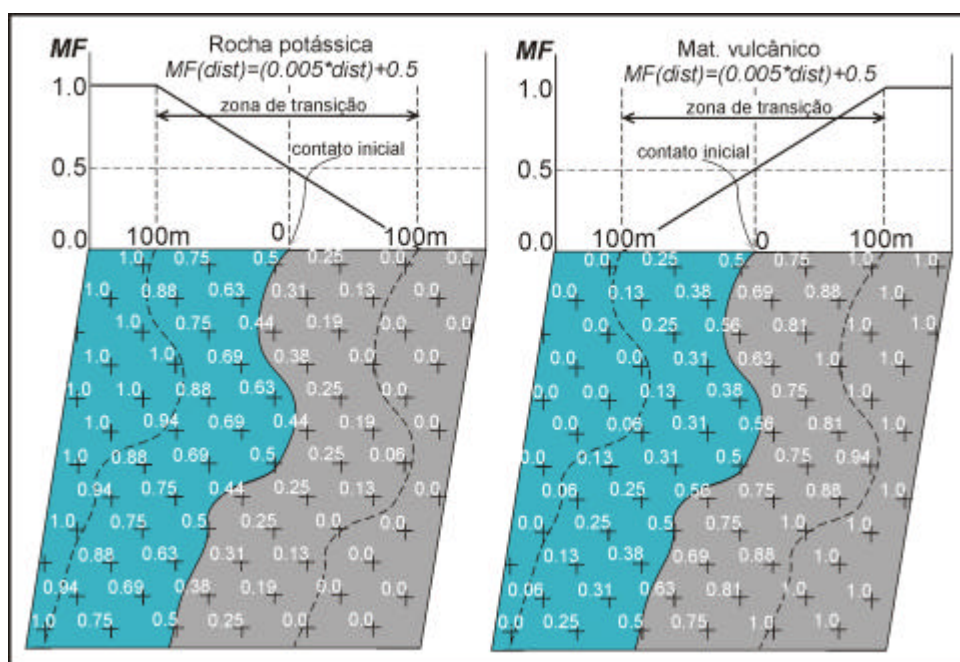


Figura 2 – Representação dos membros *fuzzy* da rocha potássica (azul) e material vulcânico (cinza) em grade regular numérica. A grade sobrepõe as unidades definidas inicialmente pelo contato rígido. No topo dos dois planos encontram-se as funções lineares que mapearam os respectivos membros.

Os PI's litológicos *fuzzy* individuais foram integrados através de uma soma ponderada. Os pesos pretendem expressar o grau de aceitação de cada unidade litológica para com o modelo prospectivo adotado. Eles foram obtidos através da aplicação de uma função linear sobre os pesos definidos por Almeida Filho (1995). A tabela 2 apresenta os pesos do método Média Ponderada e os valores de membro *fuzzy* obtidos a partir da equação linear. A expressão abaixo ilustra a soma ponderada executada:

$$MF_{litológica} = R. potássica + Lujarito/ chibinito + (0.5 * Foiaíto) + (0.33 * Mat. vulcânico)$$

O PI litológico *fuzzy* total foi finalmente integrado às demais evidências (anomalia gama-radiometria, estrutural) através de uma análise multi-critério definida pelo operador *fuzzy* ponderado. Os pesos de integração foram definidos pela técnica AHP (analytic hierarchy process) onde as evidências eram comparadas par a par. O resultado final foi um PI numérico que expressa pontualmente a potencialidade da ocorrência de minerais radioativos. Este PI foi fatiado de modo a identificar as áreas de maior potencial que totalizassem aproximadamente 10 Km².

Tabela 2 - Valores dos membros *fuzzy* do plano de informação litologia.

Litologia $P_i(x) = 0,0167.x$		
Classe	Média Ponderada (x)	Membro fuzzy (f(x))
Rochas potássicas	60	1,000
Lujaritos /chibinitos	60	1,000
Foiáitos	30	0,500
Mat. Vulcânico	20	0,333
Tinguaito	15	0,250
Fonólitos	10	0,167
Embasamento	0	0,000
Arenito	0	0,000

Resultados e Conclusões

As áreas de interesse definidas pela inferência espacial *fuzzy* foram avaliadas pelo parâmetro *grau de confiança* o qual pretende avaliar o poder explicativo das mesmas para com as ocorrências minerais conhecidas (verdades de campo). Ou seja, o grau de confiança indica o aumento em número de vezes da chance da descoberta de novos depósitos caso a pesquisa mineral leve em consideração apenas as regiões de interesse definidas pelo modelo. O grau de confiança é expresso pela razão da probabilidade *a posteriore* pela probabilidade *a priori*

$$\text{Grau de confiança} = \frac{p(d | e)}{p(d)}$$

Para efeito de comparação foram calculados também o *grau de confiança* dos resultados obtidos por Almeida Filho (1995) no métodos Booleano e Média Ponderada. Os valores de grau de confiança encontram-se na tabela 3, e demonstram que a análise espacial por inferência *fuzzy* forneceu as áreas que apresentam um melhor caráter predictor.

Tabela 3 – Valores de Grau de confiança das áreas de interesse

Método	Área (Km²)	Grau de confiança
Booleano*	32,37	7,78
Média Ponderada*	6,47	13,19
Fuzzy Ponderado (AHP)	6,38	16,73

* - resultados Almeida Filho (1995)

Pode-se concluir a partir do estudo que a teoria dos conjuntos *fuzzy* permitiu um maior refinamento no modelamento dos dados, sendo talvez a principal melhoria, a possibilidade da representação espacial dos atributos em superfícies contínuas.

A abordagem da importação semântica (IS) permitiu a fácil incorporação sobre a natureza imprecisa dos contatos (inferidos) o que representou num acréscimo de informação no modelamento. A consideração dessa nova variável em análises espaciais pode minimizar erros durante processos de tomada de decisão.

Referências

- Almeida Filho, R. Integração, manipulação e análise espacial de dados na pesquisa mineral através de modelos empíricos de prospecção: Um exemplo no planalto de Poços de Caldas. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 13, Nº 2, 1995, pp.127-142.
- Almeida Filho, R.; Paradella, W. R. Estudo do maciço alcalino de Poços de Caldas através da imagens LandSat com ênfase em mineralizações radioativas. **Inpe-111-TPT/060**. São José dos Campos, 1977, 130p.
- Altman, D. Fuzzy set theoretic approaches for handling imprecision in spatial analysis. **International Journal of Geographical Information Systems**, Vol. 8, Nº 2, 1994, pp. 271-279.
- Banai, R. Fuzziness in Geographical Information System: contributions from analytic hierarchy process. **International Journal of Geographical Information Systems**, Vol. 7, Nº 4, 1993, pp. 315-329.
- Burrough, P. A. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. **Journal of Soil Science**, Vol. 40, 1989, pp. 477-492.
- Burrough, P. A.; Heuvelink, G. B. M. The sensitivity of Boolean and continuous (Fuzzy) logical modeling to uncertain data. In: EGIS 92, Munich, Germany, 1992. **Proceeding**: Germany, 1992, pp.1032-1041.
- Burrough, P. A.; McDonnell, R. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford University Press, 1998.
- Ellert, R. Contribuição á geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. *Geologia*, 18: 5-63, São Paulo, USP-FFCL, 1959.
- Fraenkel, M. O.; Santos, R. C.; Lourenço, F. E. V. L.; Muniz, W. S. Jazida de urânio no planalto de Poços de Caldas, Minas Gerais. In: Principais Depósitos Minerais do Brasil. DNPM, Vol.1, cap.5, 1985, pp.89-103.
- Tolbert, J. The uraniferous zirconium deposits of the Poços de Caldas plateau, Brazil. U.S. **Geological Survey Bulletin**, 1185 - C; 1966, 28p.
- Wang, F.; Brent Hall, G. Fuzzy representation of geographical boundaries in GIS. **International Journal of Geographical Information Systems**, Vol. 10, Nº 5, 1996, pp. 573-590.