

Mapas de potencial mineral: aplicação da técnica de Pesos de Evidência (*Weights of Evidence - WofE*) para o mapeamento de áreas preditivas para ouro na região central do Amapá-AP.

Lucíola Alves Magalhães ¹
Carlos Roberto de Souza Filho ¹

¹ Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Caixa Postal 6152 - 13083-790 - Campinas - SP, Brasil
luciola.magalhaes@gmail.com; beto@ige.unicamp.br

Abstract: This research is focused in the investigation of spatial data modeling by data-driven predictive methods, the weights of evidence (WofE) model in particular, aiming the identification of potential areas for gold mineralization in the proximities of Amapari region. The study area is situated in the Amapá State and has a special interest since it comprises one of the last exploration frontiers in Brazil, where much of the state is protected by national parks and indigenous reserves. The area hosts Archaean basements, greenstone belts (Province Vila Nova) and intrusive rocks that collectively show a complex geological evolution and with an ample metallogenic potential. The Amapari deposit is characterized as an orogenic-type gold mineralization, where the highest contents of gold are associated with the most deformed rocks in a system of sulfide veins, mainly composed of pyrrhotite. The inputs maps for the modelling process were geological and airborne geophysical data and gold mine and occurrences (training points). These data were integrated in a GIS environment using the Arc Spatial Data Modeller (ArcSDM) tool. The results using weights of evidence show that Amapari deposits were classified as a high potential site as expected and, most importantly, new targets with similar signatures were identified throughout the area.

Palavras-chave: spatial modelling, favorability, data-driven, modelagem espacial, favorabilidade, guiados pelos dados.

1. Introdução

O uso das geotecnologias na pesquisa mineral, particularmente dos Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIG) e Sistemas Especialistas (SE), tem proporcionado a possibilidade de integração de dados de diversas fontes, visando o estabelecimento de guias prospectivos e facilitando as tomadas de decisões na exploração mineral. Os dados geofísicos aéreos e terrestres, de sensoriamento remoto, geoquímicos, geológicos (estratigráficos e estruturais) e geocronológicos são os mais comumente utilizados no processo de integração e análise espacial.

Seguindo a linha da utilização de SIGs e SEs na pesquisa mineral, este trabalho tem como objetivo a aplicação da técnica de modelagem espacial de dados por pesos de evidência (WofE – *Weight of Evidence*) visando o mapeamento de áreas com favorabilidade mineral para ouro na região central do estado do Amapá - AP, nos domínios da área de concessão da Mineração Pedra Branca de Amapari (Figura 1). Esta área foi escolhida por representar uma das últimas fronteiras exploratórias do país, na qual nenhum estudo voltado para a modelagem espacial de dados visando a identificação de áreas com potencial para ouro foi previamente desenvolvido. A ferramenta utilizada para a análise espacial foi a extensão *Arc Spatial Data Modeller (ArcSDM)*, versão 4 para o ArcGis 9.2 (Sawatzky et al., 2007).

2. Contexto Geológico

A área de estudo está inserida na província geocronológica Maroni-Itacaiúnas (PMI). A PMI é composta por rochas metavulcânicas e metassedimentares, deformadas e metamorfisadas na fácies xisto verde a anfíbolito, compreendendo um terreno *greenstone belt*, além de rochas granulíticas e terrenos gnaiss-migmatitos, com remanescentes de crosta arqueana retrabalhada (Cordani et al., 1979).

O embasamento arqueano da região é composto por granulitos, gnaisses, anfibolitos e migmatitos do Complexo Guianense, que correspondem a rochas polimetamorfisadas e parcialmente retrabalhadas durante a orogênese Transamazônica (Lima et al., 1974). As idades mais antigas registradas nesse núcleo arqueano no Estado do Amapá giram em torno de 3,0 Ga (Avelar et al., 2001) e 4.5 Ga (Bahia et al., 2004, Faraco et al., 2004).

As rochas supracrustais na região central do Amapá são representadas por unidades da Província Vila Nova, considerada como um terreno *greenstone belt* que ocorre em faixas alongadas de direção NW-SE, metamorfisadas na fácies xisto-verde a anfibolito e deformadas em um domínio dúctil-rúptil, onde se desenvolveram extensas zonas de cisalhamento. A idade proposta para esta seqüência *greenstone* é paleoproterozóica, em torno de $2.26 \pm 0,34$ Ga (McReath e Faraco, 1997) e metamorfismo em torno de $1,97 \pm 0.51$ Ga (Tassinari et al., 1984).

Rochas intrusivas na PMI, denominadas de Granodiorito Falsino (1.75 Ga) e Alcalinas Mapari (1.68 – 1.34 Ga) (Lima et al., 1974), estão relacionadas a um evento Proterozóico regional, caracterizado por um magmatismo anorogênico intraplaca.

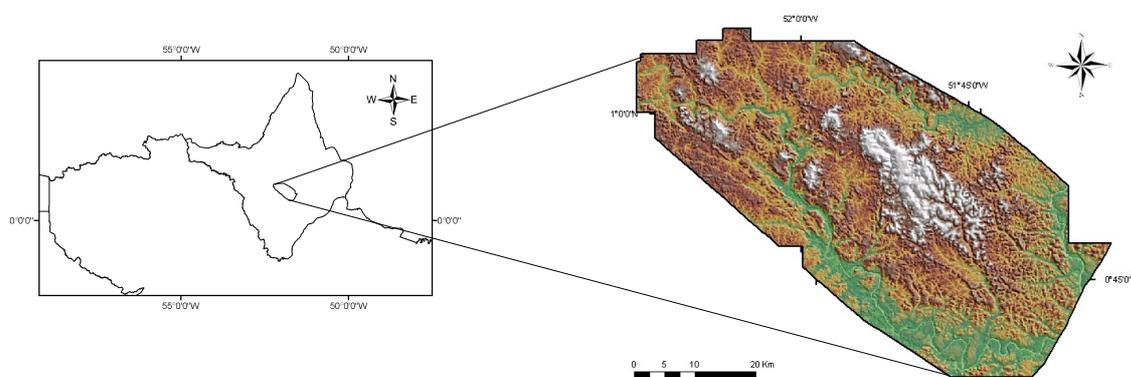


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo sobreposta à imagem de radar SRTM sombreada.

3. Base de Dados

3.1. Dados geológicos

O mapa geológico foi cedido pela Mineração Pedra Branca de Amapari (MPBA) na escala 1:100.000.

Na área de estudo são encontradas rochas relacionadas ao embasamento arqueano (granito-gnaisse), rochas da Província Vila Nova (PVN) (BIFs fácies óxido e silicato, rochas calcisilicáticas e escarnitos, xistos, anfibolitos e quartzitos) e granitóides associados (gnaisse diorítico/diorito, granitos e pegmatitos, gnaisse granodiorítico/granodiorito, Trondhjemitonalito-granito) (Figura 2a).

Segundo Melo (2001) o Depósito Amapari é caracterizado como um depósito do tipo *lode* orogênico, onde os maiores teores de ouro são associados às zonas mais deformadas, encaixados em um sistema de veios sulfetados, principalmente compostos por pirrotita.

3.2. Ocorrências minerais

Para a aplicação dos métodos de análise espacial guiados pelos dados é necessário que a área selecionada para modelagem contenha um número satisfatório de ocorrências do minério que se deseja pesquisar. Este registro servirá como guia prospectivo através de comparações e cálculos estatísticos aplicados ao conjunto de mapas evidenciais, utilizando-se tais ocorrências como pontos de treinamento (Bonham-Carter, 1994).

Os pontos de treinamento utilizados foram retirados da base de dados do Mapa Geológico do Brasil ao Milionésimo (CPRM, 2004), em formato digital (SIG). Constituem 12 pontos

(Figura 2a), incluindo um ponto do depósito Amapari, cujas coordenadas geográficas precisas foram fornecidas pela MPBA.

3.3. Dados aerogeofísicos

Os dados aerogeofísicos utilizados fazem parte do Projeto Rio Araguari, da base de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (LASA, 2004). Compreendem dados magnetométricos (mapa de amplitude do sinal analítico e mapa de lineamentos magnéticos interpretados a partir das derivadas horizontais e verticais) e gamaespectrométricos (Figura 2b e 2c, respectivamente). As etapas do processamento destes dados, assim como os produtos gerados, podem ser encontrados em Magalhães et al. (2007).

4. Metodologia de Trabalho

Existem basicamente dois tipos de modelos utilizados para o mapeamento do potencial mineral: modelos guiados pelos dados (*data-driven*) (e.g. Pesos de Evidência, Regressão Logística e Redes Neurais Artificiais) e modelos guiados pelo conhecimento (*knowledge-driven*) (e.g. Lógica Boleana, Lógica *Fuzzy*, *Index Overlay*) (Bonham-Carter, 1994). Em uma modelagem dirigida pelos dados, a associação espacial entre ocorrências minerais conhecidas (áreas teste) e o conjunto de dados estudados (geofísicos, geoquímicos, etc) é definida computacionalmente e determina pesos associados ao grau de favorabilidade de cada um destes conjuntos.

No presente trabalho, será explorado o método por pesos de evidência (WofE – *Weights of Evidence*)

4.1. Análise por pesos de evidência (WofE – *Weights of Evidence*)

A técnica de pesos de evidência utiliza relações estatísticas entre os vários planos de informação e ocorrências minerais conhecidas para descrever e analisar as interações entre os diversos dados espaciais. Como resultados são gerados modelos preditivos do potencial mineral de uma dada região, onde há dados disponíveis o suficiente para se estimar a importância relativa de cada evidência (Raines, 1999, Arthur et al., 2005).

4.1.1. Cálculo dos pesos e generalização dos mapas

No método WofE existem duas formas de se tratar os dados: o método categórico de calcular os pesos, usado quando os dados ocorrem em categorias não-relacionadas e categorias mutuamente exclusivas, e o método cumulativo, quando as informações são relacionadas (dados ordinais, intervalos, razões, etc) (Boleneus et al., 2001).

Os procedimentos de cálculo dos pesos W^+ e W^- e transformação em dados binários foram aplicados aos dados: geológicos, magnéticos (amplitude do sinal analítico e lineamentos magnéticos) e radiométricos. A transformação dos dados em mapas binários foi feita através da generalização dos valores de *Studentized Contrast* (Stud_Cnt) nas classes *inside* e *outside*. O *Studentized Contrast* é definido pela razão entre o C e o desvio padrão de C. É utilizado no processo de generalização dos mapas evidenciais, principalmente nos casos onde há um pequeno número de pontos de treinamento disponíveis na área de estudo e onde os valores de C não apresentam um limite claro do valor máximo (Boham-Carter, 1994).

O mapa geológico foi abordado como um dado categórico. A separação das classes foi baseada nos valores de Stud_Cnt >1 , *inside* e, *outside*, para valores de Stud_Cnt ≤ 1 (Magalhães, 2008).

A associação do depósito com uma resposta de alta intensidade do campo magnético anômalo permitiu a utilização do mapa de amplitude do sinal analítico (ASA). Este dado foi reclassificado em 8 bits (256 níveis de cinza) para agilizar o processamento, e processado como um dado cumulativo descendente, no qual os maiores valores de ASA associam-se às

maiores possibilidades de ocorrência de um depósito mineral. Para o dados cumulativos, o maior valor de Stud_Cnt atua como um separador de classes, marcando o limite inferior para a classe favorável. Assim, valores no mapa de ASA com Stud_Cnt ≥ 1.69 (DN 255) e Stud_Cnt < 1.69 (Dns 0-254) foram considerados favoráveis e desfavoráveis, respectivamente.

A partir do mapa de lineamentos foi criado um mapa de isodistâncias, com intervalos de 250m, afim de determinar a distância ótima para a associação ocorrência mineral *versus* proximidade à estruturas lineares. Os pesos foram calculados para uma evidência cumulativa ascendente (CA) e a generalização do mapa foi feita baseando-se no maior valor do Stud_Cnt, 1.19. Desta forma, distâncias até 250m foram consideradas *inside* e, acima disto, *outside*.

Os dados radiométricos foram multiplicados por 100 e transformados para inteiros, pois a técnica WofE requer que os dados estejam neste formato. A multiplicação dos dados por 100 teve o intuito de evitar que os valores originais fossem simplificados na transformação, já que valores decimais não são considerados na transformação para inteiros.

O resultado dos cálculos dos pesos e Stud_Cnt, assim como os valores limítrofes para a generalização dos mapas radiométricos, podem ser observados na Tabela 1, que também apresenta de forma simplificada os parâmetros da generalização para as demais evidências.

A partir dos dados transformados em mapas binários, foram gerados diversos modelos na tentativa de se encontrar o resultado que melhor atendesse aos requisitos de condição de independência dos dados (Agterberg e Cheng, 2002). Os parâmetros de entrada na modelagem foram: i) probabilidade à priori: 0,00467, ii) pontos de treinamento: 12 e iii) unidade de área: 1 km².

Tabela 1: Sumário das evidências e critérios da análise por pesos de evidência.. As evidências com maiores pesos, são aquelas que mais influenciam no modelo final.

Critério	Descrição	W+	S (W+)	W-	S(W-)	Contraste	Desv_Cnt	Stud_Cnt	Peso
Presença de pontos de treinamento nas unidades	Escarnitos e Rochas calcissilicáticas	4,92	1,28	-0,09	0,3	5	1,31	3,82	4,92
	Xistos, anfíbolitos e calcissilicáticas	1,64	1,01	-0,07	0,3	1,71	1,06	1,62	1,64
Proximidade à estruturas lineares de direção NNW	Até 250 m dos lineamentos	0,35	0,38	-0,35	0,45	0,7	0,59	1,19	0,35
Altos valores magnéticos	Acima de 0,942 nT/m	1,71	1,01	-0,07	0,3	1,78	1,06	1,69	1,71
Altos teores de potássio	Acima de 1,07%	1,27	1,01	-0,06	0,3	1,33	1,05	1,26	1,27
Altos teores de urânio	Acima de 7,02 ppm	1,59	0,3	-0,07	0,3	1,66	1,06	1,58	1,59
Baixos teores de tório	Abaixo de 8,25 ppm	0,6	0,36	-0,64	0,5	1,25	0,61	2,03	0,6

4.1.2. Validação dos modelos

Uma das premissas da modelagem por pesos de evidência, é que os dados utilizados não apresentam um alto grau de dependência entre si. Alguns testes são aplicados no modelo gerado afim de se estabelecer o grau de independência entre as evidências, permitindo desta forma, a geração de modelos confiáveis

O teste da *Conditional Independence Ratio* (CIR) compreende a razão entre o número de pontos utilizados (n) e o soma de todos os valores da probabilidade à *posteriori* (T). Valores abaixo de 1 podem indicar uma condição de dependência entre os dados de entrada, sendo considerados aceitáveis os modelos com CIR acima de 0.85 (Bonham-Carter, 1994).

O teste *Agterberg & Cheng Conditional Independence* (A&C CIT) (Agterberg e Cheng, 2002) trabalha com a hipótese de que a diferença T-n é nula. A estatística do teste é calculada a partir da equação (T-n)/desvio padrão de T. Valores altos indicam que a hipótese de condição de independência dos dados não foi atendida. Ou seja, quanto menores forem os valores desta razão, melhor é o modelo.

O modelo gerado (Figura 5a) respeitou os testes de independência dos dados, cujos

valores dos testes CIR e A&C CIT, foram 0.90 e 62.50%, respectivamente. As áreas mapeadas com uma probabilidade à *posteriori* acima de 0.9, consideradas como as mais potencialmente favoráveis à ocorrência de ouro, estão apresentadas na Figura 5b e correspondem a aproximadamente < 1% da área de estudo.

Outra forma de validação do modelo pode ser feita através da análise da curva *Receiver Operator Characteristic* (ROC). Esta curva apresenta a relação entre a Sensitividade e Especificidade, ou seja, a probabilidade de que células favoráveis e não favoráveis estejam corretamente classificadas. A área sobre esta curva (AUC) mede a precisão do mapa final, ou seja, é um método de eficiência do modelo em classificar corretamente os pontos de treinamento (Mathew et al., 2007).

Os valores de AUC do modelo apresentado foi calculado de forma automática e transformado para porcentagens, apresentando como resultado, 76.3% de precisão.

5. Discussões e Conclusões

Apesar das limitações no uso da técnica de pesos de evidência em regiões com escassez de bons registros de depósitos e mineralizações conhecidas e de boa precisão de posicionamento, o método WofE apresentou resultados satisfatórios quanto ao modelo gerado.

As condições de independência dos dados exigidas para o método em questão foram respeitadas e o mapa de favorabilidade gerado foi bastante restritivo, tendo em vista que 99% da área apresentou resultados de probabilidade a posteriori abaixo de 0.05. A área mapeada com maior potencial aurífero está associada ao depósito Amapari, principalmente nos domínios das formações ferríferas bandadas e dos escarnitos e rochas calcisilicáticas e estruturados na direção NS, em conformidade com os corpos mineralizados descritos na literatura. Na porção norte do mapa foi possível mapear outra possível área mineralizada que possui assinatura semelhante à do depósito. Está associada à BIF's e sedimentos químicos e xistos, além de lineamentos magnéticos de direção NW/SE e alta resposta magnética.

6. Referências

Agterberg, F. P. & Cheng, Q. Conditional Independence Test for Weights-of-Evidence Modelling. *Natural Resources Research*, v. 11, n. 4, p 249 – 255, 2002.

Arthur, J. D., 1149, P. G., Baker, A. E., Cichon, J. R., Wood, A. R., Rudin, A. **Florida Aquifer Vulnerability Assessment (FAVA): Contamination potential of Floridas's principal aquifer systems**. Florida: Division of Resource Assessment and Management. Florida Geological Survey. Disponível em: http://suwanneho.ifas.ufl.edu/documents/FAVA_REPORT_MASTER_DOC_3-21-05.pdf. Acessado em 23 ago 2006.

Avelar, V. G., Lafon, J. M., Delor, C. Geocronologia Pb-Pb em Zircão e Sm-Nd em Rocha Total da Porção Centro-Norte do Amapá para a evolução geodinâmica do Escudo das Guianas. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 7., 2001, Belém. **Anais**. 4 p. CD-ROM.

Bahia, R.B.C., Faraco, M.T.L., Monteiro, M.A.S., Camozzato, E., Oliveira, M.A.O. Folha SA.22-Belém. In: Schobbenhaus, C., Gonçalves, J.H., Santos, J.O.S., Abram, M.B., Leão Neto, R., Matos, G.M.M., Vidotti, R.M., Ramos, M.A.B., Jesus, J.D.A. de (eds.). Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. 2004. CD-ROM.

Boleneus, D. E., Raines, G. L., Causey, J. D., Bookstrom, A. A., Frost, T. P., Hyndman, P. C. **Assessment method for epithermal gold deposits in northeast Whashington State using weights-of-evidence GIS modeling**. Open-File Report 01-501. USGS. 2004. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-501/>. Acessado em: 16 abr 2006.

Bonham-Carter, G.F. **Geographic Information Systems for Geoscientists – Modeling with GIS**. Pergamon, 1994. 398p.

Cordani, U. D., Tassinari, C. C. G., Teixeira, W., Basei, M. A. S. e Kawashita, K. Evolução Tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos. In: Congresso Geológico Chileno, 2., 1979. **Actas**. p. 137-148.

Faraco, M.T.L., Marinho, P.A.C., Costa, E.J.S., Vale, A.G., Camozzato, E. Folha NA.22 Macapá. In: Schobbenhaus, C., Gonçalves, J.H., Santos, J.O.S., Abram, M.B., Leão Neto, R., Matos, G.M.M., Vidotti, R.M. (eds.). Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. 2004. CD-ROM.

LASA Engenharia e Prospecções S.A. **Projeto Aerogeofísico Rio Araguari- Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos**. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Relatório Final, 25 Vol., Texto e Anexos (Mapas), Rio de Janeiro, 2004.

Lima, M. I. C., Montalvão, R. M. G., Issler, R. S., Oliveira, A. S., Basei, M. A. S., Araújo, J. F. V., Silva, G. C. Geologia. In: Projeto RADAM. Folha NA/NB 22 Macapá. Rio de Janeiro, I/120p. 1974. (levantamentos de recursos naturais, 6).

Magalhães, L. A., Souza Filho, C. R., Silva, A. M. Caracterização Geológica-Geofísica da Porção Central do Amapá com base em Processamento e Interpretação de Dados Aerogeofísicos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 2 – 13, 2007.

Magalhães, L. A. **Integração e análise espacial de dados para a geração de modelos prospectivos de mineralizações auríferas na região de Amapari – Amapá**. 2008. 120p. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2008.

Mathew J. Jha, V. K., Rawat, G. S. Weights of evidence modelling for landslide hazard zonation mapping in part of Bhagirathi valley, Uttarakhand. **Current Science**, v. 92, n. 5, p. 628 – 638, 2007.

Mcreath, I. e Faraco, M.T.L. Sm-Nd and Rb-Sr systems in part of the Vila Nova metamorphic suite, northern Brazil. In: South American Symposium on Isotope Geology, 1., 1997, Campos do Jordão. **Extended Abstracts**. SAS. Artigos, p. 194-196.

Melo, L. V. **Geologia e Mineralização de Sulfetos + Au do Depósito de Amapari, Estado do Amapá**. 2001. 112p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém. 2001.

Raines, G. L. Evaluation of Weights of Evidence to Predict Epithermal-Gold Deposits in the Great Basin of the United States. **Natural Resources Research**, v. 8, n. 4, p. 257 – 276, 1999.

Sawatzky, D.L., Raines, G.L., Bonham-Carter, G.F., and Looney, C.G. Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.2 geoprocessing tools for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks, 2007. Disponível em: <http://arcscrippts.esri.com/details.asp?dbid=15341>. Acessado em 31 jan 2007.

Tassinari, C. C. G., Siga Jr., O., Teixeira, W. Épocas metalogenéticas relacionadas a granitogênese do Cráton Amazônico. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33., 1984, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geociências, v. 6, p. 2963-2977.

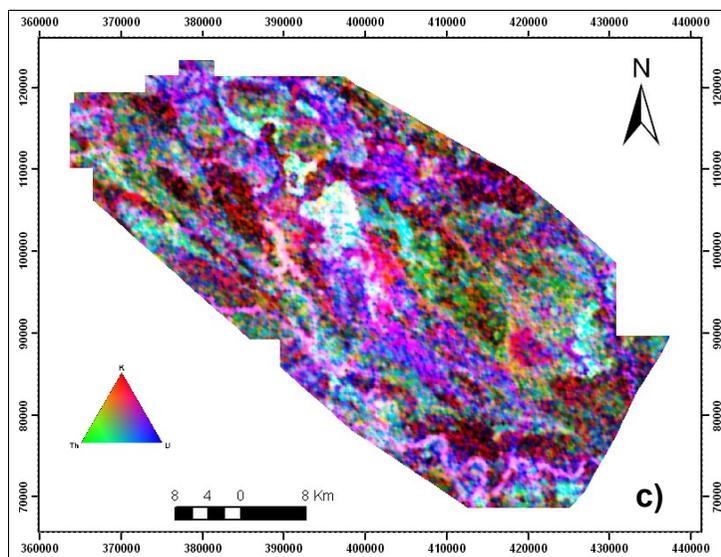
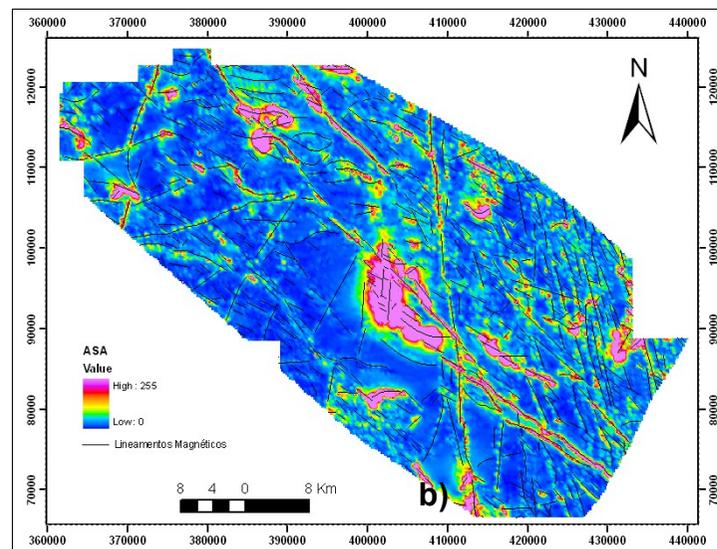
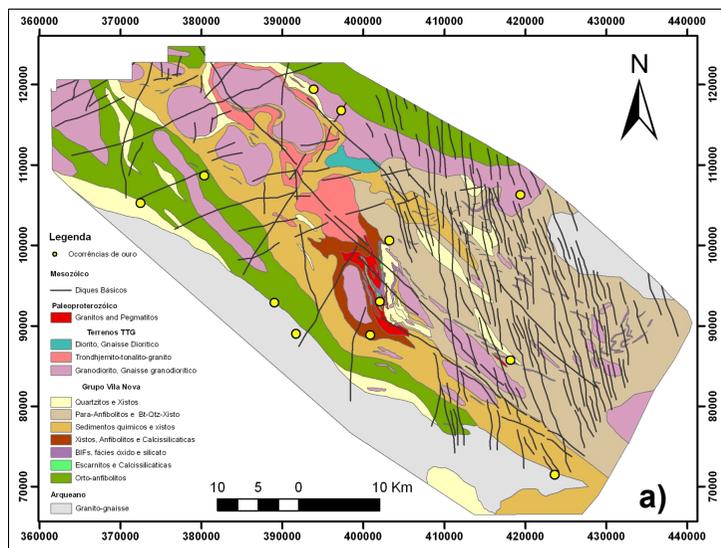


Figura 4: a) Mapa geológico na escala 1:100.000 cedido pela Mineração Pedra Branca de Anapari (MPBA), sobreposto as ocorrências de ouro do Serviço Geológico do Brasil (SIG 1:1.000.000), b) Mapa da Amplitude do Sinal Analítico sobreposto aos lineamentos magnéticos e c) Mapa temário RK GTH BU.

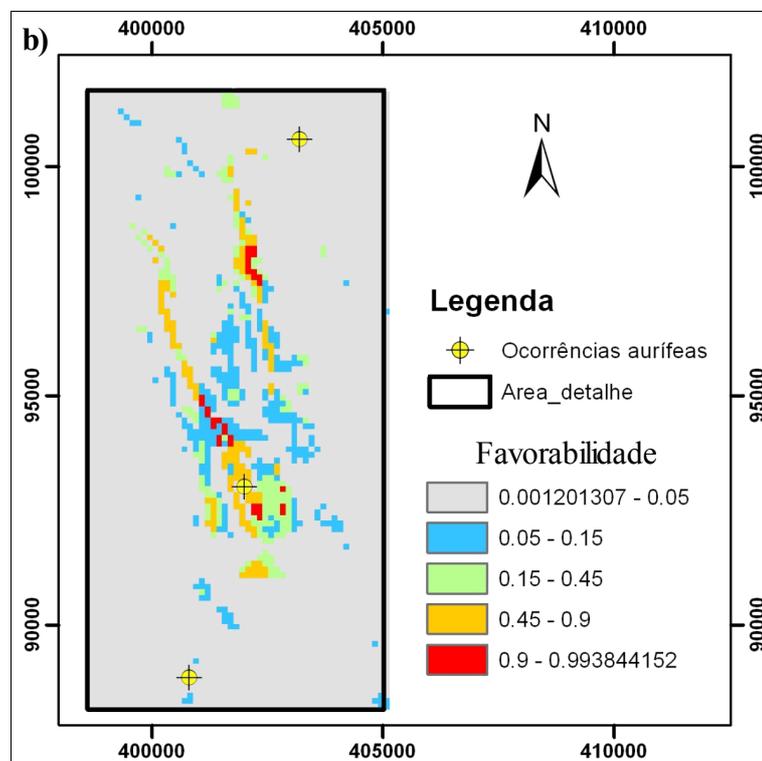
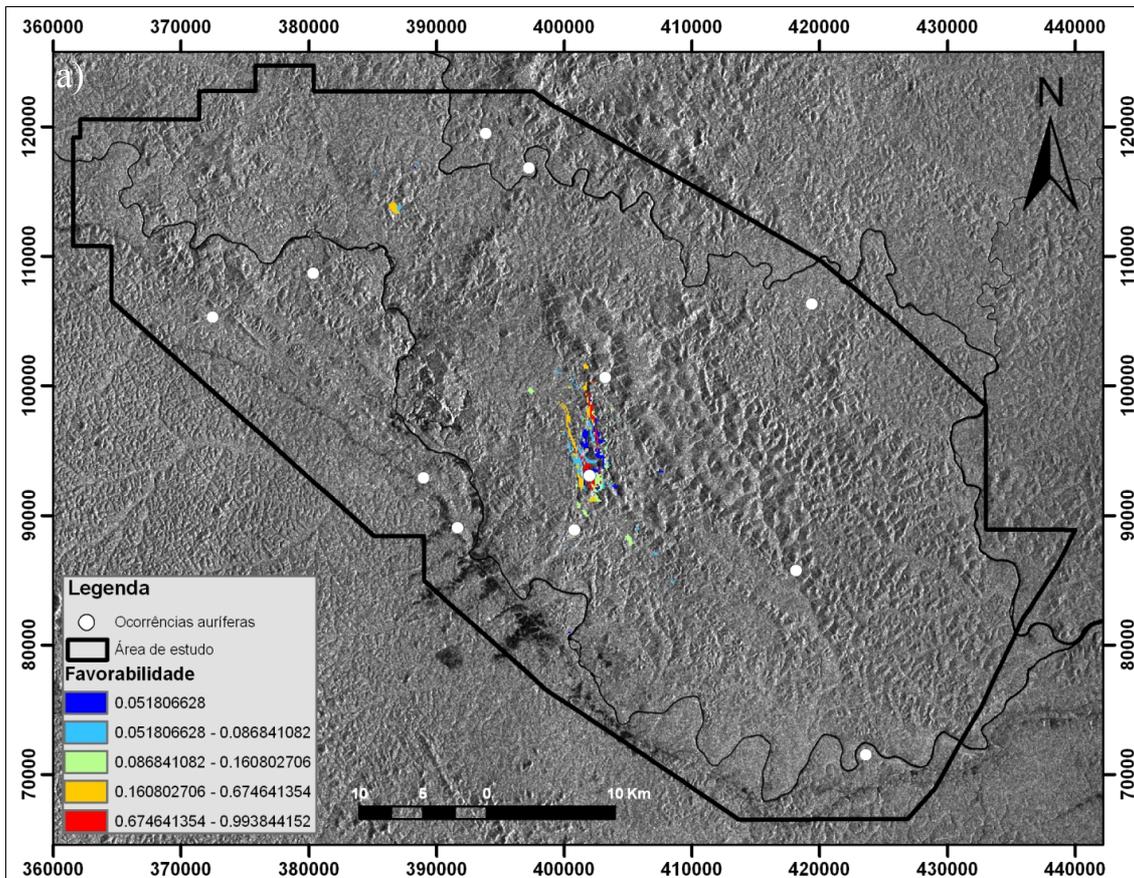


Figura 5: a) Modelo gerado pelo método de pesos de evidência sobreposto à imagem de radar JERS e b) Detalhe na área com as maiores possibilidades para a ocorrência de ouro (b).