

Capítulo VI

Uma Nova Proposta para Mapeamento do Potencial Mineral com Aplicação na Província Aurífera do Tapajós, Amazonia: Fundamentos do Conhecimento e Método de Estudo

Maria Glícia da Nóbrega Coutinho*
Patricia Durringer Jacques

Introdução

Muitos terrenos metamórficos de diferentes idades contêm veios de quartzo portadores de ouro, os quais sugerem terem sido formados durante processos deformacionais relacionados aos estágios compressivos a transpressivos, ocorridos em margens convergentes, em orógenos dos tipos acrescionário e colisional. Em ambos os orógenos os veios mineralizados dos depósitos hidrotermais desenvolvem-se durante uma única variação de profundidade, nos quais, no caso dos depósitos auríferos, a profundidade de formação pode variar de 15-20 km até próximo a superfície da crosta (Groves *et al.*, 1998). Entretanto, para efeito de classificação os termos extremos desses depósitos, de mais alta a mais baixa profundidade dentro do espectro, são relativamente raros, e têm sido denominadas indistintamente de depósitos mesotermiais (Gebre-Mariam *et al.*, 1993).

O presente trabalho tem por objetivo estudar as mineralizações de ouro que ocorrem na Província Mineral do Tapajós, cujos depósitos estão amplamente distribuídos, ocorrendo em diferentes tipos de rochas e representam o termo final do espectro de profundidade na crosta superior desses tipos denominados mesotermiais, de ambientes de fácies metamórfica que varia de xisto verde a anfibolítica de baixo grau. Esses depósitos exibem feições que são características tanto dos depósitos mesotermiais, tipo *lode-gold*, como também das mineralizações de metais preciosos do tipo epitermal. O presente trabalho demonstra que as mineralizações de ouro no Tapajós representam o termo final de crosta superior do ouro Proterozóico do tipo mesozonal/epizonal. Os depósitos epizonais são comparáveis ao ouro tipo *intrusion-related gold system* (Sillitoe, 1991).

*CPRM, RJ. E-mail: mgc@rj.cprm.gov.br

Localização da Área em estudo

A área em estudo, a Província Mineral do Tapajós, compreende uma área de 80.650 km², e limita-se geograficamente ao norte pela Bacia Amazonas, noroeste da cidade de Itaituba, Estado do Pará, a leste pelo Rio Iriri, ao sul pela Serra do Cachimbo e a oeste pelo Rio Abacaxis. Entretanto, as feições geológicas no limite leste têm continuidade além do Rio Iriri.

Aspectos Geológico-tectônicos

Localizada geologicamente na porção centro-sul do Craton Amazônico (Fig. 1), a Província Mineral do Tapajós foi submetida a uma tectônica no Proterozóico (Orogênese Orosiriana), responsável pelo desenvolvimento de quatro eventos plutono-vulcânicos, que ocorreu durante um período de tempo de 140 Ma (Santos *et al.*, 2000).

Dados geocronológicos (SHRIMP e estudos convencionais de U-Pb e Pb-Pb em zircão), realizados no Craton Amazônico (Santos *et al.*, 2000), que permitiram reconhecer as principais províncias geotectônicas (Fig. 2), indicam que na

Província Mineral do Tapajós os três primeiros eventos (Cuiú-Cuiú, Creporizão e Parauari) estenderam-se de 2.010 a 1.870 Ma

Estes eventos estão associados a arcos magmáticos, relacionados à processos de subducção. Com base nos dados geoquímicos dos granitóides de Brown *et al.*, 1984, pode-se afirmar que os arcos apresentam características representativas desde do tipo arco primitivo até arco normal (Figs. 3 e 4). O índice de saturação em alumina indica que o magmatismo é de natureza calcioalcalina, e os granitóides variam de mehtaluminoso a peraluminoso, representando granitos tipo-I. O quarto evento (Maloquinha) datado de 1.870 Ma, está associado com a fusão parcial da crosta antiga, e representa granitos do tipo-A pós-colisional. Esta magmatismo é subalcalino de alto K e sugere formação em arco magmático maduro, em nível crustal superior.

Dados de ϵ Nd das rochas mais antigas que 1.880 Ma, variando de 0 a valores positivos, indicam crosta juvenil. Enquanto que os dados negativos foram identificados em granitóides mais jovens do tipo Maloquinha (Santos *et al.*, 2000). Rochas ígneas (máficas e ultramáficas e rochas toleíticas) datadas de 2.100 Ma, e rochas básicas calcicalinas, enriquecidas em K com idades de

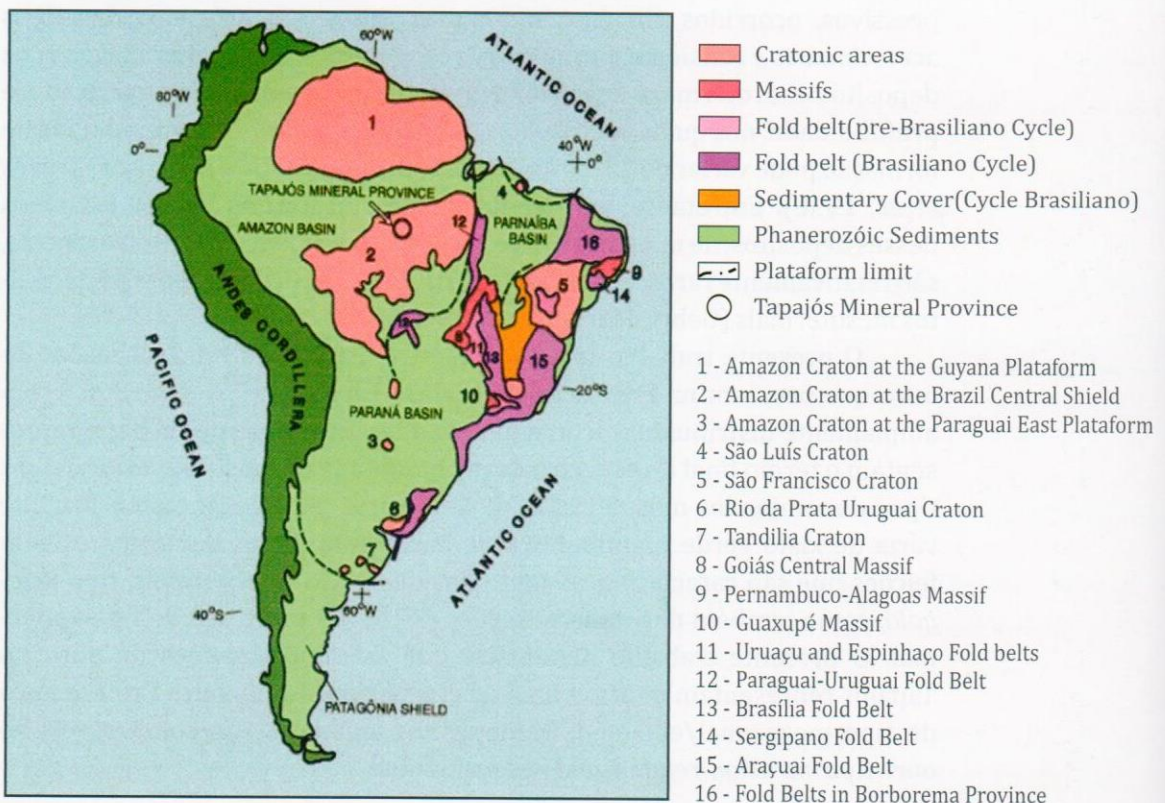


Figura 1. Plataforma Sul-americana e principais domínios geotectônicos (modificado de Almeida & Hasui, 1984) com a localização da Província Mineral do Tapajós.

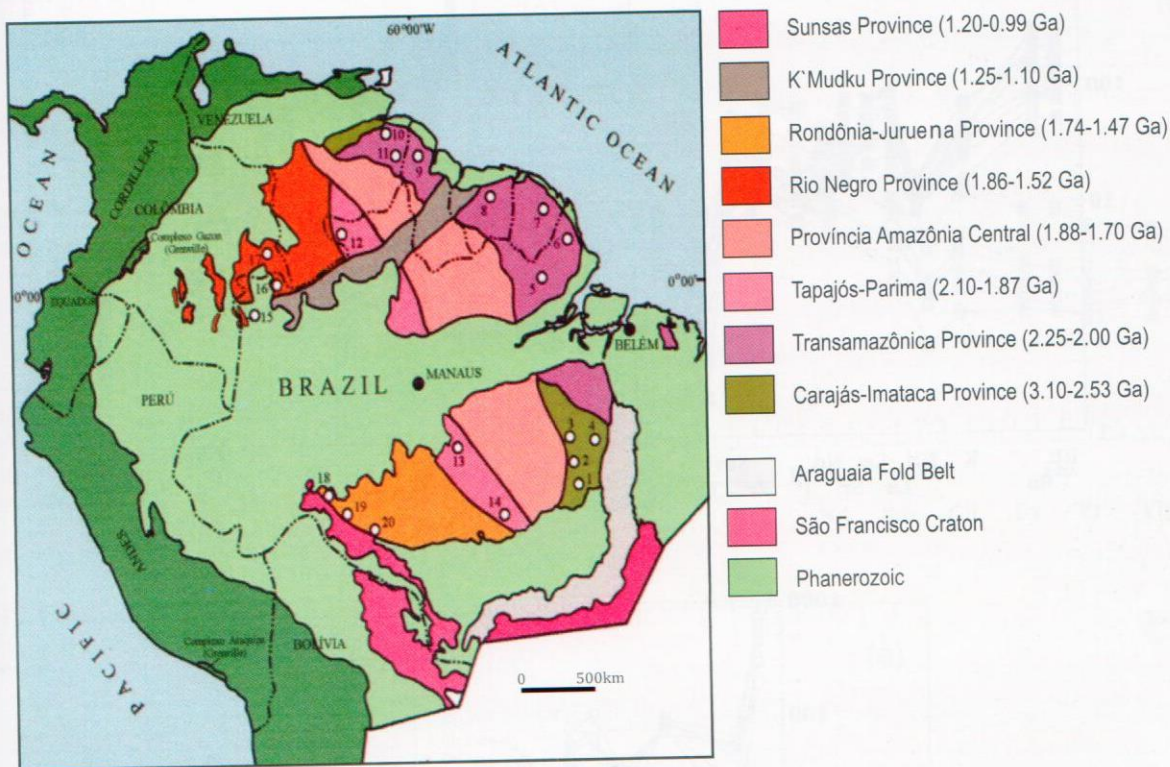
1.990 a 1.879 Ma foram também reconhecidas na província.

O vulcanismo félsico consistindo de andesito, basalto-andesítico, traquiandesito, latito, riolito, dacito, rochas piroclásticas e ignibritos, representam pulsos vulcânicos que ocorreram na província entre 1.888 a 1.878 Ma.

Atividade magmática intra-cratônica associada ao rifteamento crustal de idade 1.760 Ma resultou no *emplacement* de: granitos do tipo rapakivi e alcalino (1.580 a 1.579 Ma); basaltos alcalino (1.099 Ma); e enxames de diques de dolerito (0.514 a 0.180 Ma).

O metamorfismo é caracterizado pela preservação de textura primária, variando de condições de fácies *greenschist* a anfibolítica de baixo grau. As rochas mais antigas (xistos e metassedimentamentos > 2.100 Ma) exibem proeminente foliação metamórfica ao longo do *trend* N-NW com mergulho para S-SW. Os granitóides mais antigos (Complexo Cuiú-Cuiú) exibem um padrão de deformação similar e o mesmo *trend* regional que as rochas mais antigas, sugerindo que ambas as unidades foram deformadas sob condições deformacionais relacionadas ao regime de falhas de empurrão em *stress field* onde $\sigma_1 \sim 70^\circ$. Entretanto, foliação bandada de origem magmática e fraturamento rúptil associados ao desenvolvimento de pluton são comuns. A deformação rúptil registrada nos granitóides dos segundo (Crepurizão) e terceiro (Parauari) arcos pode ter sido originada durante a intrusão de granitóides mais jovens (tipo Maloquinha) que foram desenvolvidos sob condições de crosta mais elevadas.

mentos > 2.100 Ma) exibem proeminente foliação metamórfica ao longo do *trend* N-NW com mergulho para S-SW. Os granitóides mais antigos (Complexo Cuiú-Cuiú) exibem um padrão de deformação similar e o mesmo *trend* regional que as rochas mais antigas, sugerindo que ambas as unidades foram deformadas sob condições deformacionais relacionadas ao regime de falhas de empurrão em *stress field* onde $\sigma_1 \sim 70^\circ$. Entretanto, foliação bandada de origem magmática e fraturamento rúptil associados ao desenvolvimento de pluton são comuns. A deformação rúptil registrada nos granitóides dos segundo (Crepurizão) e terceiro (Parauari) arcos pode ter sido originada durante a intrusão de granitóides mais jovens (tipo Maloquinha) que foram desenvolvidos sob condições de crosta mais elevadas.



CARAJÁS DISTRICT

- 1. Cumaru Mineral Province
- 2. Andorinhas Mineral Province
- 3. Carajás Mineral Province
- 4. Serra Leste Mineral Province

TRANSAMAZÔNICO DISTRICT

- 5. Ipitanga Mineral Province
- 6. Cassiporé Mineral Province
- 7. French Guyana Mineral Province
- 8. Suriname (Rosebel) Mineral Province
- 9. Omai Mineral Province
- 10. El Callo Province
- 11. Las Cristinas

PARIMA-TAPAJÓS DISTRICT

- 12. Parima Mineral Province
- 13. Tapajós Mineral Province
- 14. Alta Florestal Mineral Province

RIO NEGRO DISTRICT

- 15. Traira Mineral Province
- 16. Caparro Mineral Province
- 17. Maimachi Mineral Province

RONDONIA-JURUENA DISTRICT

- 18. Madeira Mineral Province
- 19. Jarú Mineral Province
- 20. Colorado Mineral Province

Figura 2. Províncias geotectônicas (modificado de Santos *et al.*, 2000) com a distribuição dos principais distritos e províncias auríferas no Craton Amazônico).

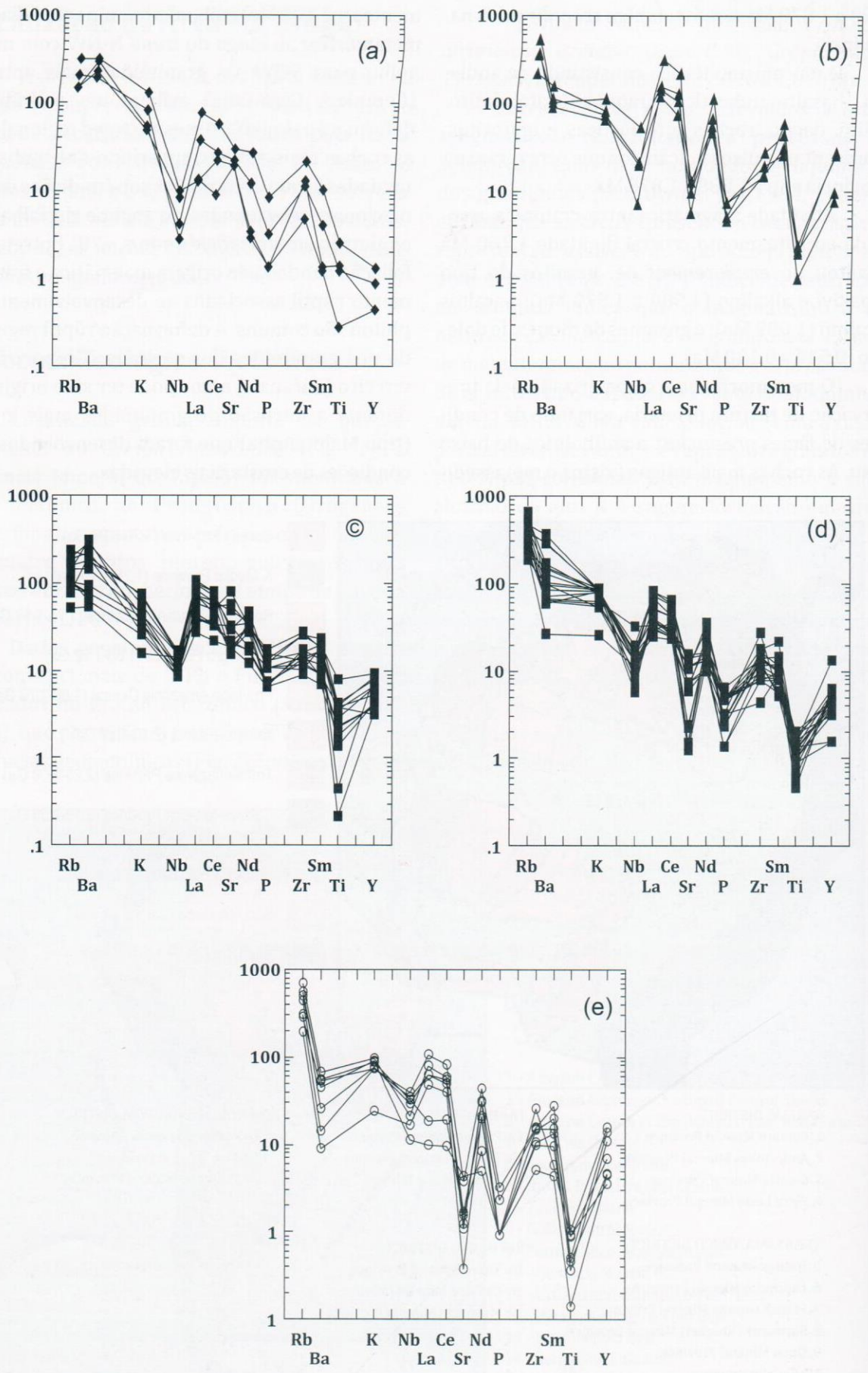


Figura 3. Padrões de distribuições dos elementos-traço, compatíveis e incompatíveis, dos granitóides das suítes intrusivas: (a) Cuiú-Cuiú, (b) Creporizão, (c) Parauari I, (d) Parauari II e (e) Maloquinha, normalizados segundo o padrão de manto primitivo de Sun & McDonough (1989).

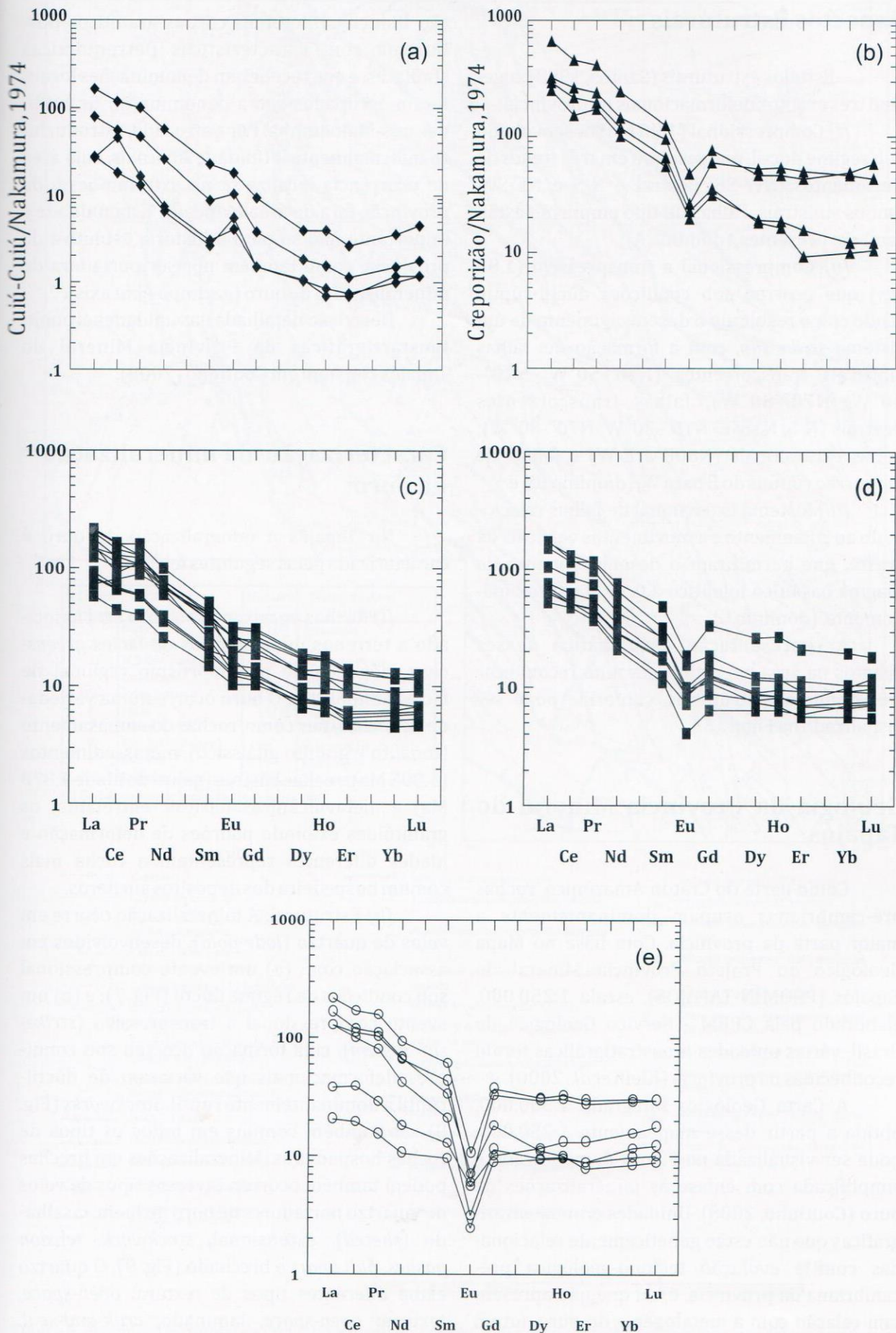


Figura 4. Padrões de distribuições dos elementos de terras raras dos granitóides das suítes intrusivas: (a) Cuiú-Cuiú; (b) Creporizão; (c) e (d) Parauari e (e) Maloquinha, normalizados segundo o condrito de Nakamura (1974).

Aspectos Estruturais

Estudos estruturais (Santos, 1998) sugerem três eventos deformacionais na província:

(i) Compressional (1.96 Ma) desenvolvido sob regime dúctil, que resultou em três *trends* de lineamentos: NW-SE, dextral e N-S e NE-SW, ambos sinistrais. Falhas do tipo empurrão estão também presentes, (domínio A);

(ii) Compressional a transpressivo (1.88 Ma) que ocorreu sob condições dúctil-rúptil, tendo como resultado o desenvolvimento de um sistema *strike-slip*, com a formação de: falhas sinistrais transcorrentes (N40°-50°W; N10°-30°W; N70°-80°W); falhas transcorrentes dextrais (N-S, N15°E; N10°-30°W; N70°-80°W); falhas extensionais (N80E a E-W) e falhas de empurrão rúpteis do E para W, (domínio B); e

(iii) Sistema extensional de falhas relacionado ao rifteamento e a movimentos verticais da crosta, que permitiram o desenvolvimento de magma basáltico toleítico a 0.18 Ma aproximadamente, (domínio C).

A representação esquemática desses eventos na área em estudo permite reconhecer três domínios estruturais, conforme pode ser visualizado na Figura 5.

Geologia da Província Mineral do Tapajós

Como parte do Craton Amazônico, rochas pré-cambrianas ocupam predominantemente a maior parte da província. Com base no Mapa Geológico do Projeto Província Mineral do Tapajós (PROMIN-TAPAJÓS), escala 1:250.000, elaborado pela CPRM - Serviço Geológico do Brasil, várias unidades litoestratigráficas foram reconhecidas na província (Klein *et al.*, 2000).

A Carta Geológica Integrada 1:500.000, obtida a partir desse mapeamento 1:250.000, pode ser visualizada na Figura 6, modificada e simplificada com ênfase às mineralizações de ouro (Coutinho, 2008). Unidades cronoliestratigráficas que não estão geneticamente relacionadas com a evolução tectono-geológica pré-cambriana da província, e/ou que não apresentam relação com a metalogenia do ouro, foram agrupadas. Como exemplo dessas unidades, cita-se as referentes à Bacia Amazonas, ao Gabren do Cachimbo e as coberturas proterozóicas (Forma-

ção Buiuçu). Diferentes corpos graníticos pós-Uatuma com características petroquímicas similares, e que receberam denominações locais, foram agrupados sob a denominação Granitóides pós-Maloquinha. Por outro lado, introduziu-se informalmente a Unidade Abacaxis, cuja área de ocorrência localiza-se no extremo-oeste da província, fora da área mapeada. Esta unidade é importante não só para a história evolutiva da província, como também por ser portadora de mineralizações de ouro (garimpo Abacaxis).

Descrição detalhada das unidades cronoli-toestratigráficas da Província Mineral do Tapajós constam em Coutinho (2008).

Caracterização da mineralização de ouro

No Tapajós a mineralização de ouro é caracterizada pelas seguintes feições:

(i) Rochas encaixantes: o ouro está associado a terrenos metamórficos de fácies *greenschist*, pós-pico de metamorfismo regional de fácies anfíbolítica. O ouro ocorre numa variedade de rochas, tais como, rochas do embasamento (tonalito e granito gnáissico), metassedimentos (1.895 Ma), rochas básicas (gabro de idade 1.878 Ma) e metavulcânicas félsicas, entretanto, os granitóides exibindo padrões de deformação e idades diferentes representam a rocha mais comum hospedeira dos depósitos auríferos.

(ii) Estrutural: A mineralização ocorre em veios de quartzo (*lode-gold*), desenvolvidos em associação com: (a) um evento compressional sob condições de regime dúctil (Fig. 7); e (b) um evento compressional a transpressivo (*strike-slip system*), cuja formação ocorreu sob condições deformacionais que variaram de dúctil-rúptil a predominantemente rúptil. *Stockworks* (Fig. 8) são também comuns em todos os tipos de rochas hospedeiras. Mineralizações em brechas podem também ocorrer. Diversos tipos de veios de quartzo portadores de ouro incluem: cisalhado (*sheted*), extensional, *stockwork*, *tension gashes*, *pull apart* e brechado (Fig. 9). O quartzo exibe diferentes tipos de textura: *open-space*, textura: *open-space*, laminado, *crak-and-seal*, *comb*, *crustiform* e *vuggy*. Calcedônia com hábito com hábito fibroso foi identificada em estudos microscópicos e, é consistente com valores δD

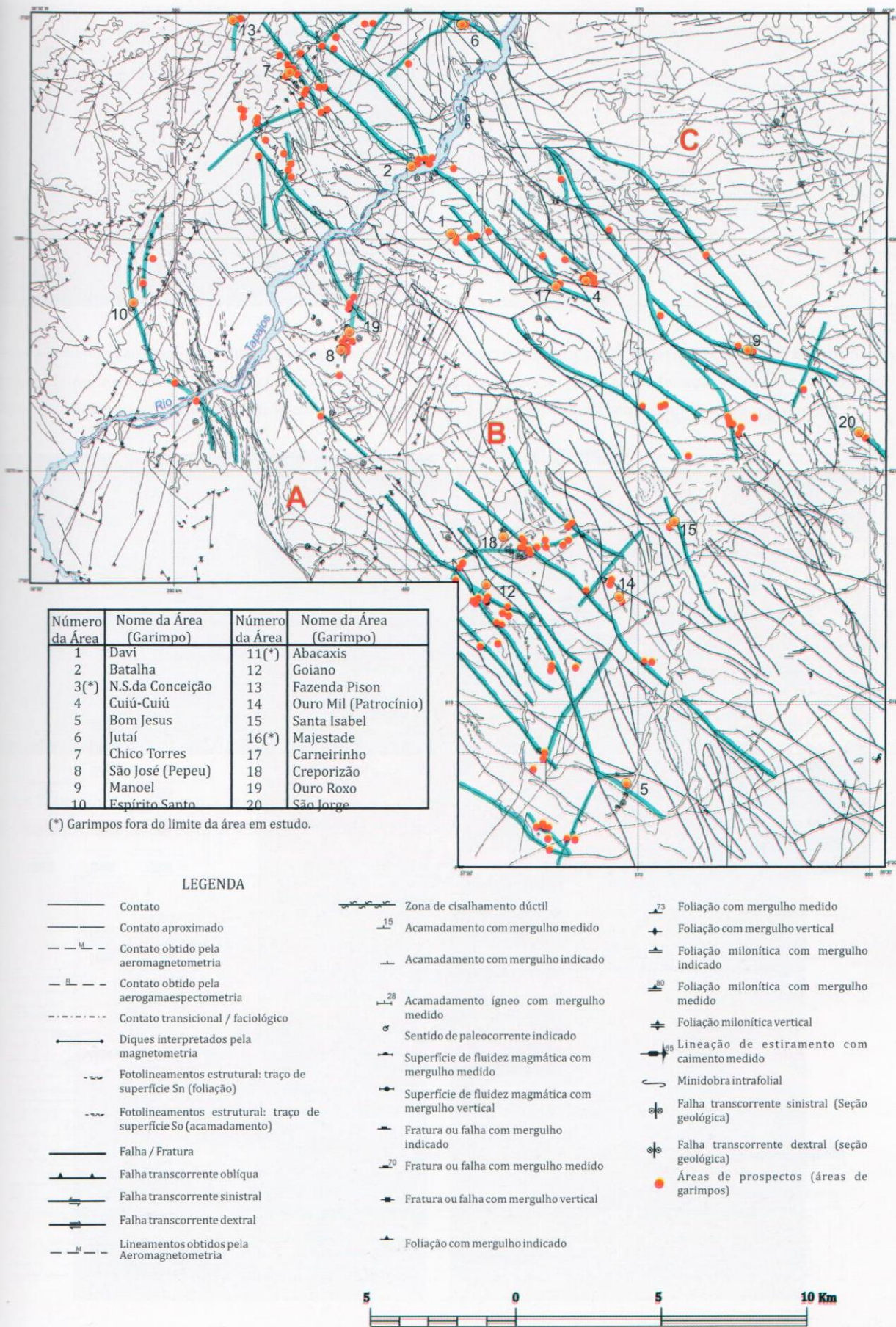
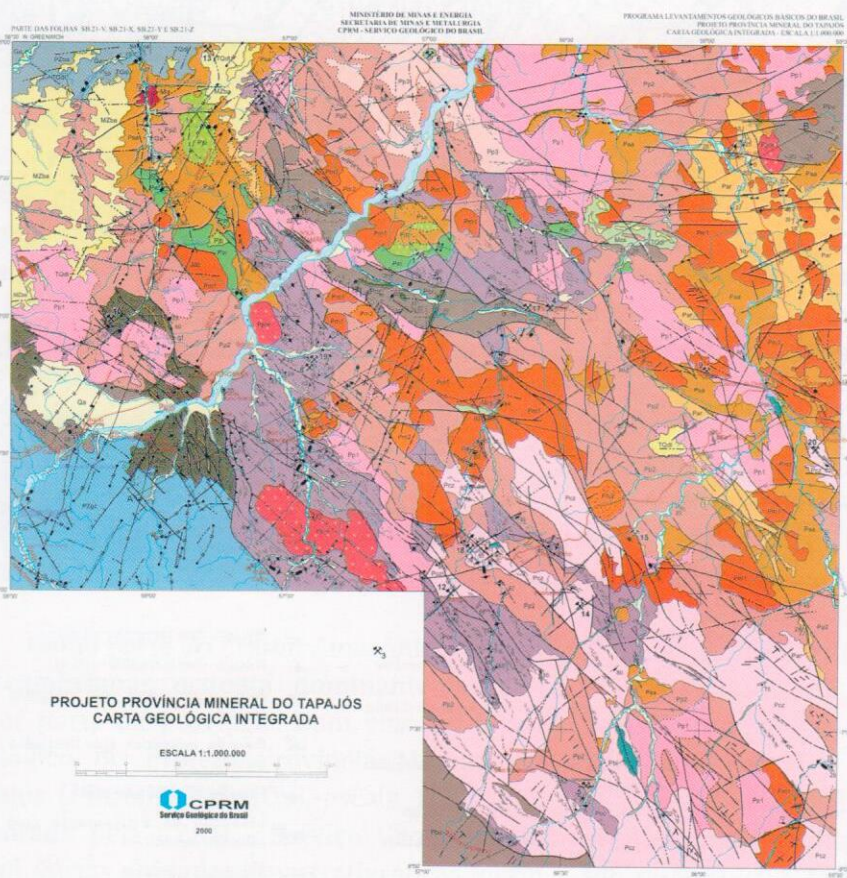


Figura 5. Arcabouço estrutural da Província Mineral do Tapajós, com a representação dos domínios geológico-estruturais. A - Domínio: Rochas do Embasamento & Supracrustais Deformação Dúctil, B - Domínio: Magmatismo Tipos Creporizão & Parauari, deformação dúctil-rúptil e C - Domínio: Sistema Plutono-Vulcânico (Evento Uatumã), deformação rúptil.



PROJETO PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS
CARTA GEOLÓGICA INTEGRADA

ESCALA 1:1.000.000



2000

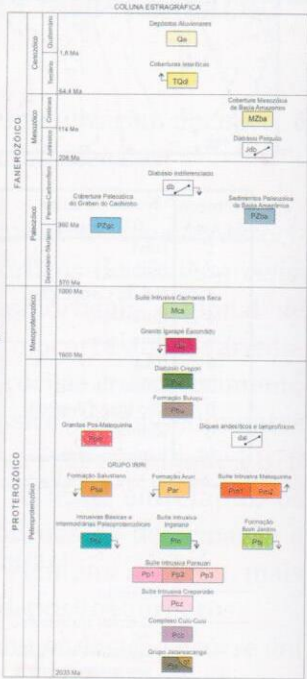
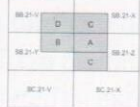


Localização das áreas de Estudo de Prospecto

Número da área	Nome da área (Orientação)	Coordenadas geográficas	Folha cart. 1:250.000
1	Davi	0 05'18.33" N 0 35'12.33" W	Vila Mandi Açu
2	Bandeira	0 05'12.33" N 0 35'02.33" W	Vila Mandi Açu
3	N. S. da Conceição	0 05'15.00" N 0 35'15.00" W	Faixa da área (Sul)
4	Curupira	0 05'15.00" N 0 35'15.00" W	Carrão
5	Pará-Açu	0 05'12.33" N 0 35'15.00" W	Vila Roraima
6	Alcalá	0 05'15.00" N 0 35'15.00" W	Carrão
7	Chico Lima	0 05'12.33" N 0 35'15.00" W	Vila Mandi Açu
8	São José (Pólo)	0 05'11.33" N 0 35'15.00" W	Ajaraçangá
9	Maracá	0 05'11.33" N 0 35'15.00" W	Vila Roraima
10	Estreito Santo	0 05'11.33" N 0 35'15.00" W	Ajaraçangá

Número da área	Nome da área (Orientação)	Coordenadas geográficas	Folha cart. 1:250.000
11	Altavista	0 05'22.33" N 0 35'05.33" W	Faixa da área (Sul)
12	Oleiros	0 05'18.33" N 0 35'05.33" W	Vila Roraima
13	Prazeres/Praia	0 05'22.33" N 0 35'15.33" W	Vila Roraima
14	Onça (Piracema)	0 05'18.33" N 0 35'05.33" W	Vila Roraima
15	Santa Helena	0 05'17.33" N 0 35'15.33" W	Vila Roraima
16	Relatório	0 05'17.33" N 0 35'15.33" W	Faixa 100 metros NE
17	Caramuru	0 05'18.33" N 0 35'05.33" W	Carrão
18	Comandante	0 05'18.33" N 0 35'15.33" W	Vila Roraima
19	Onça Roxa	0 05'18.33" N 0 35'15.33" W	Ajaraçangá
20	São João	0 05'18.33" N 0 35'15.33" W	Vila Roraima

ARTICULAÇÃO DA FOLHA



- Contorno de unidade geológica
- Contorno administrativo
- Contorno hidrográfico
- Limite administrativo
- Limite geológico
- Limite urbano
- Limite estadual
- Limite municipal
- Limite de propriedade
- Limite de concessão
- Limite de reserva ambiental
- Limite de proteção ambiental
- Limite de proteção paisagística
- Limite de proteção cultural
- Limite de proteção arqueológica
- Limite de proteção histórica
- Limite de proteção patrimonial
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo paisagístico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo arqueológico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo histórico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo patrimonial)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e arqueológico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e histórico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e patrimonial)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico e arqueológico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico e histórico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico e patrimonial)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico e histórico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico, histórico e patrimonial)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico, histórico e patrimonial e geológico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico e arqueológico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico, arqueológico e histórico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico, arqueológico, histórico e patrimonial)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico, arqueológico, histórico e patrimonial e geológico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico e arqueológico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico e arqueológico e histórico)
- Limite de proteção ambiental (incluindo geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico, arqueológico, histórico, patrimonial e geológico e paisagístico e arqueológico e histórico e patrimonial)

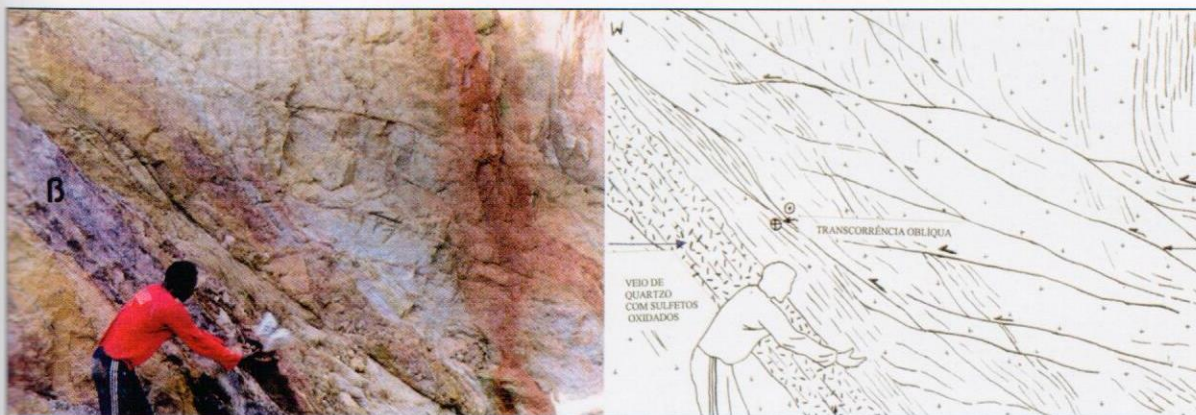


Figura 7. Exposição de veio de quartzo principal portador de ouro associado a óxido de ferro (à esquerda) encaixado em granitóide, onde ocorrem: (i) superfícies de deslocamento com mergulho mais baixo; e (ii) a foliação verticalizada (à direita). Observar o desenho interpretativo das feições estruturais (Santos, 1998); local: garimpo do Pepeu, região de São José.

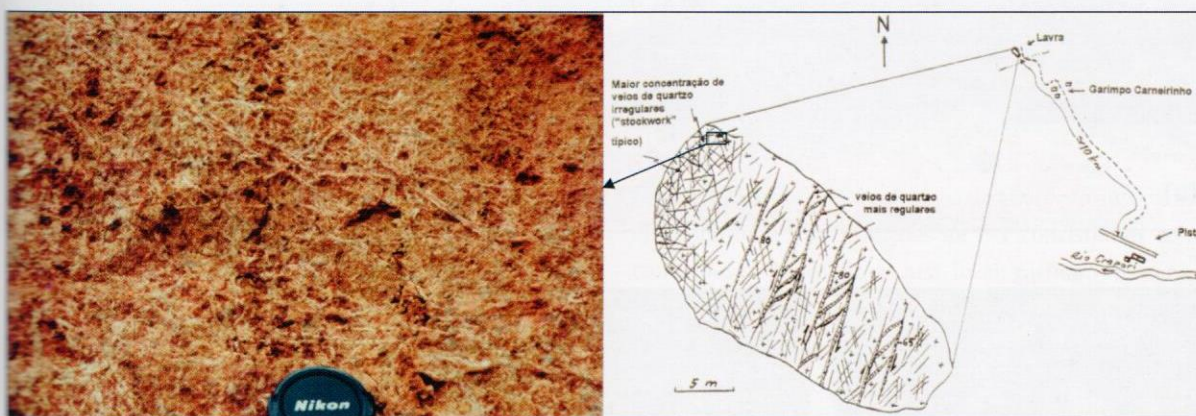


Figura 8. Detalhes da mineralização tipo stockwork desenvolvida em granitóide. Interpretação estrutural do sistema principal de veios de quartzo e stockworks; local garimpo do Carneirinho.

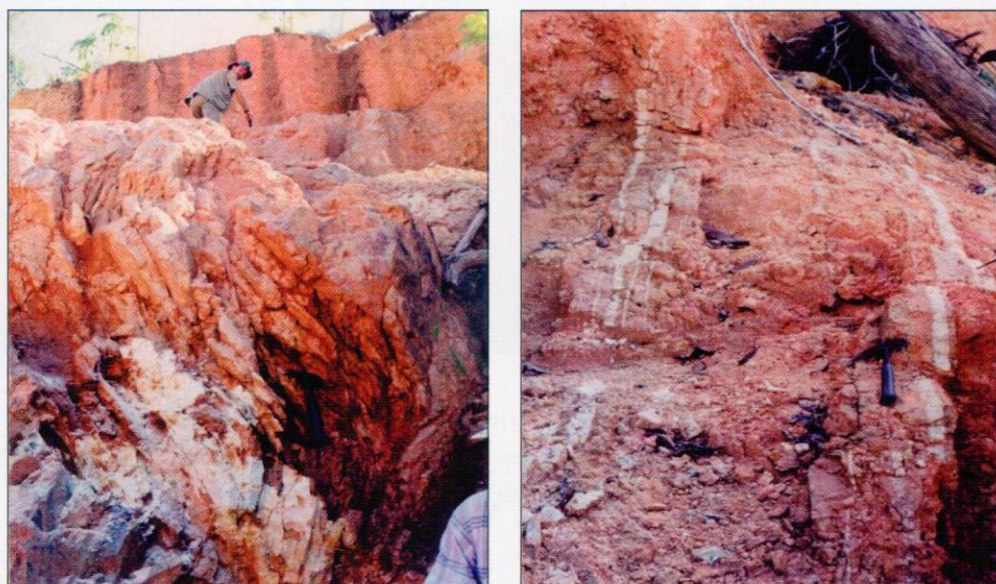


Figura 9. Falhas transcorrentes com arranjo estrutural tipo "flor positiva". Ao longo dos planos de falhas ocorrem veios de quartzo milimétricos com ouro; local garimpo Jerimum, região do Cuiú-Cuiú. A esquerda, zona mineralizada em ouro formada por veios de quartzo de direção N80°W cortada por um sistema de falhas transcorrentes ENE; local garimpo Jerimum.

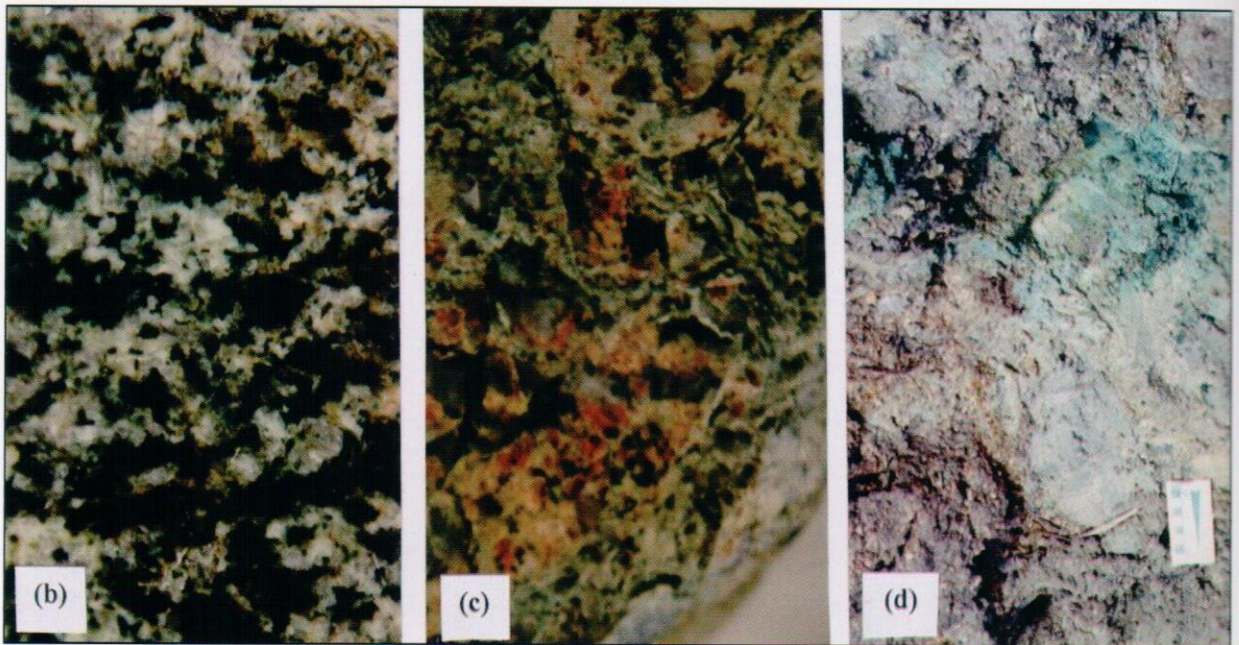
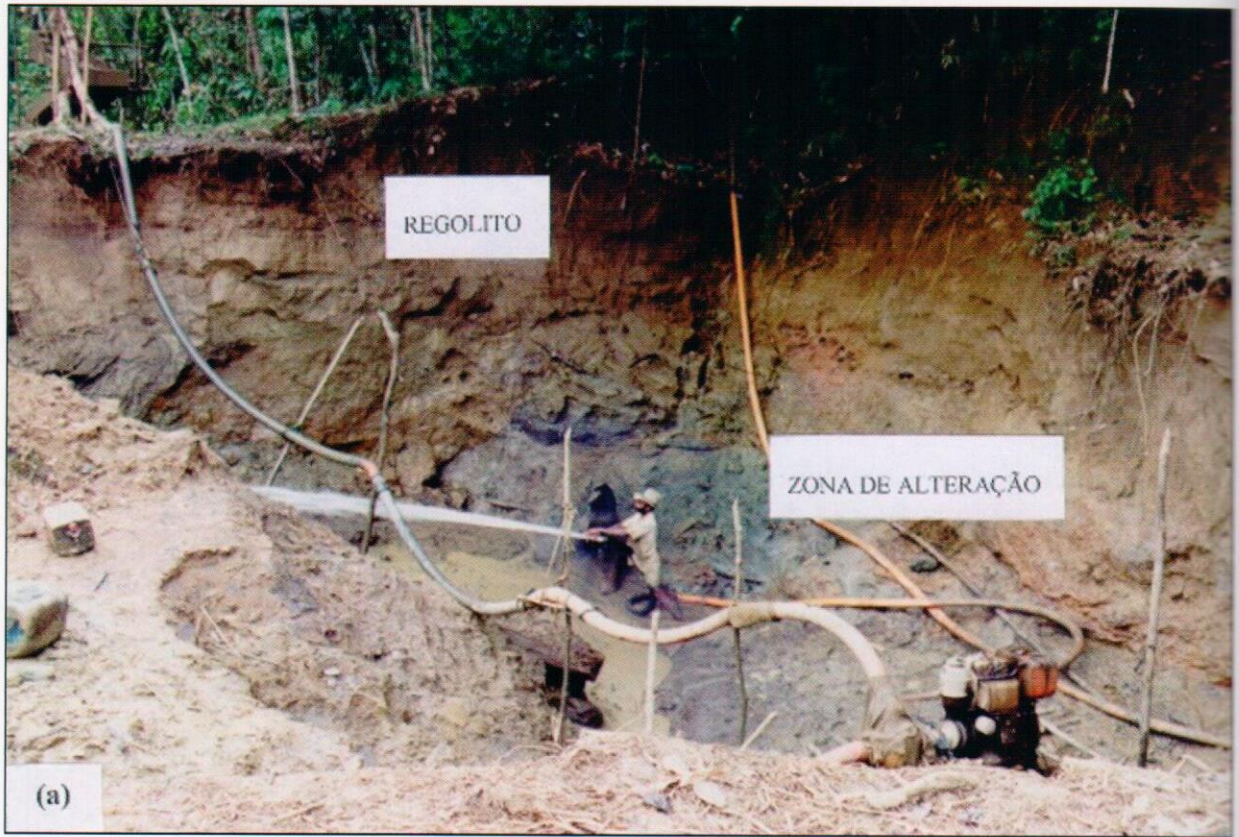


Figura 10. Zona de alteração desenvolvida em gabro, garimpo Jutáí. Observar na ilustração superior contato zona de alteração / regolito; aspecto descolorido da zona de alteração e vestígios da rocha original preservado. Nas ilustrações abaixo notar: (b) aspecto da rocha original (gabro); e o zoneamento da zona de alteração (c) zona de alteração proximal e (d) zona de alteração distal.



Figura 11. Perfil vertical da zona de alteração desenvolvida em granitóide sob condições de P-T consistente com as condições de fácies anfibolítica de baixo grau, local: garimpo Ouro Roxo. Observar do topo para a base: (a) rocha encaixante (tonalito); (b) zona de alteração distal (potássica) rica em K-feldspato rosa; (c) zona de alteração distal pobre em K-feldspato associado à sericita, quartzo e clorita; (d) zona de alteração proximal formada por sericita, clorita e carbonato com textura milonítica; (e) zona de alteração proximal consistindo de clorita e carbonato e textura milonítica muito fina; (f) zona mineralizada com veio de quartzo com sulfeto e ouro.

(iv) Mineralogia do minério: Os depósitos auríferos são representados por veios de quartzo polimetálicos com ~ 5 % de sulfetos. A assembléia mineral dos veios desenvolvidos sob condição dúctil (Fig. 13) consiste de magnetita, ilmenita, rutilo, hematita, pirrotita, calcopirita e galena. Para os veios relacionados à processos dúctil-rúptil a associação mineral (Fig. 14) é formada por magnetita, rutilo, hematita, pirrotita, calcopirita, galena, esfalerita (rica em Cd), molibdênio, tetradimita, teineita, telúriobismutita e cobaltita. O ouro, ocorrendo sob a forma visível e está associado à prata, em ambos os tipos de veios. A razão Au/Ag varia de 4 para o primeiro tipo a 10 no segundo tipo. Os minerais de *weathering* são: leucoxênio, goethita, limonita, covelita e calcosita.



Figura 12. Perfil vertical da zona de alteração desenvolvida em granitóide sob condições de P-T consistentes com as condições de fácies greenschist, local: garimpo "mineração" Crepori, área do Creporizão. Observar, do topo para a base: (a) rocha encaixante, granitóide; (b) e (c) zonas de alteração distal rica em feldspato rosa (microperfitas) associado a minerais filossilicáticos (muscovita e clorita) com textura cataclástica; (d) zona de alteração proximal com matriz afanítica de quartzo, feldspato, plagioclásio, clorita, muscovita e carbonato; (e) amostra de andesito (rocha encaixante) que ocorre em contato com a mineralização; (f) zona mineralizada desenvolvida no contato andesito (esquerda, cor escura) / granito (direita, cor rosa claro), consistindo de veio de quartzo portador de ouro e sulfetos.

(v) Dados de isótopos de Pb-Pb: Trinta e duas (32) amostras de sulfetos foram analisadas para a determinação da composição isotópica de chumbo, objetivando datar a idade de precipitação do ouro. A idade-modelo (Doe & Stacey, 1974) indicou duas fases de mineralização aurífera: 1,96 e 1,88 Ga. O múltiplo-estágio de deposição do ouro sugerido pelo idade-modelo do chumbo é consistente com o controle estrutural dos veios de quartzo portadores de ouro. Os resultados das análises da composição isotópica de Pb em sulfetos plotadas no diagrama-modelo *plumbotectonics* $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \times ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Zartman & Doe, 1981), indicam que a composição isotópica do Pb fixa na

curva do Pb orogênico, ou está próxima aos valores da curva do Pb de crosta superior. A participação do Pb de crosta inferior (Pb orogênico) no minério indica que o sistema hidrotermal tem origem profunda (Fig. 15).

SEQUÊNCIA PARAGENÉTICA DA ZONA DE ALTERAÇÃO DESENVOLVIDA EM CONDIÇÕES DE P-T DE FÁCIES ANFIBOLÍTICAS DE BAIXO GRAU

ZONA DE ALTERAÇÃO		DISTAL	PROXIMAL
MINERALOGIA			
SILICATOS			
Hornblenda			
Tremolita-actinolita			
Epidoto			
Biotita			
Clorita			
Muscovita			
Plagioclásio (oligoclásio)			
K-feldspato (microperita)			
Quartzo			
Sericita			
Zircão			
Titanita			
CARBONATO			
FOSFATO (Apatita)			
ÓXIDOS			
Magnetita			
Hematita			
Rutilo			
Hematita			
Goethita			
SULFETOS			
Pirrotita			
Pirita			
Calco pirita			
Covellita			
Calcosita			
OURO			

Figura 13. Sumário da sequência paragenética da zona de alteração em granitóides, metamorfisados em condições de P-T de fácies anfibolítica, de grau médio, na Província Mineral do Tapajós.

(vi) Inclusões fluídas: As diferentes proporções de líquido e vapor definem três tipos de inclusões fluídas: H₂O-CO₂ (água-vapor); CO₂ (rica em vapor); e H₂O (aquosa). Esse estudo permitiu reconhecer dois tipos de veios mineralizados: (a) veios ricos em CO₂ caracterizados por: 8 a

15 mol % CO₂, salinidade variando de 3 a 6 wt % NaCl; temperatura de 260 a 340°C; e densidade 0,70 a 0,85 g/cm³. Esses dados indicam pressão de 1,6 a 4 kb, sugerindo profundidade crustal compreendida entre 4 a 7 km; e (b) veios ricos na componente aquosa e pobre em CO₂ caracteriza-

componente aquosa e pobre em CO₂ caracterizado por: <5 mol % CO₂; salinidade entre 0,3 a 1,5 wt% NaCl; temperatura 220 a 300°C. A pressão de fluido varia de 1,2 a 1,0 kb, indicando profundidade crustal < 4 km.

(vii) Isótopos estáveis: amostras de 20 depósitos provenientes de diferentes ambientes geológicos e feições estruturais distintas, onde veios auríferos portadores de ouro ocorrem hospedados por diferentes litologias, foram analisa-

das para determinação dos isótopos estáveis de oxigênio e hidrogênio. As análises dos veios de quartzo mineralizados relevaram uma ampla variação nos valores de δO^{18}_{quartz} . O valor mais alto é igual a 15,0 ‰, enquanto que o mais baixo é 9,4 ‰. Este amplo espectro pode ser explicado por variação nos valores da: (a) temperatura de formação do depósito; ou (b) composição do δO^{18}_{quartz} do fluido hidrotermal. O controle estrutural dos veios com ouro sugere uma variação no

SEQUÊNCIA PARAGENÉTICA DA ZONA DE ALTERAÇÃO DESENVOLVIDA EM CONDIÇÕES DE P-T DE FÁCIES GREENCHIST

ZONA DE ALTERAÇÃO	DISTAL	PROXIMAL
MINERALOGIA		
SILICATOS		
Plagioclásio (oligoclásio-albita)		
K-feldspato (micropertita)		
Quartzo		
Epidoto		
Biotita		
Clorita		
Muscovita		
Sericita		
Zircão		
Titanita		
Alanita		
CARBONATO		
FOSFATO (apatita)		
SULFATO (barita)		
FLUORETO (fluorita)		
ÓXIDOS		
Magnetita		
Rutilo		
Hematita		
Goethita		
Leucóxênio		
SULFETO		
Pirrotita		
Pirita		
Calco pirita		
Esfalerita (rica em Cd)		
Covellita		
Calcosita		
Galena		
Molibdenita		
Teluretos		
Minerais de Ti & Bi		
Cobaltita		
OURO		

Figura 14. Sumário da sequência paragenética da zona de alteração em granitóides, metamorfisados em condições de P-T de fácies greenschist, de grau médio, na Província Mineral do Tapajós.

nível crustal de deposição da mineralização. Por outro lado, textura brechóide nesses veios sugere fenômenos de recristalização que pode provocar contribuição distinta na composição dos valores de $\delta O^{18}_{\text{quartzo}}$ (valores herdados). Os valores de $\delta O^{18}_{H_2O}$ exibem uma variação de 2,6 a 8,7 ‰. Os valores de $\delta O^{18}_{\text{quartzo}}$ e $\delta O^{18}_{H_2O}$ apresentam correlação positiva sugerindo que o oxigênio dos veios de quartzo e do fluido hidrotermal têm a mesma origem. A variação nos valores de δD do sistema hidrotermal é de -21 a -56 ‰, embora duas amostras exibem valores mais baixos (-66 e -80). Os valores mais baixos de δD podem estar relacionados a presença de sílica calcedônica conforme comprovada pela textura fibrosa do quartzo. Como podem ser visualizados no diagrama, os

valores de $\delta O^{18}_{H_2O}$ e de δD fixam predominantemente nos campos dos fluidos magmático e de água juvenil (fluidos de origens profundas), indicando, portanto dois fluidos hidrotermais distintos (Figura 16). Uma possível componente de água meteórica no sistema pode ter sido acrescida ao sistema hidrotermal na crosta superior, baseado no fato que alguns depósitos desenvolvidos sob condições predominantemente rúptil apresentam inclusões fluídas ricas no tipo aquoso e depletadas em CO_2 . As assinaturas dos valores de $\delta O^{18}_{H_2O}$ e de δD são consistentes com as assinaturas de depósitos de idade do Archeano, e diferem das registradas para depósitos auríferos dos tipos: epitermal, *porphyry-copper* e Carlin.

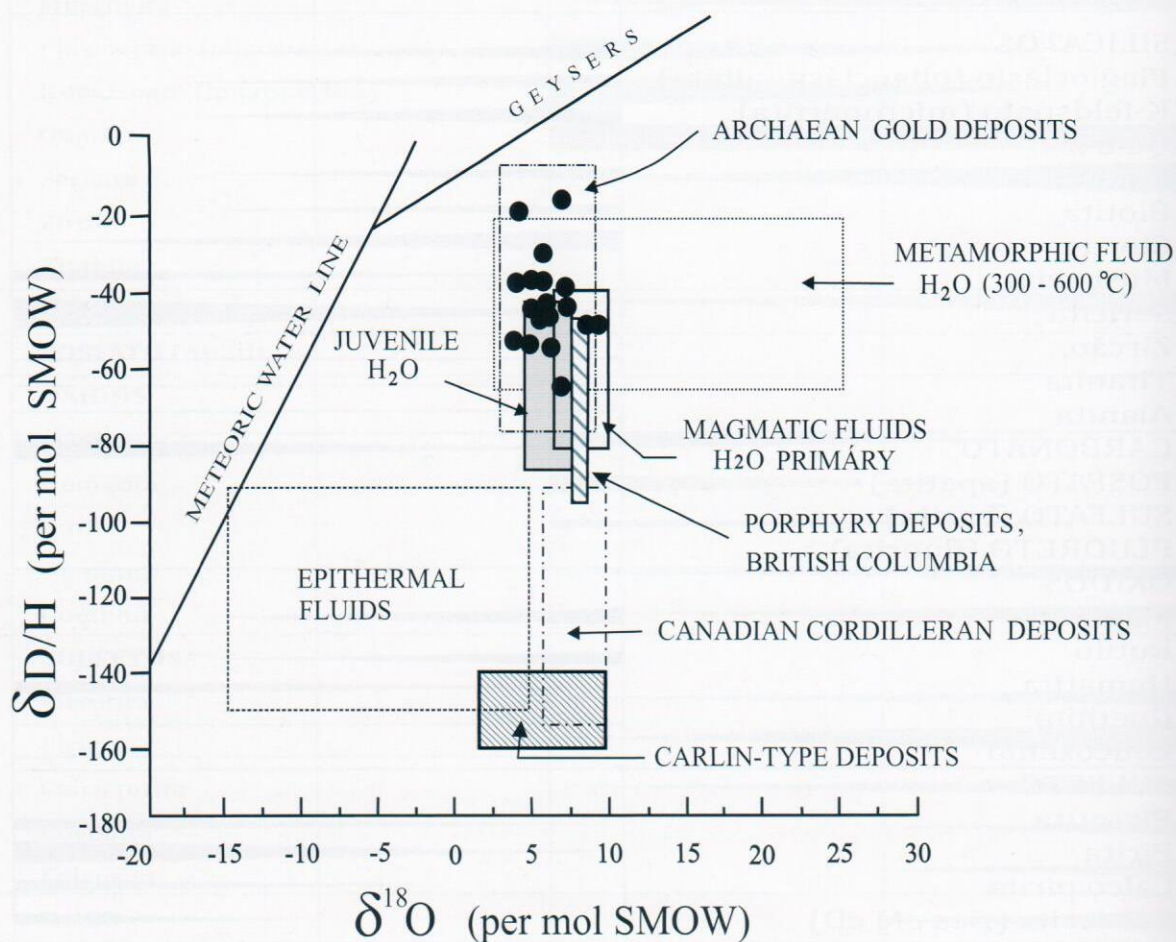


Figura 16. Diagrama dos valores de $\delta^{18}O$ (per mil) x $\delta D/H$ (per mil, SMOW) em inclusões fluídas em veios de quartzo portadores de ouro na Província Mineral do Tapajós. Referências de dados para outros tipos de fluidos mineralizantes para comparação da composição isotópica são também representados: (i) magmático, (ii) água juvenil e (iii) metamórfico (Taylor, 1979). Em adição a variação de $\delta D/H$ e $\delta^{18}O_{H_2O}$ para fluidos de diferentes tipos de depósitos de ouro está também representada pelos seus campos: (i) depósitos do Archeano, originada dos depósitos mesotermiais nas Províncias Superior e Slave, Canadá (Kerrich, 1989) e do Cinturão Norseman-Wiluna, Western Australia (Golding & Wilson, 1988); (ii) depósitos da Cordilheira Canadense mesozóica (Nesbitt & Muchlenbachs, 1988); (iii) depósitos tipo Carlin, Arizona (Sawkins, 1990); (iv) depósitos tipo pórfiros com ouro da região de British Columbia, Canadá (Diron et al., 1995) e (v) depósitos epitermais (Field & Fifiarek, 1985). Observar também as linhas de água meteórica e gysers (Hodson, 1993).

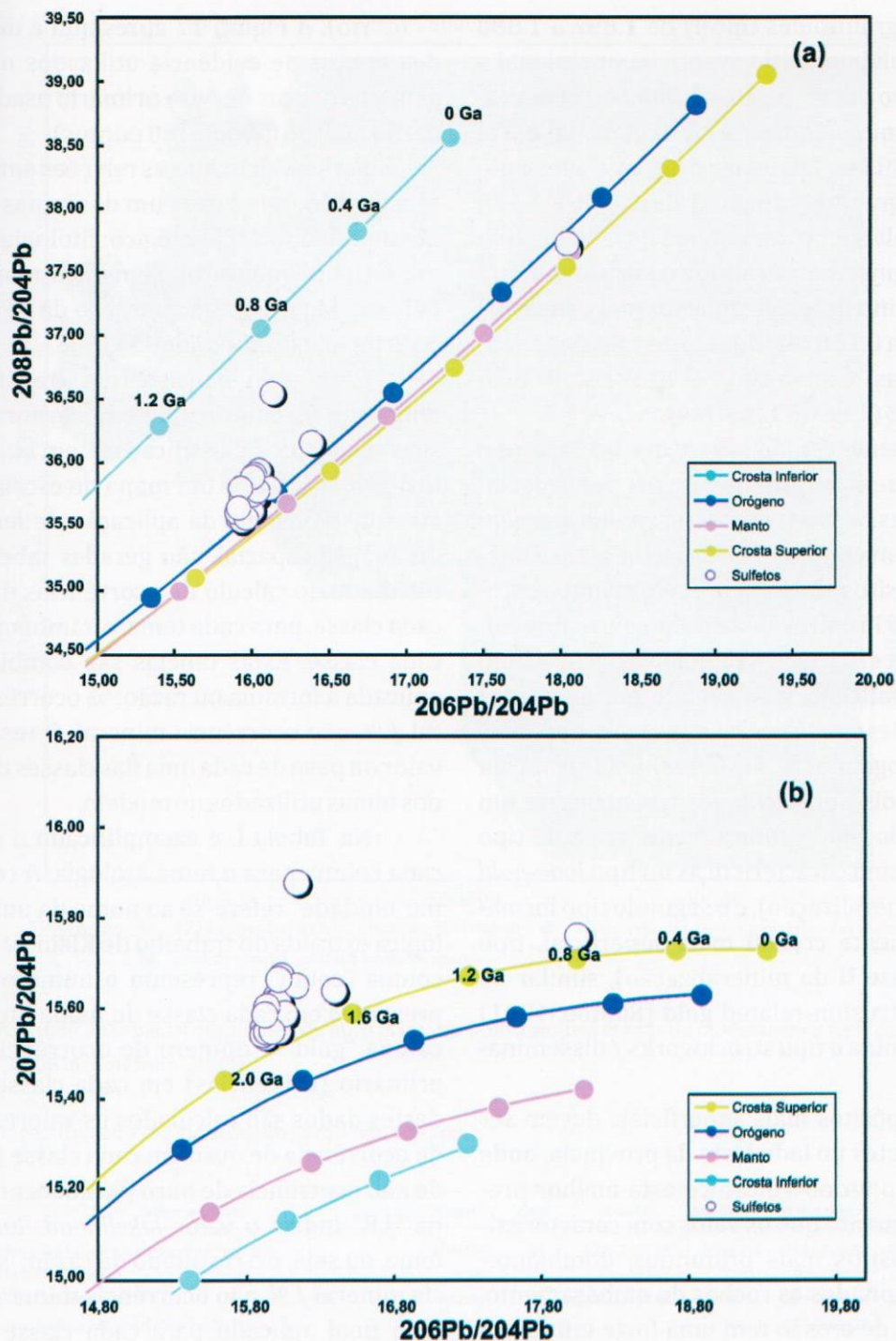


Figura 15. Diagramas mostrando as razões isotópicas de chumbo: (a) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ x $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e (b) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ x $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, no tempo presente, em amostra de sulfetos (pirita e galena) da Província Mineral do Tapajós, segundo o modelo de “plumbotectônica” de Doe & Zartman (1979). (32 determinações).

(viii) Ambiente tectônico: De acordo com o conceito de Condie (1992), significantes porções da Província Mineral do Tapajós são compostas por terrenos acrescionários. Não obstante as limitadas exposições, dados geocronológicos (Santos *et al.*, 1997) e geoquímicos em rochas indicam que grande parte desta região corresponde à terrenos acrescidos (crosta juvenil) que foram amalgamados ao Craton Amazônico

durante o Paleoproterozóico. Nesses termos os seguintes eventos são registrados: deposição de sedimentos a > 2.100 Ma; intrusão de granitóides pré-tectônicos (granitóides tipo-I) entre 2.011 a 2.006 Ma; expressiva deformação compressional sob condições metamórficas de fácies anfibolítica que resultou no *emplacement* de granitóides sin-tectônicos (granitóides tipo-I) entre 1.997 a 1.957 Ma; intrusões de granitóides pós-

tectônicos (granitóides tipo-I) de 1.897 a 1.888 Ma; desenvolvimento do evento compressional a transpressivo dúctil-rúptil a 1.888 Ma; *emplacement* de granitos do tipo-A pós-colisional entre 1.883 a 1.888 Ma; intrusões de granitóides anorogênicos (granitos rapakivi) de 1.580 a 1.570 Ma; desenvolvimento do sistema de falhas extensionais; magmatismo alcalino a básico toleítico a 1.099 Ma; e intrusões de dolerito (*dyke swarms*) entre 0.514 a 0.180 Ma. Duas fases metalogenéticas auríferas ocorreram, e são sin a pós-magmatismo (1.960 e 1.880 Ma).

O presente estudo sugere que no Tapajós o ouro formou-se durante processos deformacionais, compressivos a transpressivos, em margem tectônica convergente, em orógeno acrescionário. Os depósitos são interpretados como representantes do Proterozóico do tipo ouro orogênico (Groves *et al.*, 1998), originado a partir de um fluido mineralizante que evoluiu em diferentes profundidades crustais, responsáveis por duas fases metalogenéticas auríferas. Esta proposta reconhece dois tipos de depósitos auríferos: um tipo formado em profundidade crustal, tipo mesozonal, com características do tipo *lode-gold* (fase I da mineralização), e o segundo tipo formado em ambiente crustal mais superficial, tipo epizonal, (fase II da mineralização), similar ao ouro tipo intrusion-related gold (Sillitoe, 1991) onde predomina o tipo *stockworks* / disseminado.

Os depósitos mais superficiais devem ser mais freqüentes no lado leste da província, onde um sistema plutono-vulcânico está melhor preservado, enquanto que os veios com características de depósitos mais profundos, predominantemente relacionados as rochas do embasamento, onde o nível de erosão tem uma forte influência na sua preservação, predominam no domínio central da província.

Mapa Previsonal para Ouro

Objetivando o mapeamento, isto é, a representação espacial das duas fases da mineralização aurífera, elaborou-se o Mapa Previsonal para Ouro na Província Mineral Tapajós (PMT), aplicando-se a técnica baseada no método probabilístico *Likelihood Ratio*, que se fundamenta em evidências (173 ocorrências de ouro primá-

rio). A Figura 17 apresenta a distribuição dos pontos de evidência utilizados na modelagem e os pontos de ouro primário usados na validação final do modelo (60 pontos).

Foram calculadas as relações entre as ocorrências minerais e cada um dos temas utilizados nesse trabalho: (i) Geológico: litologia e estrutural, e (ii) Geoquímica: elementos maiores: Fe⁺², Fe⁺³, Mg, Mn e Ti, com aplicação da APC (Análise de Principais Componentes).

O método consiste em transformar os temas em formato *raster*, e posteriormente nas suas respectivas classificações, em *quantil*, exceto a geologia que é um mapa de escala nominal discreto. Por meio da aplicação de ferramentas de análise espacial, são geradas tabelas com o resultado do cálculo de ocorrências de ouro em cada classe, para cada tema, e, também, a área de cada classe. Estas tabelas são combinadas e é aplicada a fórmula ou razão: % ocorrência mineral / % não ocorrência mineral. O resultado é o valor ou peso de cada uma das classes de cada um dos temas utilizados no modelo.

Na Tabela I, é exemplificado o cálculo de cada coluna para o tema litologia. A coluna "nome_unidade" refere-se ao nome da unidade litológica extraída do trabalho de Klein, *et al*, 2000. A coluna "count" representa o número de pixels presentes em cada classe do mapa litológico e a coluna "gold" o número de ocorrência de ouro primário (evidências) em cada classe. A partir destes dados são calculados os valores relativos de ocorrência de ouro em cada classe (% gold) e de não ocorrência de ouro (% not occur). A coluna "LR" indica o valor *Likelihood Ratio* para o tema, ou seja, é o resultado da razão: % ocorrência mineral / % não ocorrência mineral. O resultado final aplicado para cada classe litológica apresenta-se na coluna "LRx100", que consiste dos valores de *Likelihood Ratio* multiplicados por 100, para gerar números inteiros. O mesmo procedimento foi executado para os temas geoquímica e estruturas.

Posteriormente, todos os temas reclassificados com seus respectivos valores de "LRx100" foram multiplicados e gerado o mapa previsonal. Este mapa foi classificado em valores de escala ordinal e pode ser visualizado na Figura 18. O teste de validação aplicado resultou em 75% de coincidência.

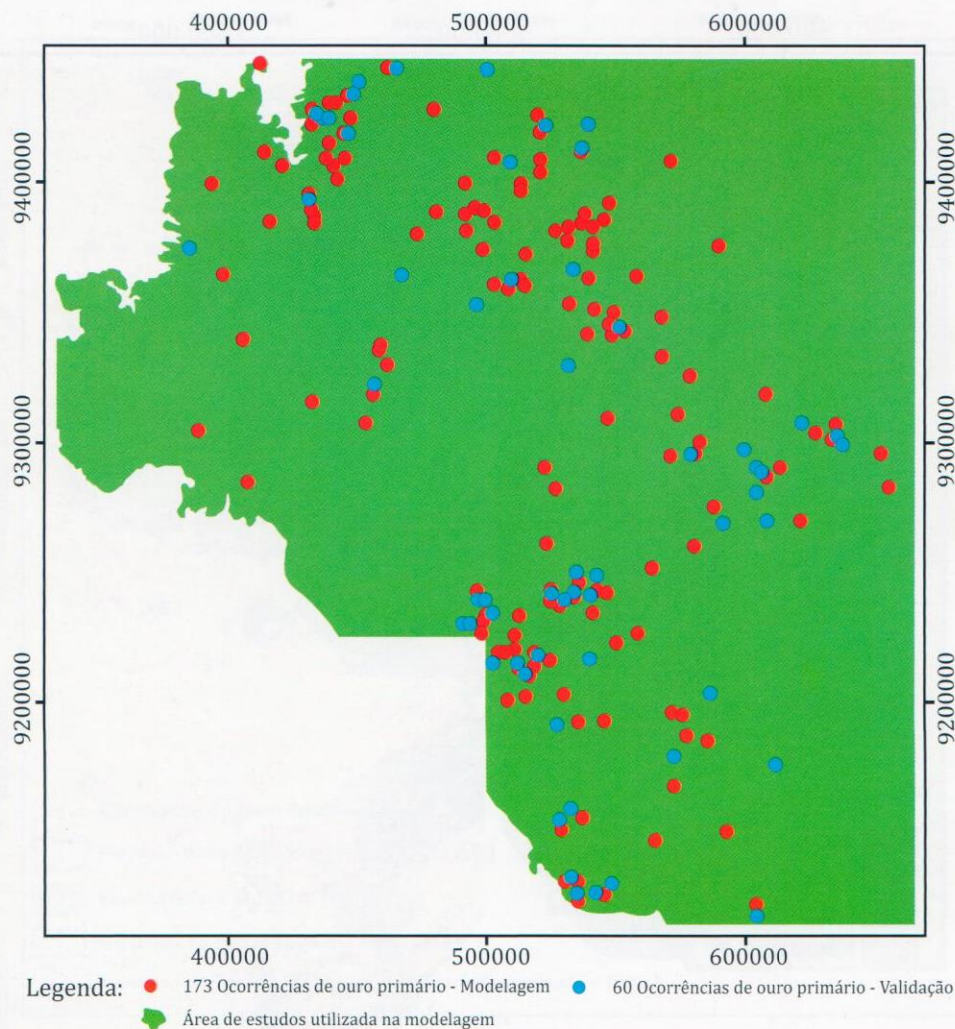


Figura 17. Distribuição espacial dos pontos de ouro primário utilizados nas etapas de modelagem e validação (extraído de Jacques *et al.*, 2008 in: Coutinho, 2008).

Tabela 1. Valores utilizados na modelagem para o tema litologia.

Value	Nome_unidade	Count	Gold	% Gold	Not Ocorr	% Not Ocorr	LR	LRx100
1	Suite Intrusiva Parauari (fácies sienítica Parauari)	1946979	40	23,12138728	1946939	24,14090647	0,957768	96
2	Suite Intrusiva Ingarana	74865	2	1,156069364	74863	0,928257475	1,245419	125
3	Complexo Cuiu-cuiu	882760	49	28,32369942	882711	10,94510084	2,587797	259
4	Intrusivas Básicas e Intemediárias Paleoproterozóico	10062	0	0	10062	0,124762923	0	0
5	Suite Intrusiva Maloquinha (fácies Biotita)	883000	8	4,624277457	882992	10,94858508	0,422363	42
6	Depósitos aluvionares	281028	0	0	281028	3,484583062	0	0
7	Suite Intrusiva Creporizão	1058496	31	17,91907514	1058465	13,12434779	1,365331	137
8	Suite Intrusiva Parauari (fácies Granítica a titanítica)	140770	2	1,156069364	140768	1,745440983	0,662337	66
9	Formação Buiuaçu	295728	0	0	295728	3,666854476	0	0
10	Cobertura Mesozóica da Bacia Amazônica	1074	0	0	1074	0,013316973	0	0
11	Formação Aruri	295888	5	2,89017341	295883	3,668776386	0,787776	79
12	Formação Salustiano	674957	9	5,202312139	674948	8,368960988	0,62162	62
13	Suite Intrusiva Parauari (fácies grano-diorítica)	977356	21	12,13872832	977335	12,11838318	1,001679	100
14	Grupo Jacareacanga	156261	2	1,156069364	156259	1,937520335	0,596675	60
15	Suite Intrusiva Cachoeira Seca	27493	0	0	27493	0,340897142	0	0
16	Grupo Jacareacanga (qtz)	8835	0	0	8835	0,10954884	0	0
17	Formação Bom Jesus	46998	2	1,156069364	46996	0,582722951	1,983909	198
18	Granito Igarapé Escondido	4072	0	0	4072	0,050490422	0	0
19	Suite Intrusiva	124346	0	0	124346	1,541817774	0	0
20	Suite Intrusiva Maloquinha	48889	2	1,156069364	48887	0,606170247	1,907169	191
21	Diabásio Crepori	4489	0	0	4489	0,055660978	0	0
22	Coberturas Lateríticas	16875	0	0	16875	0,209240144	0	0
23	Água	103848	0	0	103848	1,287654546	0	0
24	Total	8065069	173	100	8064896	100		

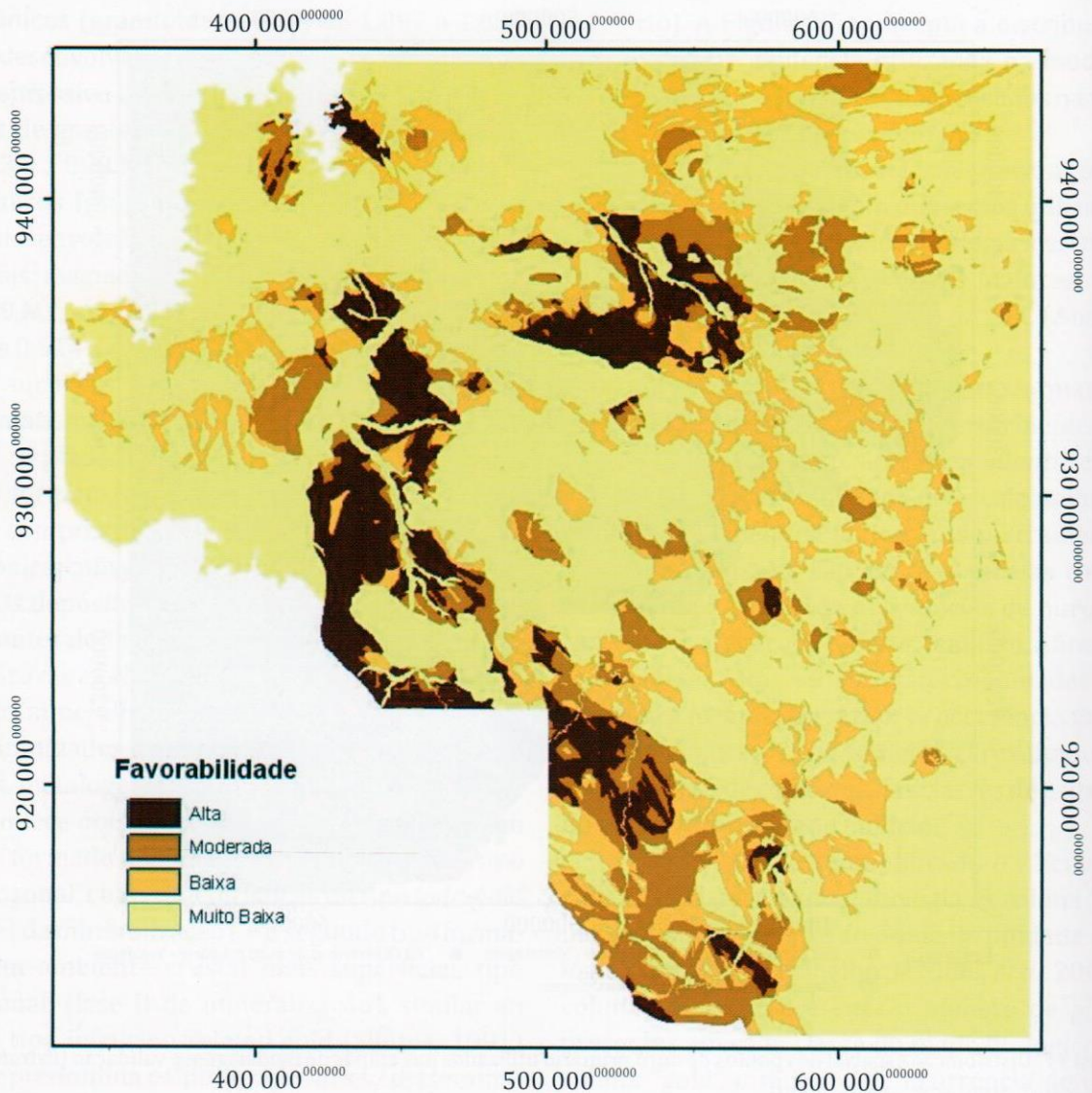
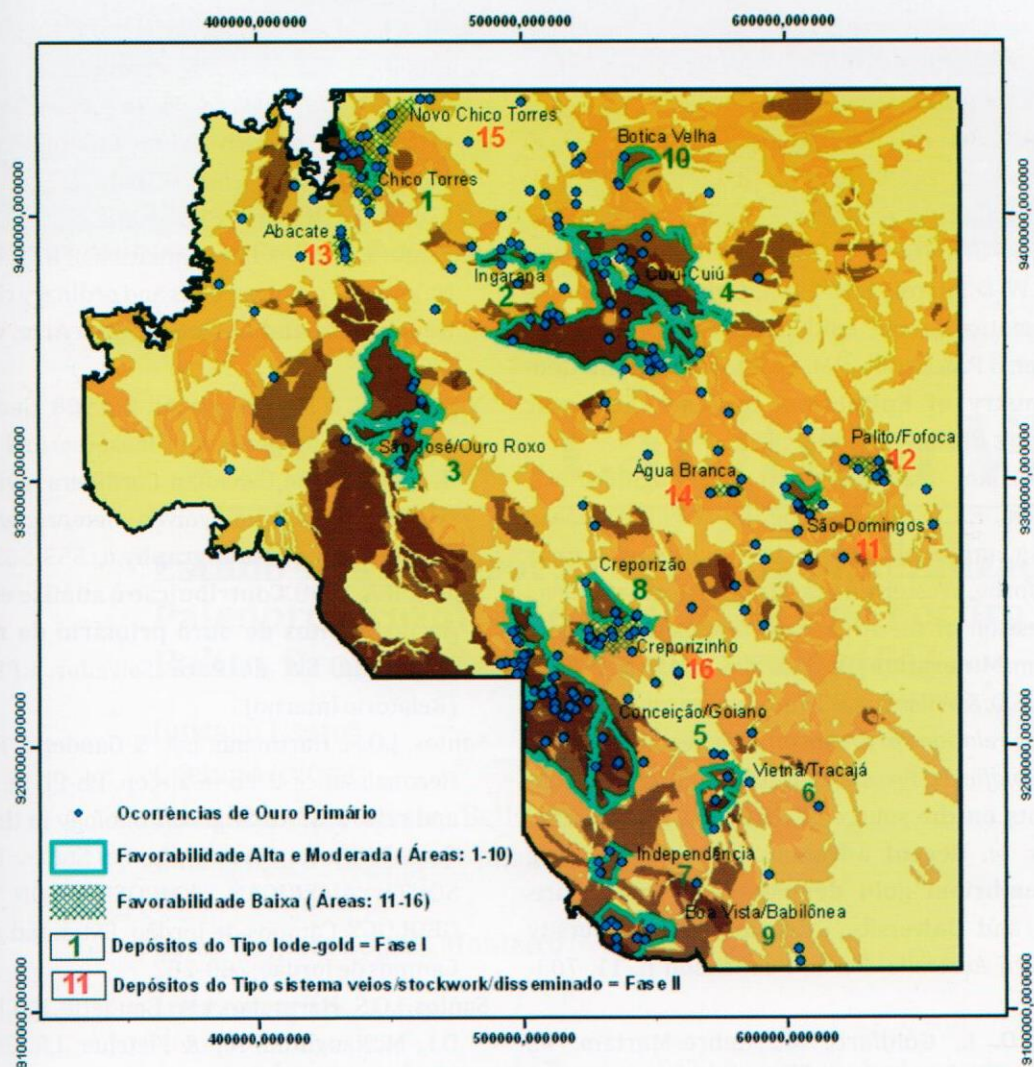


Figura 18. Mapa previsual para ouro em escala ordinal (extraído de Jacques *et al.*, 2008 in: Coutinho, 2008).

Conclui-se que na PMT as unidades geológicas com maior probabilidade de ocorrências auríferas são: Complexo Cuiú-Cuiú, Suíte Intrusiva Creporizão e Suíte Intrusiva Parauari. Enquanto que, no tema estrutural, 72% da maior probabilidade estão intimamente associadas ao Megassistema de Falhas Transcorrentes do Tapajós (*strike-slip fault system*). Do ponto de vista prospectivo, foram recomendadas áreas para pesquisa com favorabilidades alta e média a moderada, para as duas fases de mineralização (Fig. 19): (i) ocorrência de depósitos do tipo mesozonal (*lode-gold*), predominantemente localizado no lado oeste e parte central da província, onde ocorrem veios de quartzo com ouro com características de depósitos mais profundos relacionados às rochas mais antigas, cujo nível de erosão tem uma forte influência na sua exposição; e (ii) depósitos mais superficiais, tipo epizo-

nal (sistema *stockwork*/disseminado), dominando no lado leste da área em estudo, cujos depósitos estão relacionados ao sistema plutono-vulcânico, onde essas rochas estão melhor preservados.

O conhecimento técnico-científico acumulado associado à inovação tecnológica possibilitou a organização da base de dados georreferenciados, que fundamentada em idéias inovadoras gerou o sistema de informação geográfica (SIG) tornando possível a elaboração do mapa previsual para ouro na PMT. O sistema, importante ferramenta, moderna e dinâmica, além de preservar e organizar de forma sistemática e georreferenciada os dados e informações, permite atualizar o conhecimento em função do avanço da pesquisa. Trata-se, portanto, de uma contribuição para o entendimento do controle das mineralizações de ouro na província, com base no conhecimento



Áreas de Favorabilidade Alta e Moderada

- 1 Chico Torres (Lode-gold deposit)
- 2 Ingarana (Lode-gold deposit)
- 3 São José / Ouro Roxo (Lode-gold deposit)
- 4 Cuiú-Cuiú (Lode-gold deposit e Stockwork/disseminado)
- 5 Conceição / Goiano (Lode-gold deposit)
- 6 Vietnã / Tracajá (Lode-gold deposit)
- 7 Independência (Stockwork/disseminado)
- 8 Creporizão (Veio/Stockwork)
- 9 Boa Vista / Babilônia (Veio/Stockwork)
- 10 Botica Velha (Veio/Stockwork)

Áreas de Favorabilidade Baixa

- 11 São Domingos (Stockwork/disseminado)
- 12 Palito / Fofoca (Veio/Stockwork)
- 13 Abacate (Veio/Stockwork)
- 14 Água Branca (Veio/Stockwork)
- 15 Novo Chico Torres (Stockwork/disseminado)
- 16 Creporizinho (Veio/Stockwork)

Figura 19. Áreas recomendadas para estudos de prospectos na Província Mineral do Tapajós. Observar a distribuição dos depósitos tipo lode-gold e tipo sistema veio/stockwork/disseminado (extraído de Jacques *et al.*, 2008, in Coutinho, 2008).

regional da evolução tectono-geológico, na escala de 1:250.000, podendo se constituir num guia para minimizar riscos de investimentos relacionados à pesquisa em área de dimensões extremamente expressivas em condições amazônicas.

Referências

Almeida, F.F.M & Hasui, Y. 1984. **O Pré-cambriano do Brasil.** São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 378 p.
 Brown, G.C., Thorpe, R.S. & Webb, P. 1984. The geo-

chemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. **Journal of Geological Society of London**, v. 141, 413-426.
 Condie, K.C. 1992. (ed.) **Proterozoic Crustal Evolution, Developments in Precambrian Geology**, 10, Amsterdam: Elsevier, 537 p.
 Coutinho, M.G.N. 2008. **Província Mineral do Tapajós: Geologia, Metalogenia e Mapa Previsional para Ouro em SIG.** Rio de Janeiro: CPRM. 420p.
 Diron, F.G.E., Dittrick, M.P., McArthur, D.R., Ogrzyzlo, P.L., Pardoe, A.J. & Stothart, P. G. 1995. Bell and Granisle porphyry copper-gold mines, Babine

- region, West-central British Columbia. In: **Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum**, v. 46, Special Volume.
- Doe, B.R. & Stacey, J.S. 1974. The application of lead isotope to the problems of ore genesis and ore prospect evaluation: A review. **Economic Geology**, v. 69, n. 6, 757-776.
- Field, C.W. & Fifarek, R.H. 1985. Light stable isotope systematics in the epithermal environment. In: Berger, B.R. & Bethle, P.M., (eds), **Geology and Geochemistry of Epithermal Systems**, *Economic Geology Review*, 2, 99-128, 1985.
- Gebre-Mariam, M., Groves, D.I., McNaughton, N.J., Mikucki, E.J. & Vearncombe, J.R. 1993. Archaean Au-Ag mineralization at Race-track, near Kalgoorlie, Western Australia: a high crustal-level expression of the Archaean composite lode-gold system. **Mineralium Deposita**, v. 28, n. 6, 375-387.
- Golding, S.D. & Wilson, A.F. 1988. *Oxygen and hydrogen isotope relations in Archaean gold deposits of Eastern Goldfields Province, Western Australia: constraints on the source of Archaean gold-bearing fluids*. In: **Recent advances in understanding Precambrian gold deposits**. Geology Department and University Extension, The University Western Australia, Perth, Publication n. 11, 703-713.
- Groves, D. I., Goldfarb, M., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G. & Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposits types. **Ore Geology Reviews**, 13, 07-27.
- Hodson, C.J. 1993. *Mesothermal lode-gold deposits*. In: Sinclair, W.D., Trope, R.I. & Duke, J.M.(eds), **Mineral Deposits Modeling**. *Geological Association of Canada (GAC)*, Special Publication 40 p., 635-678.
- Jacques, P.D.; Lee, S.; Coutinho, M.G.N.; Lee, H.J. & Oh, H.J. 2008. Mapa previsional para ouro e m Sistema de Informação Geográfica (SIG). In: Coutinho, M.G.N. (ed.) **Província Mineral do Tapajós: Geologia, Metalogenia e Mapa Previsional para Ouro em SIG**. Rio de Janeiro : CPRM, 2008. 420p.
- Kerrick, R. 1989. Geochemical evidence on the sources of fluids and solutes for shear zone hosted mesothermal Au deposits. In: Bursnall, J.T. (ed.), **Mineralization and Shear Zones**, *Geological Association of Canada*, Short Course Notes, 6, 129-198.
- Klein, E.L., Almeida, M.E., Vasquez, M.L., Bahia, R.B.C., Quadros, M.L. do E.S. & Ferreira, A.L. 2000. **PROMIN - Tapajós. Geologia e Recursos Minerais da Província Mineral do Tapajós. Estados do Pará e do Amazonas. Escala 1:500.000**. Nota Explicativa. Belém: CPRM, 104 p.
- Nakamura, N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. **Geochimica and Cosmochimica Acta**, v. 38, 757-775.
- Nesbitt, B.E. & Muehlenbachs, K. 1988. Geology, geochemistry and genesis of mesothermal lode gold deposits of the Canadian Cordillera: evidence for ore formation from evolved meteoric water. **Economic Geology Monography**, 6, : 553-563.
- Santos, R.A. 1998. **Contribuição à análise estrutural de jazimentos de ouro primário da região de Cuiú-Cuiú, SW do Pará**. Salvador: CPRM, 22 p. (Relatório Interno).
- Santos, J.O.S., Hartmann, L.A. & Gaudette, H.E. 1997. Reconnaissance U-Pb in zircon, Pb-Pb in sulphides and review of Rb-Sr geochronology in the Tapajós Gold Province, Pará-Amazonas States, Brazil. In: **SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY**, Campos de Jordão. Extended Abstracts, Campos de Jordão, 280-282.
- Santos, J.O.S., Hartmann, L.A., Gaudette, E.H.E., Groves, D.I., McNaughton, N.J. & Fletcher, I.R. 2000. New understanding of the province of the Amazon craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. **Mineralium Deposita** 36, 278-299.
- Sawkins, F.J. 1990. **Mineral Deposits in Relation to Plate Tectonics**. Berlim: Springer-Verlag.
- Sillitoe, R. H. 1991. Intrusion-related gold deposits. In: Foster, R. P. (ed.). **Gold metallogeny and exploration**. Glasgow: Backie and Son, 165-209.
- Sun, S.S. & McDonough, W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, magmatism in the ocean basins. **Geological Society of London, Special Publication**, v. 42, 313-345.
- Taylor, H.P. 1979. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. In: **Geochemistry of Hydrothermal Mineral Deposits**. New York: John Willey and Sons.
- Zartman, R. E. & Doe, B. R. 1981. Plumbotectonics-the model. **Tectonophysics**, v. 75, n. ½, 135-162.