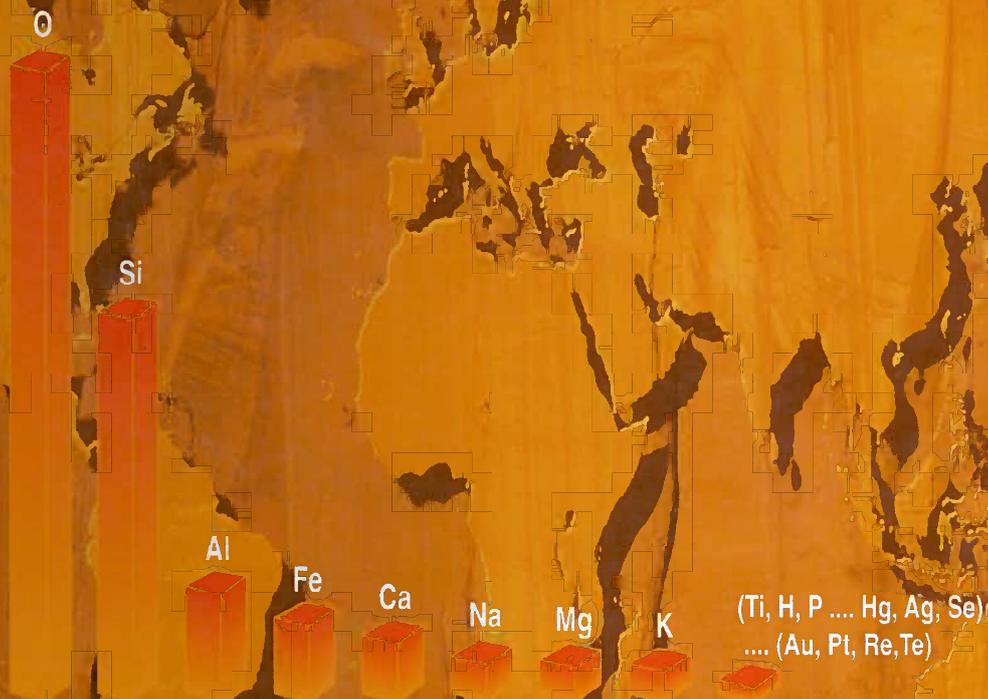


OTAVIO AUGUSTO BONI LICHT



PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA

PRINCÍPIOS, TÉCNICAS E MÉTODOS

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM
Serviço Geológico do Brasil

PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA

PRINCÍPIOS, TÉCNICAS E MÉTODOS

Otávio Augusto Boni Licht

1998

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de prospecção geoquímica, geológica, geofísica ou de sensoriamento remoto permitem, além da discriminação entre áreas mineralizadas e estéreis, a identificação de corpos mineralizados pela qualificação e quantificação de suas respostas. Essas respostas vetoriais estão baseadas na premissa fundamental de que a composição dos materiais da crosta terrestre, nas proximidades de um jazimento mineral, é diferente da composição de materiais similares localizados em regiões sem qualquer tipo de mineralização (Govett, 1983).

Dentre os métodos de exploração mineral, a mensuração da resposta química de mineralizações é dos mais utilizados, seja pela eficiência, seja pela relativa facilidade ou pelos baixos custos envolvidos em seu emprego rotineiro. Segundo Closs, L.G. (1986, com. pessoal), cerca de 30% dos custos de projetos de exploração mineral na Austrália e EUA são normalmente destinados à exploração geoquímica. No Brasil, esse percentual deve ter sido, e ainda é, maior, pela pequena tradição que há na utilização de métodos que envolvem custos maiores, como a aerogeofísica.

Por mais que se busque, não existe um modelo pronto e acabado para aplicação das técnicas geoquímicas de prospecção, visto as particularidades das condições geológico-geomorfológicas de cada área.

É falso dizer que a prospecção geoquímica é tão eficaz e eficiente, que não importa o quanto errado se conduza a amostragem ou se manipulem os dados, ou mesmo se preparem as amostras para um método analítico inadequado que, se o depósito mineral existir, ele inevitavelmente será detectado. Em cada fase do trabalho existem regras básicas de comportamento e de controle a serem obedecidas, caso contrário, todo o esforço estará comprometido.

1.1 O que é exploração geoquímica

A prospecção geoquímica, também chamada de exploração geoquímica, é uma aplicação da

ciência geoquímica aos propósitos da exploração mineral. Baseia-se no conceito de que os depósitos minerais representam concentrações anômalas de elementos na crosta da Terra, contrastando fortemente com suas encaixantes com teores normais.

Pela ação de processos químicos e físicos na superfície ou próximo dela, essas concentrações anômalas são incorporadas ao ciclo do intemperismo com a dispersão de seus componentes. Esse processo produz um halo de dispersão em forma de leque ou pluma, que configura um alvo exploratório muito mais amplo que o próprio corpo mineralizado.

A exploração geoquímica requer a medida de uma ou mais propriedades químicas em materiais naturais, tais como rocha, solo, sedimentos ativos de drenagem, concentrados de minerais, águas superficiais ou subterrâneas, vegetação, poeira ou gases. Os parâmetros mais comumente medidos nos procedimentos de exploração geoquímica para detecção de jazimentos minerais são os teores de elementos ou compostos químicos, ou então medidas de parâmetros como pH, Eh ou condutividade elétrica.

1.2 Métodos e objetivos da exploração geoquímica

Métodos geoquímicos de exploração têm sido intensamente utilizados desde há 60 anos, com os trabalhos desenvolvidos na antiga União Soviética. Foram particularmente utilizados nesse período os métodos baseados na detecção dos halos de dispersão de depósitos minerais produzidos pela sua desagregação e decomposição pela ação dos agentes do intemperismo. A aplicação dessas técnicas, sobre territórios vastos e geologicamente variados, conduziu à descoberta de um grande número de depósitos minerais.

Os princípios fundamentais do conhecimento acerca da migração, dispersão e concentração dos elementos químicos na crosta foram estabelecidos por V. I. Verndaski, A. E. Fersman e V. M.

Goldschmidt e constituem as bases científicas da prospecção geoquímica. Desse embasamento fazem parte as particularidades da distribuição dos elementos químicos em diferentes tipos litológicos, solos, águas naturais e plantas, bem como suas relações com as condições geomorfológicas e climáticas.

A possibilidade de aplicação dos princípios geoquímicos, baseados em dados quantitativos acerca da distribuição dos elementos químicos em materiais geológicos, conduziu à introdução da nova metodologia científica na exploração mineral e mesmo na sua seqüência de aplicação. Métodos matemáticos e estatísticos utilizados na manipulação dos dados, levando em consideração as regularidades geoquímicas e geológicas, acrescentam eficácia e precisão aos trabalhos de prospecção mineral, fornecendo suporte científico aos critérios de seleção de alvos.

Deve-se também enfatizar que o aperfeiçoamento dos métodos de exploração geoquímica contribuiu para a solução de um dos mais importantes problemas da exploração mineral, que é a descoberta de jazimentos não-aflorantes. Essa questão é da maior importância, não apenas para as regiões com tradição mineira, onde há pequena possibilidade de descoberta de novas jazidas devido ao grande detalhe do conhecimento geológico disponível, mas também e principalmente para áreas geologicamente desconhecidas, situadas nos trópicos ou sub-trópicos. Nessas regiões, as extensas crostas e coberturas produzidas pela ação do intemperismo, bem como a presença de densas coberturas vegetais, reduzem drasticamente as possibilidades de inspeção visual na prospecção de depósitos minerais. Os métodos de exploração geoquímica sob essas condições asseguram o sucesso da prospecção e aumentam o seu efeito e as suas chances de sucesso.

1.3 Histórico da prospecção geoquímica

Os primeiros registros históricos da observação e utilização das propriedades de elementos químicos na procura de depósitos minerais, referem-se a Georg Bauer, conhecido pelo pseudônimo de *Agricola* e por seu famoso livro *De Re Metalica*, editado em 1530 (Boyle, 1979). Ele citou a existência de vários *liquores* de sabores característicos como sulfatado e betuminoso nas águas das fontes e das drenagens, a partir dos quais seria possível supor a proximidade de depósitos minerais.

Uma referência histórica, que relaciona a presença de espécies vegetais com depósitos minerais, deve-se ao genovês Giovanni de Castro (Boyle, 1979). Trabalhando em uma mina de alunite de Edessa, na Síria, no século XV, observou que uma certa espécie vegetal se desenvolvia em associação íntima com a mineralização. Ao retornar à Itália, notou os mesmos vegetais nas proximidades de Tolfa, na região de Roma, onde executou algumas escavações e descobriu jazidas de alunite. Isso permitiu a implantação e o desenvolvimento de uma importante indústria de curtimento de couro e produção de pergaminhos. Por esse motivo, ele recebeu do papa Pio IX uma pensão vitalícia e uma estátua em local público.

A geoquímica é o encontro das águas dos conhecimentos da geologia e da química, e não se desenvolveu como um ramo isolado da ciência até o início do século XX. Um passo importante para isso foi dado em 1908, com a publicação de *Data of Geochemistry* pelo químico americano F. W. Clarke (1847-1931). Ele desenvolveu uma revisão profunda e sistemática de todos os resultados analíticos de rochas e minerais divulgados até então. Ao mesmo tempo, V. M. Goldschmidt (1888-1947), W. J. Vernadsky (1863-1945) e A. E. Fersman (1883-1945) estabeleceram os fundamentos teóricos para a caracterização dos elementos na natureza (Koljonen, 1992).

Em 1924, W. J. Vernadsky definiu os termos *litogeoquímica*, *hidrogeoquímica*, *atmogeoquímica* e *biogeoquímica* como os maiores ramos da geoquímica (Rankama e Sahama, 1950, em Fortescue, 1992).

O embasamento científico da prospecção geoquímica somente foi estabelecido na década de 30 do nosso século, com a escola soviética de geoquímica, onde se destacaram Vernadsky, Fersman, Vinogradov, Ginzburg e Malyuga.

Em 1932, foi efetuado na ex-URSS o primeiro grande programa de prospecção regional voltado à descoberta de depósitos estaníferos. Com o grande sucesso alcançado na detecção de regiões mineralizadas, logo seguiram-se os levantamentos *metalométricos*, visando a descoberta de depósitos minerais de diversos tipos, com programas de coleta de amostras cobrindo vastas regiões da ex-URSS e com a dosagem de diversos elementos químicos.

Também em 1932, foram iniciadas pesquisas no campo da biogeoquímica, na ex-URSS, Suécia e Finlândia.

Em 1945, Warren iniciou os trabalhos de pesquisa em prospecção geoquímica na University of British Columbia, Canadá.

Em 1947, Hawkes, Lovering e Bloom começaram a desenvolver estudos orientativos e testes de aplicação de metodologia geoquímica no United States Geological Survey – USGS.

Em 1954, Webb iniciou suas pesquisas no Imperial College of Science and Technology.

Em 1955, o Bureau des Recherches Géologiques et Minières – BRGM – começou seus trabalhos de exploração geoquímica no território francês e nas possessões coloniais africanas e americanas.

No Brasil, o primeiro trabalho relacionado com a prospecção geoquímica é o de Ribeiro e Florencio (1948) – *Aplicação das medidas de teor iônico do ar à pesquisa e à prospecção de minerais radioativos*.

O primeiro levantamento geoquímico voltado à exploração mineral noticiado no Brasil foi realizado por Melcher (1958), com uma grande campanha de amostragem, que coletou 25.000 amostras de solo em 1.200 km² no vale do rio Ribeira (Paraná e São Paulo), direcionada à prospecção de jazidas de chumbo.

Em 1962, é editado o primeiro livro dedicado ao tema, *Geochemistry in Mineral Exploration*, de Herbert Hawkes e John Webb, que veio a se tornar um clássico.

Desde esses primórdios, as técnicas de exploração geoquímica vêm sendo testadas, aplicadas e aperfeiçoadas em todos os ambientes climáticos, geográficos e geológicos. Contribuíram decisivamente para a compreensão dos processos de migração, dispersão e concentração dos elementos e, por consequência, para a descoberta de milhares de ocorrências e centenas de jazidas minerais em todo o mundo.

1.4 Estado-da-arte

As técnicas de exploração geoquímica do ambiente têm sido submetidas a uma crescente adaptação às novas necessidades da sociedade. Todos os métodos desenvolvidos para a exploração geoquímica direcionada à exploração mineral são úteis e aplicáveis a estudos da distribuição espacial, da abundância e das carências de elementos químicos ou substâncias de origem natural ou artificial no conhecimento do quimismo do meio físico, relacionado a diversas áreas do conhecimento, tais como a agronomia, veterinária, saúde pública e monitoramento ambiental. Diversos tipos de doenças endêmicas estão sendo

explicados por esse tipo de enfoque, como a ocorrência, na Jamaica, da doença tropical *kwashiorkor*, relacionada à carência de Se. Essa relação foi descoberta após o exame e interpretação dos dados de um levantamento geoquímico multielementar no território da Jamaica (Lins, C.A.C, 1994, com. pessoal).

Essas aplicações modernas das técnicas da exploração geoquímica estão sendo facilitadas pelas pesquisas metodológicas, de campo e laboratório, com o desenvolvimento de novas técnicas de amostragem e de isolamento de frações específicas, como concentrados de proteínas no material húmico de solos e sedimentos de drenagem (Goñi, J., 1982, com pessoal) ou dos musgos que cobrem as margens dos canais das drenagens em regiões de clima temperado a frio no hemisfério norte (Atlas Geoquímico da Escandinávia Setentrional). Além dessas, técnicas analíticas multielementares, empregando espectrometria de plasma, têm reduzido de forma drástica os limites de detecção dos elementos e substâncias, contribuindo para revelar estruturas e anomalias geoquímicas sutis, porém importantes e significativas.

Técnicas modernas de informática têm possibilitado o tratamento de enormes massas de dados geoquímicos multielementares, produzindo arquivos de uso compatível com *softwares* de processamento de imagens e possibilitando sua interpretação integrada a imagens obtidas por sensores geofísicos ou temáticos multiespectrais instalados em aviões ou satélites.

Essa abordagem moderna da exploração geoquímica tem possibilitado a execução de projetos de abrangência regional ou nacional em diversas regiões ou países do mundo, dentre os quais o Brasil. Dentre estes, salientam-se os projetos das Cartas Geoquímicas do Norte da Escandinávia, da Finlândia, da Grã-Bretanha, da Costa Rica, do Alaska e da República Popular da China. Todos esses projetos estão sendo coordenados em nível metodológico pelos projetos IGCP-259 e IGCP-360 (International Geological Correlation Project) da UNESCO e IUGS. O primeiro, denominado de International Geochemical Mapping, estabeleceu os padrões metodológicos para o planejamento e execução de levantamentos geoquímicos regionais; e, o segundo, denominado de Global Geochemical Baselines, vem definindo os padrões para a coleta de dados ao longo de perfis geoquímicos de escala continental, buscando definir os grandes padrões de distribuição dos elementos em escala global.

As ciências aplicadas não existem,
apenas as aplicações da ciência.

Louis Pasteur
(1822 - 1895)

2 PRINCÍPIOS GEOQUÍMICOS BÁSICOS

2.1 Ambiente geoquímico

Sob o ponto de vista geológico e geoquímico, a Terra é um sistema dinâmico, onde os materiais são movimentados de um local para outro, mudando de forma e composição. Tudo isso é feito por uma grande quantidade de processos tais como: fusão, cristalização, erosão, solução, precipitação, vaporização e decaimento radioativo.

Esse grande sistema, extremamente complexo, pode, entretanto, ser simplificado em dois grandes grupos, com base na pressão, temperatura e fluidos disponíveis. Assim, o *ambiente profundo*, também denominado de *hipógeno*, *primário* ou *endógeno*, caracteriza-se por altas temperaturas e pressões, com circulação restrita de fluidos e baixo teor de oxigênio livre. A ele pertencem os processos magmáticos, metamórficos e hidrotermais.

O *ambiente superficial*, também denominado de *supérgeno*, *secundário* ou *exógeno*, caracteriza-se por baixas pressões e temperaturas, uma movimentação livre de soluções e pela maior ou menor quantidade de oxigênio livre, água e CO₂. Fazem parte desse ambiente os processos de erosão, intemperismo, sedimentação e diagênese.

2.2 Dispersão e ciclo geoquímicos

Uma dada massa de material na Terra, normalmente, não mantém sua identidade à medida que passa pelas transformações do ciclo geoquímico, mas, ao contrário, tende a ser redistribuída e fracionada e ainda misturada com outros materiais. A movimentação dos materiais de um para outro ambiente pode ser didaticamente visualizada através da figura 2.1. Começando pela direita do diagrama e andando no sentido horário, vêem-se rochas sedimentares sendo progressivamente metamorizadas, à medida que são submetidas a temperaturas e pressões progressivamente maiores, com acrésci-

mos eventuais de componentes externos ao sistema. As rochas submetidas a tais condições podem atingir um estado tão fluido que, durante um processo de fusão posterior, poderão vir a se diferenciar em vários tipos de rochas ígneas e de fluidos hidrotermais. Quando a erosão expõe a suíte de rochas resultantes ao ambiente superficial, os elementos que as compõem são redistribuídos pela atuação dos agentes do intemperismo. Uma série de rochas sedimentares químicas, clásticas ou clastoquímicas pode então se depositar e o ciclo recomeça.

Esse processo, no qual íons e partículas se movem para novos locais e ambientes geoquímicos, é chamado de dispersão geoquímica. Toda a dispersão ocorre em um sistema aberto e dinâmico, onde os materiais geológicos são submetidos a mudanças de quimismo do ambiente, temperatura, pressões, tensões mecânicas e outras condições físicas. As rochas ou minerais e os grãos ou íons neles contidos, estáveis em um determinado ambiente, são liberados e dispersos, tanto pela ação de processos químicos quanto físicos.

A dispersão pode ser o resultado da atuação de agentes exclusivamente mecânicos, tais como a injeção de magmas ou movimentação de materiais superficiais por ação das águas das drenagens.

Exceto na segregação natural, característica das aluviões areno-argilosas, os processos puramente mecânicos de dispersão envolvem a mistura, mas não a diferenciação dos materiais dispersos em frações específicas. Pelo contrário, os processos químicos e bioquímicos comumente criam frações de composição bastante diversa. As frações mais móveis tendem a abandonar o seu hospedeiro original quando estiverem disponíveis condutos e gradientes físico-químicos mais adequados. Quando uma fase móvel entra em um novo ambiente, uma parte do material introduzido pode se depositar em virtude das novas condições de equilíbrio do sistema.

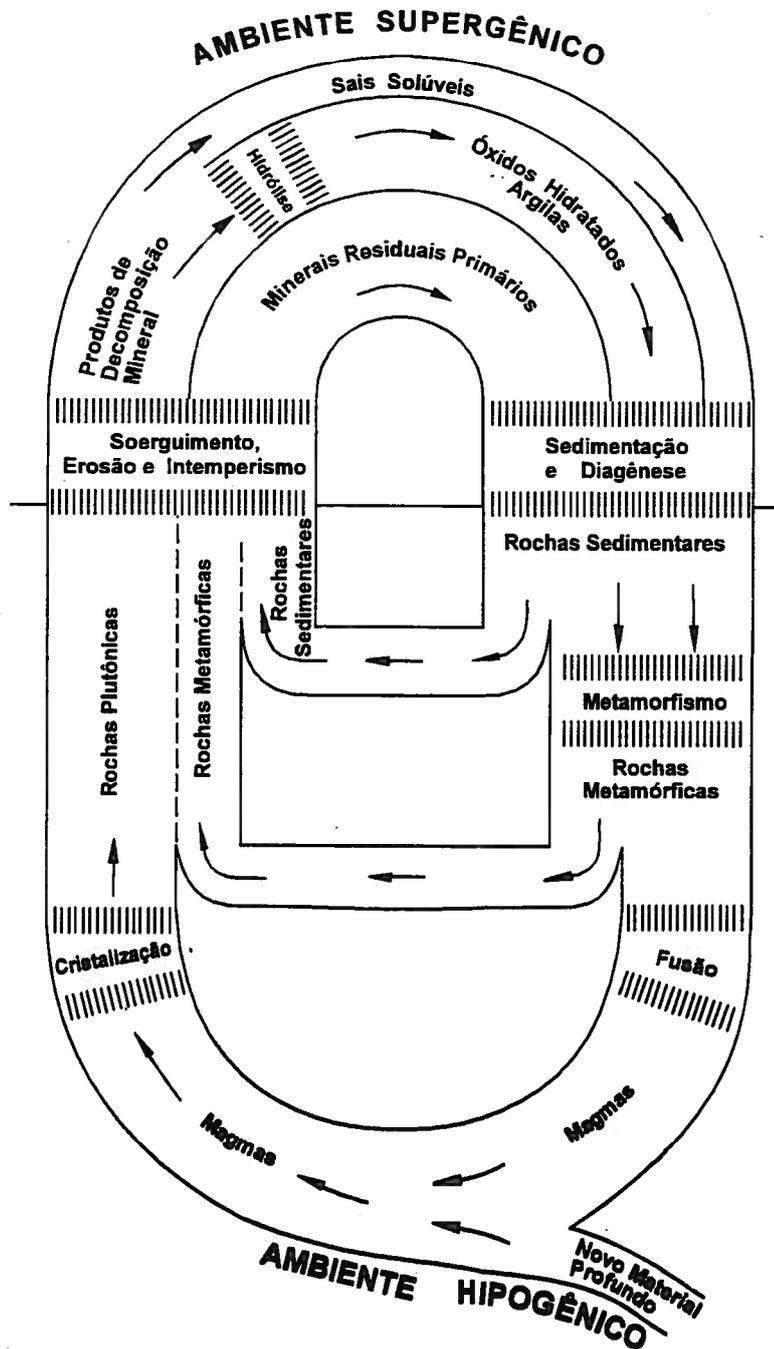


Figura 2.1 – O ciclo geoquímico. Seg. Rose, Hawkes e Webb (1979).

Segundo Rose, Hawkes e Webb (1979), a dispersão pode ser *profunda* ou *superficial*, dependendo do ambiente geoquímico em que ocorrer, e *primária* ou *secundária* se ocorrer durante a formação do depósito mineral ou em um estágio tardio. Nas proximidades dos depósitos magmáticos e da maioria dos hidrotermais, a dispersão primária está relacionada ao ambiente profundo e a dispersão secundária ao ambiente superficial.

Entretanto, é necessário que se faça uma distinção entre o ambiente (profundo *versus* superficial) e o estágio (hipogênico *versus* supergênico) de formação e dispersão da mineralização. A *dispersão primária inclui todos os processos que conduzem ao posicionamento de elementos durante a formação de um depósito mineral*, não importando o modo como o depósito tenha se formado. A *dispersão secundária aplica-se à redistribui-*

ção das feições primárias por qualquer processo posterior, geralmente no ambiente superficial. Para as mineralizações formadas por soluções hidrotermais e em profundidade, os dois termos têm significados similares. Para os depósitos sedimentares singenéticos, entretanto, as feições primárias seriam aquelas formadas durante a sedimentação (tabela 2.1) e as secundárias seriam as formadas posteriormente, caso o depósito fosse exposto ao intemperismo, ou se o depósito fosse metamorfozado após a formação. Embora a terminologia possa ser confusa, é importante distinguir entre ambiente e momento em que o processo ocorre, pois é o conjunto que determina as características da dispersão geoquímica resultante.

Na dispersão profunda, os canais e locais de migração e redeposição são as fissuras e os espaços intergranulares das rochas posicionadas em profundidade. Por outro lado, a dispersão superficial se desenvolve próximo da superfície ou nela mesma, possibilitando a formação de feições nas fissuras e juntas de rochas próximas da superfície, na cobertura inconsolidada, nas drenagens, lagos, vegetação e mesmo no ar (Rose, Hawkes e Webb, 1979).

O geoquímico de exploração procura traços dos elementos químicos que tenham se dispersado a partir de corpos mineralizados. Esses processos de dispersão normalmente dão origem a uma área-alvo, consideravelmente mais ampla que a própria mineralização. Isso facilita o processo de prospecção, já que é necessária uma densidade de amostragem (quantidade de amostras/unidade de área) muito menor para que a descoberta aconteça.

Além disso, o geoquímico de exploração se interessa pelas feições de distribuição dos elementos, em rochas não perturbadas por processos mineralizadores, porque ele deve ser capaz de distinguir essas feições normais daquelas relacionadas a corpos de minério.

2.3 Classificação geoquímica dos elementos

Segundo Krauskopf (1972), V.M. Goldschmidt, pesquisador pioneiro das regras de distribuição dos elementos químicos, sugeriu uma classificação baseada no seu comportamento geoquímico. A classificação proposta fundamentou-se tanto na teoria quanto nas experimentações que realizou com três tipos de materiais:

- Os três tipos de meteoritos Fe-Ni, troilita (FeS) e silicato, pressupondo que a composição média deles fosse semelhante à da Terra primitiva e que todos tivessem sido sujeitos à uma diferenciação similar;
- As fases metálica, escória (silicatos) e mate (sulfeto) dos processos metalúrgicos;
- As rochas silicatadas e as mineralizações sulfetadas.

Os resultados desses estudos mostraram que a distribuição dos elementos nos meios amostrados por Goldschmidt se ajustavam com boa precisão às suas hipóteses de trabalho, o que possibilitou que ele propusesse uma classificação geoquímica para os elementos:

1. *Siderófilos* – com afinidade pelo ferro e se concentrando no núcleo da Terra;
2. *Calcófilos* – com afinidade pelo enxofre e concentrados nos sulfetos;
3. *Litófilos* – com afinidade pela sílica e concentrados na crosta terrestre sob a forma de silicatos;
4. *Atmófilos* – presentes como gases na atmosfera;
5. *Biófilos* – comumente encontrados nos organismos vivos (não constava da classificação original).

Para os propósitos da prospecção geoquímica, os métodos de Goldschmidt e a classificação proposta (tabelas 2.2 e 2.3) são eficientes para explicar a distribuição dos elementos-traço e menores, em minerais e rochas ígneas principalmente para os elementos litófilos (figuras 2.2 e 2.3).

Tabela 2.1 – Exemplos de dispersão em diferentes ambientes e estágios. Seg. Rose, Hawkes e Webb (1979).

Estágio	Ambiente	
	Profundo	Superficial
Hipogênico	Difusão dos metais nas encaixantes da mineralização durante a deposição do minério	Precipitação de traços de metais no assoalho oceânico próximo de depósitos vulcanogênicos
Supergênico	Difusão de metais desde o depósito mineral submetido a metamorfismo	Intemperismo de corpo de minério sulfetado

Tabela 2.2 – Classificação geoquímica de Goldschmidt. Seg. Levinson (1974).

Siderófilos	Calcófilos	Litófilos	Atmófilos
Fe, Co, Ni Ru, Rh, Pd Os, Ir, Pt Au, Re, Mo Ge, Sn C, P (Pb, As, W)	Cu, Ag Zn, Cd, Hg Ga, In, Tl (Ge), (Sn) Pb As, Sb, Bi S, Se, Te (Fe), (Mo), (Cr)	Li, Na, K, Rb, Cs Be, Mg, Ca, Sr, Ba B, Al, Sc, Y ETR (C), Si, Ti, Zr, Hf, Th (P), V, Nb, Ta O, Cr, W, U (H), F, Cl, Br, I (Tl), (Ga), (Ge) (Fe), Mn	H, He, Ar Kr, Xe, Rn N

Tabela 2.3 – Classificação geoquímica dos elementos de Goldschmit sobre a tabela periódica de Mendeleev. Modif. Mason (1966).

1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	8A	8A	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B
H																	He
Li	Be	B	C											N	O	F	Ne
Na	Mg	Al	Si											P	S	Cl	A
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo		Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pr	Au	Hg	Tl	Pb	Bi			
		Th			U												

Legenda

- lítófilos
- atmófilos
- calcófilos
- siderófilos

Na
He
Zn
Fe

Alguns elementos lítófilos, como por exemplo o Cs e o Rb, por terem um raio iônico muito grande em relação aos elementos formadores de minerais abundantes, como o Zr^{4+} , o Ta^{5+} e o Nb^{5+} e outros por terem cargas muito altas, não participam em grandes quantidades das estruturas dos minerais formadores de rocha. Eles concentram-se nos fluidos residuais onde eventualmente vão cristalizar nos minerais, geralmente no estágio pegmatítico. Outros elementos de interesse particular em prospecção geoquímica cristalizam em veios sulfetados (por exemplo Cu, Pb, e Zn) ou na forma nativa (por exemplo, Au e Ag).

2.4 Associações dos elementos

Os elementos tendem a se associar nos processos geológicos devido às suas mobilidades relativas. Observando o conjunto de ambientes nos quais dois elementos estão associados, a razão entre eles permanece relativamente constante, de modo que os teores elevados de um são acompanhados por valores elevados do outro e vice-versa. Alguns elementos mantêm associações características em um amplo espectro de condições geológicas e podem se mover juntos durante a maioria dos processos do ambiente profundo (hipogênico), rompendo-se essa

afinidade sob as condições ambientais do ambiente superficial. Outros são característicos de rochas plutônicas muito específicas e dos minérios oxidados associados, ou de minérios sulfetados ou de certos tipos de minérios sedimentares. A presença de um membro da associação sugere a presença dos outros (tabela 2.4).

Segundo Shipulin *et al.* (1973), os complexos diferenciados de magma basáltico são os melhores portadores de um grande grupo de depósitos pós-magmáticos de elementos calcófilos e alguns siderófilos. As intrusões subcalcinas de diferenciados ácidos e granitóides são as melhores por-

tadoras de diversos tipos de depósitos de metais raros, e os magmas alcalino-ultrabásicos o são para as terras-raras, tântalo, nióbio e outros elementos raros. Segundo Formoso, M.L.L., (1995, com. pessoal) o teor de tântalo, em geral não é importante, principalmente se comparado com o de nióbio. O esquema pode se tornar mais complexo por fenômenos de enriquecimentos palingenéticos dos magmas primários, por elementos não-específicos e pela contaminação de componentes das encaixantes, água do mar e águas subterrâneas na formação do depósito mineral.

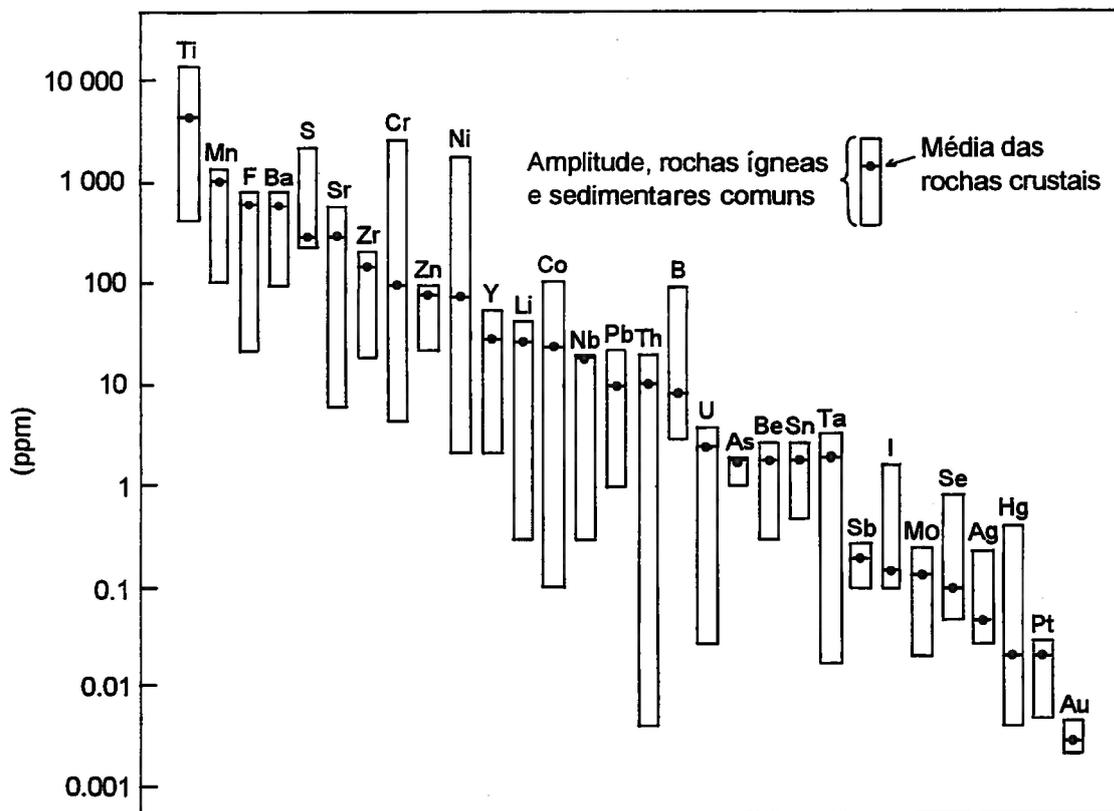


Figura 2.2 – Médias e amplitudes dos teores dos principais elementos menores em rochas normais. Seg. Rose, Hawkes e Webb (1979).

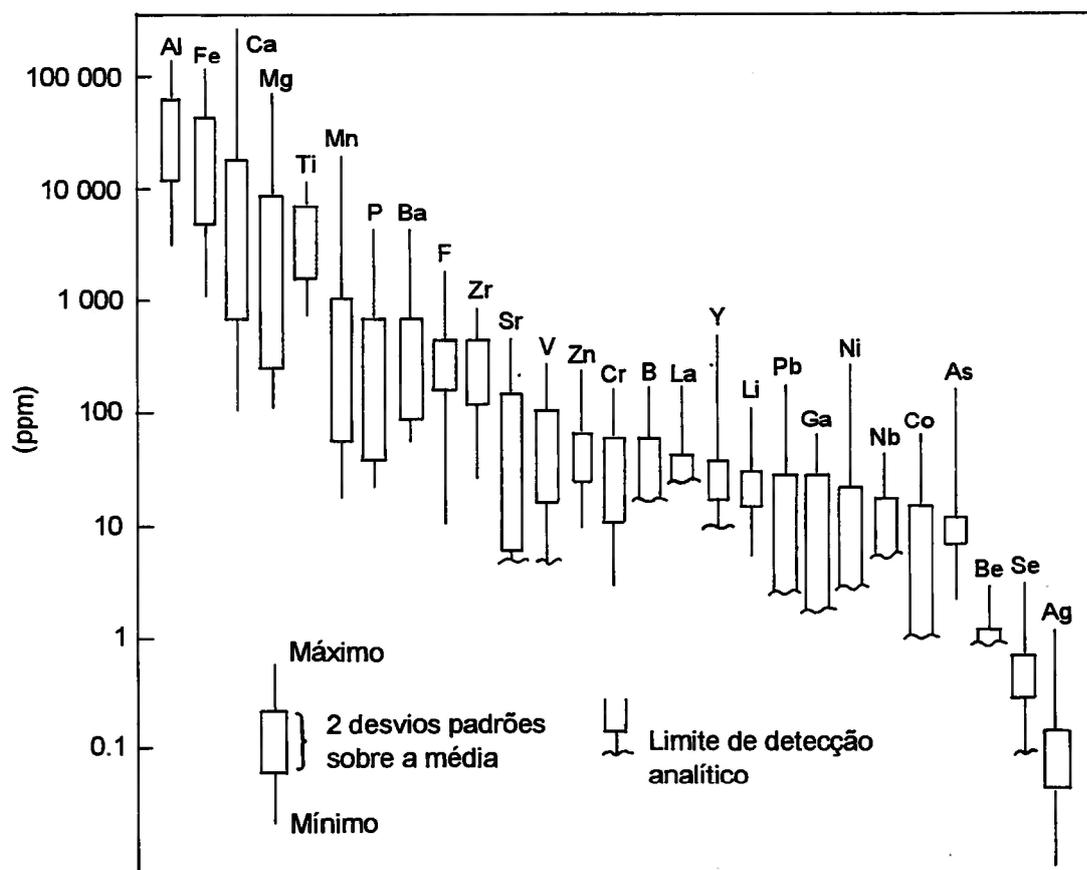


Figura 2.3 – Amplitude de variação dos elementos maiores e traço nos solos. Seg. Connor e Schacklette (1975, em Rose, Hawkes e Webb, 1979).

2.5 Províncias geoquímicas

O conceito de províncias geoquímicas foi estabelecido por A. E. Fersman, na década de 30, pelas necessidades surgidas nos trabalhos de cartografia geoquímica, da seguinte maneira: *áreas que são quimicamente homogêneas e contêm uma certa associação de elementos químicos*. Segundo Beus (1976, em Fortescue, 1992), *o conceito de província geoquímica é mais amplo e inclui os conceitos de províncias metalogénéticas e petrogenéticas. Além disso, é mais racional, pois caracteriza um relacionamento natural na distribuição dos elementos formadores de rocha, minérios e traço na crosta terrestre*.

2.6 Elementos indicadores e farejadores

Em um levantamento geoquímico, um elemento analisado com o objetivo de detectar um corpo de minério é chamado de elemento *indicador*. Na maioria das situações, o elemento indica-

dor é um componente economicamente importante (elemento maior) no minério procurado, por exemplo Cu para mineralizações cupríferas, ou U para mineralizações uraníferas. Entretanto, se um componente principal do minério apresentar dificuldades analíticas, tiver mobilidade muito reduzida ou então produzir dados de interpretação difícil, é comum que se utilizem outros elementos associados ao minério em concentrações mais baixas (elementos menores ou traço) que são denominados de *farejadores*. Elementos farejadores (*pathfinders*) úteis são aqueles com propriedades geoquímicas e analíticas mais adequadas que os elementos indicadores do minério procurado. Beus e Grigorian (1977) denominam de indicadores indiretos os elementos associados (farejadores) e de indicadores diretos aos constituintes maiores (indicadores) das mineralizações. Alguns exemplos de elementos farejadores e os tipos de jazimentos para os quais eles são indicados são apresentados na tabela 2.5.

Tabela 2.4 – Associações geoquímicas selecionadas. Modif. Rose, Hawkes e Webb (1979).

Associações Plutônicas	
Rochas ultramáficas	Cr, Co, Ni, Cu
Rochas máficas	Ti, V, Sc
Rochas alcalinas	Ti, Nb, Ta, Zr, ETR, F, P
Carbonatitos	ETR, Ti, Nb, Ta, P, F
Rochas graníticas	Ba, Li, W, Mn, Sn, Zr, Hf, U, Th, Ti
Pegmatitos	Li, Rb, Cs, Be, ETR, Nb, Ta, U, Th, Zr, Hf
Mineralizações Hidrotermais	
Depósitos de Cu-pórfiro	Cu, Mo, Re
Sulfetos complexos	Hg, As, Sb, Se, Ag, Zn, Cd, Pb
Sulfetos de baixa temperatura	Bi, Sb, As
Metais básicos	Pb, Zn, Cd, Ba
Metais preciosos	Au, Ag, Cu, Co, As
Metais preciosos (ultramáficas)	Ni, Cu, Pt, Co
Metamorfismo de Contato	
Scheelita-cassiterita	W, Sn, Mo
Fluorita-helvita	Be, F, B
Associações Sedimentares	
Folhelhos negros	U, Cu, Pb, Zn, Cd, Ag, Au, V, Mo, Ni, As
Fosforitas	U, V, Mo, Ni, Ag, Pb, F, ETR
Evaporitos	Li, Rb, Cs, Sr, Br, I, B
Lateritas	Ni, Cr, óxidos de Mn, Co, W, As, Ba, P, Nb, Ti, ETR
<i>Red beds</i> continentais	U, V, Se, As, Mo, Cu, Pb
<i>Red beds</i> vulcanogênicos	Cu, Pb, Zn, Ag, V, Se
Bauxita	Nb, Ti, Ga, Be, Zn

Tabela 2.5 – Exemplos de elementos farejadores típicos para certos tipos de mineralizações. Seg. Levinson (1974).

Elementos farejadores	Tipo de depósito
As	Au; Ag; filonianos
As	Au-Ag-Co-Cu-Zn; sulfetos complexos
B	W-Be-Zn-Mo-Cu-Pb; <i>skarn</i>
B	Sn-W-Be; veios ou <i>graisen</i>
Hg	Pb-Zn-Ag; sulfetos complexos
Mo	W-Sn; metamorfismo de contato
Se, V, Mo	U; sedimentar
Pd, Cr, Cu, Ni, Co	Platina e platinóides nas ultramáficas
Zn	Ag-Pb-Zn; sulfetos em geral
Zn, Cu	Cu-Pb-Zn; sulfetos em geral
Rn (água e gás do solo)	U; todos os tipos
SO ₄ ²⁻ (água)	sulfetos de todos os tipos

Warren e Delavault (1958) apresentaram pela primeira vez o conceito de elemento farejador da seguinte maneira: *elementos farejadores podem ser definidos como aqueles com propriedade ou propriedades particulares, que fornecem anomalias ou halos mais facilmente utilizáveis que os dos elementos procurados aos quais eles estejam associados.* Esses autores ainda apresentaram o seguinte caso concreto para exemplificar o conceito.

Na mina de Britannia, Colúmbia Britânica, a associação do cobre com quantidades variáveis de zinco era conhecida, sendo a esfalerita e a calcopirita os dois minerais principais, e o primeiro deles mais atacado pela ação das águas naturalmente ácidas. Subindo o vale de uma drenagem em direção à área da mina, o zinco foi detectado antes que o cobre. Na verdade, em muitos casos, o cobre pôde ser apenas detectado algumas dezenas de metros a jusante, enquanto o zinco, presente na mineralização em teores de um décimo dos do cobre, apareceu na água a uma distância cinco a dez vezes maior. Aproveitando este fato, a dosagem do zinco na água foi a responsável pela descoberta de algumas novas ocorrências de minerais de cobre. Nesse exemplo, é possível dizer que o zinco foi usado como elemento farejador para a mineralização de cobre.

Warren e Delavault (1958) ainda acrescentaram a aplicação do Mo como farejador de cobre pórfiro no Novo México e Colúmbia Britânica, usando anomalias de Cu e Mo nos vegetais que os continham em teores seis a oito vezes maiores que na vegetação de áreas não-mineralizadas. Como os teores de Mo eram normalmente muito mais baixos que os do Cu, os contrastes para o Mo eram também muito maiores. Com isso, a identificação das anomalias fito geoquímicas ou geobotânicas tornou-se mais clara e evidente.

O As como farejador de mineralizações do Co no distrito de Blackbird, Idaho, identificado por Lovering (1955, em Warren e Delavault, 1958) é também citado pelos mesmos autores como exemplo de uso de um elemento como o As, de menor capacidade de migração no ambiente supergênico, que o elemento maior como o Co, que se dispersa com maior facilidade.

Finalmente, Warren e Delavault (1958) citam outras possibilidades de uso de elementos farejadores como: Mn e Zn como farejadores de Au e Ag, Ga para bauxita e Cd para o Zn.

O conceito dos elementos farejadores é hoje amplamente utilizado em trabalhos de exploração geoquímica, visto que um elemento com elevada mobilidade no ambiente superficial pode detectar

de modo mais efetivo uma mineralização composta de elementos muito pouco móveis. Por exemplo, o molibdênio é mais móvel que o cobre na maioria das condições ambientais, e pode ser utilizado como farejador de depósitos de cobre pórfiro, que geralmente contêm Mo.

Em outros casos, o elemento farejador pode produzir padrões geoquímicos mais claros e menos confusos que os elementos mais abundantes na mineralização. Esse é o caso do Cu, usado como farejador de mineralizações de Ni-Cu em rochas ricas em Ni, que estejam ou não mineralizadas, sempre vão fornecer valores elevados de Ni. Um elemento farejador pode também ser mais facilmente detectado que o elemento procurado, como é o caso do As como farejador para depósitos de ouro associado à arsenopirita.

A característica essencial exigida para que um elemento seja considerado como farejador, é que tenha um relacionamento bem consistente com a mineralização.

Sob esse aspecto, deve-se observar que os elementos farejadores são normalmente utilizáveis apenas para determinados tipos de mineralizações ou ambientes geoquímicos. Por exemplo, o Mo não é um farejador para todos os tipos de depósitos cupríferos mas apenas para os de cobre nos pórfiros e o As apenas para os jazimentos auríferos à base de arsenopirita.

Alguns tipos de depósitos de cobre-níquel do tipo Noril'sk mostram altos graus de diferenciação e enriquecimentos de MgO, Ni, Co e escassez de álcalis. Os corpos mineralizados são acompanhados por anomalias de Ag, Bi, Zn e Pb, que delimitam as estruturas controladoras das mineralizações (Shipulin *et al.*, 1973). No complexo de Duluth, Minesota, as mineralizações de Cu e Ni em rochas ultramáficas são apontadas por anomalias de Pb, Be e La, que mostram íntima associação com a mineralização. Já a razão Cu/Ni mostra as modificações composicionais nos corpos mineralizados situados em profundidade (Overstreet e Marsh, 1981).

A priorização de uma anomalia também será facilitada pela presença de elementos farejadores junto dos indicadores. A esse respeito, Wilhelm e Zeegers (1984) dizem que uma anomalia de Pb ou de Zn poderá ser mais valorizada pela presença de elementos farejadores de sulfetos como As, Bi, Sb e Ag. Pelo contrário, valores de Cu relativamente altos e contrastados serão descartados se houver um aumento associado dos teores de Ni, Cr, V e Fe, o que caracterizaria um contexto de rochas básicas. Por tudo isso, antes da opção pelo uso de um ele-

mento farejador em vez de um indicador, devem ser cuidadosamente examinadas tanto sua associação com a mineralização, quanto a variedade de ambientes geoquímicos onde essa associação ocorre e de que forma isso acontece (tabela 2.6).

2.7 Halos geoquímicos

Segundo Beus e Grigorian (1977), as rochas encaixantes, formações inconsolidadas, vegetação

e águas superficiais e subterrâneas podem revelar a presença de um depósito mineral. Isso se manifesta sob a forma de teores anormalmente elevados ou baixos dos elementos químicos que compõem a mineralização ou a alteração associada e denomina-se halo geoquímico. *A origem do halo geoquímico está relacionada com os processos de formação do depósito mineral (halo geoquímico primário), ou de sua destruição supergênica (halo geoquímico secundário).*

Tabela 2.6 – Elementos indicadores e farejadores de mineralizações. Seg. Rose Hawkes e Webb (1979).

Tipo de depósito	Elementos	
	Maiores	Associados
Depósitos magmáticos		
Cromita tipo Bushweld	Cr	Ni, Fe, Mg
Magnetita estratificada tipo Bushweld	Fe	V, Ti, P
Sulfetos Cu-Ni tipo Sudbury	Cu, Ni, S	Pt, Co, As, Au
Pt-Ni-Co estratificados tipo Bushweld	Pt, Ni, Cu	Cr, Co, S
Óxidos Fe-Ti tipo Allard Lake	Fe, Ti	P
Carbonatitos a Nb-Ta (Oka)	Nb, Ta	Na, Zr, P
Pegmatitos de metais raros	Be, Li, Cs, Rb	B, U, Th, ETR
Depósitos hidrotermais		
Cobre pórfiro (Bingham)	Cu, S	Mo, Au, Ag, Re, As, Pb, Zn, K
Cobre pórfiro (Climax)	Mo, S	W, Sn, F, Cu
Skarn a magnetita (Iron Springs)	Fe	Cu, Co, S
Skarn a cobre (Yerington)	Cu, Fe, S	Au, Ag
Skarn a Pb-Zn (Hanover)	Pb, Zn, S	Cu, Co
Skarn a W-Mo-Sn (Bishop)	W, Mo, Sn	F, S, Cu, Be, Bi
Veios de metais-base	Pb, Zn, Cu, S	Ag, Au, As, Sb, Mn
Graisens a Sn-W	Sn, W	Cu, Mo, Bi, Li, Rb, Si, Cs, Re, F, B
Veio Sn-sulfeto	Sn, S	Cu, Pb, Zn, Ag, Sb
Veio Co-Ni-Ag (Cobalt)	Co, Ni, Ag, S	As, Sb, Bi, U
Metais preciosos epitermais	Au, Ag	Sb, As, Hg, Te, Se, S, U
Mercúrio	Hg, S	Sb, As
Veios uraníferos	U	Mo, Pb, F
Cobre em basalto (Lake Superior)	Cu	Ag, As, S
Sulfeto maciço de Cu vulcanogênico	Cu, S	Zn, Au
Sulfeto maciço de Cu-Zn-Pb vulcanogênico	Zn, Pb, Cu, S	Ag, Ba, Au, As
Formações ferríferas ricas em Au-As	Au, As, S	Sb
Pb-Zn tipo Mississippi Valley	Zn, Pb, S	Ba, F, Cd, Cu, Ni, Co, Hg
Fluorita tipo Mississippi Valley	F	Ba, Pb, Zn
Urânio tipo arenito	U	Se, Mo, V, Cu, Pb
Cu em <i>red beds</i>	Cu, S	Ag, Pb
Urânio em calcrete	U	V
Tipos sedimentares		
Folhelho cuprífero (Kupferschiefer)	Cu, S	Ag, Zn, Pb, Co, Ni, Cd, Hg
Arenito cuprífero	Cu, S	Ag, Co, Ni

3 AMBIENTE HIPOGÊNICO

3.1 Halos Geoquímicos primários dos depósitos minerais

Halos geoquímicos primários são zonas que circundam os depósitos minerais e que podem ser enriquecidos ou empobrecidos em vários elementos químicos. São o resultado da introdução e/ou redistribuição desses elementos durante os processos de gênese do jazimento mineral. Os depósitos ou corpos de minério são geralmente envolvidos por halos que representam tanto a introdução quanto a remoção de elementos químicos; muitos estudos demonstraram que o primeiro caso é o mais comum. Além disso, eles são geralmente mais amplos e, em consequência, têm maior significado prático, já que são constituídos de elementos tipomorfos da mineralização. Por outro lado, a remoção de elementos tanto pode ser contemporânea ao estágio de mineralização quanto ao de alteração das encaixantes, antes ou depois da fase mineralizante. Na verdade, não existe nenhum critério confiável pelo qual o relacionamento entre os corpos de minério e os halos de empobrecimento, caracterizados pela remoção de determinados elementos, possa ser usado de maneira prática. Tanto os halos geoquímicos primários quanto as zonas de alteração das rochas encaixantes dos depósitos minerais são geneticamente relacionados ao fenômeno de mineralização, sendo geralmente impossível separá-los. Por exemplo, zonas de sericitização de rochas mineralizadas podem ser consideradas como halos geoquímicos primários de potássio, e zonas de albitização podem ser consideradas como halos geoquímicos primários de sódio.

Os halos geoquímicos primários podem ser, segundo Boyle (1982), interpretados de duas maneiras (figura 3.1):

- A zonação do halo seria contemporânea ou quase, da deposição da mineralização e da

ganga, e seria devida a uma rarefação na composição dos fluidos e das soluções responsáveis pela alteração e pela mineralização, na sua migração lateral e vertical pelo conduto principal.

- Os diversos "envelopes" geoquímicos que envolvem os depósitos minerais seriam devidos aos vários pulsos ou oscilações do quimismo do fluido alterador/mineralizador, em períodos de tempo sucessivos. Desse modo, as zonas mais externas do halo seriam as mais antigas, e aquelas mais internas e mais próximas da mineralização as mais jovens e representativas dos últimos estágios dos processos mineralizadores.

Independentemente de como seja considerada a dinâmica do processo, o que é de fundamental importância para a prospecção é que a zonação dos halos geoquímicos primários é real e deve ser estudada de maneira a estabelecer critérios e fornecer informações confiáveis para investigações em áreas de condicionamentos semelhantes.

Para uma jazida *stratabound* como a de Pb-Zn-Cu-Ag de Santa Maria, RS, Brasil, a geometria subhorizontal do jazimento e dos halos geoquímicos primários hospedados numa seqüência sedimentar mergulhante pode ser explicada segundo os conceitos de especialização geoquímica de Beus e Grigorian (1977) e de redistribuição elementar de Strakhov (1967). A concentração dos metais em jazidas sedimentogênicas é fruto de uma especialização geoquímica ambiental, que se reflete numa certa zonalidade dos metais dentro do corpo de minério. Essa zonalidade está subordinada a parâmetros determinantes extremamente rígidos, tais como pH, fO_2 e, basicamente, o fornecimento e a disponibilidade dos metais em cada linha de tempo considerada. Assim, ao longo de cada linha de tempo de deposição da seqüência sedimentar, esses parâmetros físico-químicos e de disponibilidade metálica variam amplamente desde máximos até

mínimos. Isso faz com que em determinados pontos da linha de tempo ocorram condições ótimas ou de especialização máxima para a concentração metálica econômica. Assim, as concentrações de metais representam a persistência temporal da especialização geoquímica associada a uma determinada batimetria da bacia de sedimentação, e não a linha de tempo da sedimentação. A concentração econômica dos sulfetos representa a máxima especialização geoquímica ambiental. Esta é responsável pelo teor de metais, enquanto a persistência das características favoráveis no conjunto espaço-tempo se reflete no volume dos metais concentrados. As concentrações metálicas do halo geoquímico primário são o resultado da minimização das condições favoráveis (figura 3.2). Fenômenos posteriores de diagênese e migração de fluidos podem ter tornado o quadro mais complexo.

3.1.1 A zonalidade dos halos geoquímicos primários

Na estrutura dos halos geoquímicos primários existem alguns tipos específicos de zonalidade que são devidos às variações espaciais das características dos halos. A zonalidade de um halo é um conceito vetorial (figura 3.3) e, por isso, podem ser descritos vários tipos de zonalidade, dependendo da direção e sentido da observação.

A *zonalidade axial* é expressa na direção da movimentação dos fluidos mineralizadores. A *zonalidade longitudinal* é um reflexo da estrutura do halo, segundo sua elongação principal, enquanto que *zonalidade transversal* é a expressão da estrutura do halo, ortogonalmente à elongação (Beus e Grigorian, 1977). A zonalidade axial é a mais importante do ponto de vista prático e teórico e, para efeito de brevidade, será denominada simplesmente de zonalidade.

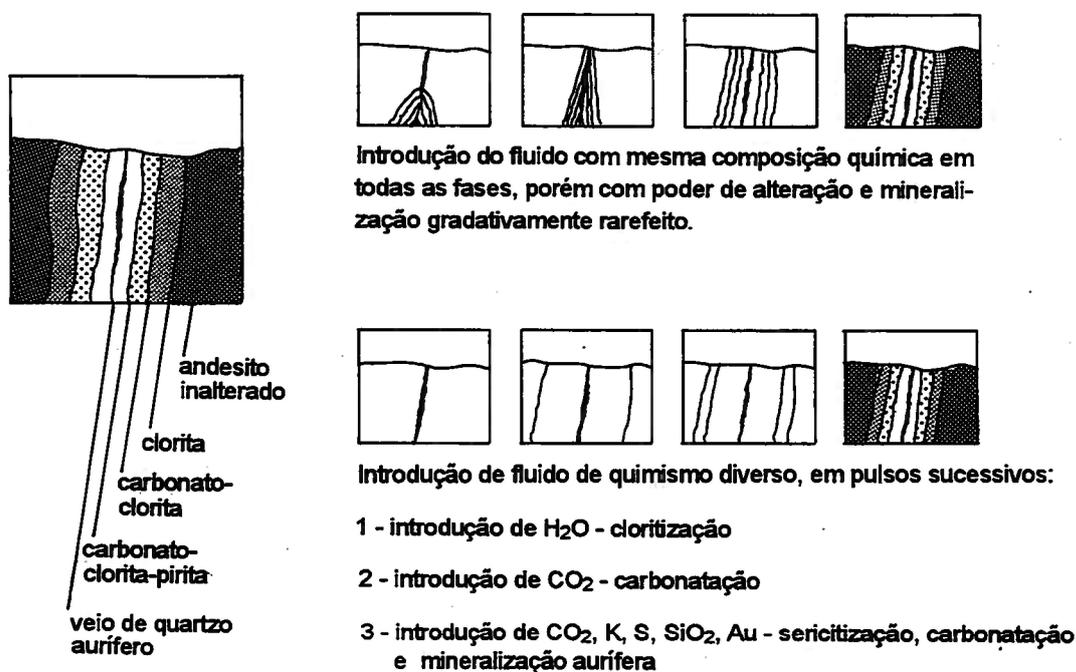


Figura 3.1 – Duas hipóteses de formação dos halos geoquímicos primários, em depósito filoniano de quartzo aurífero. Seg. Boyle (1982).

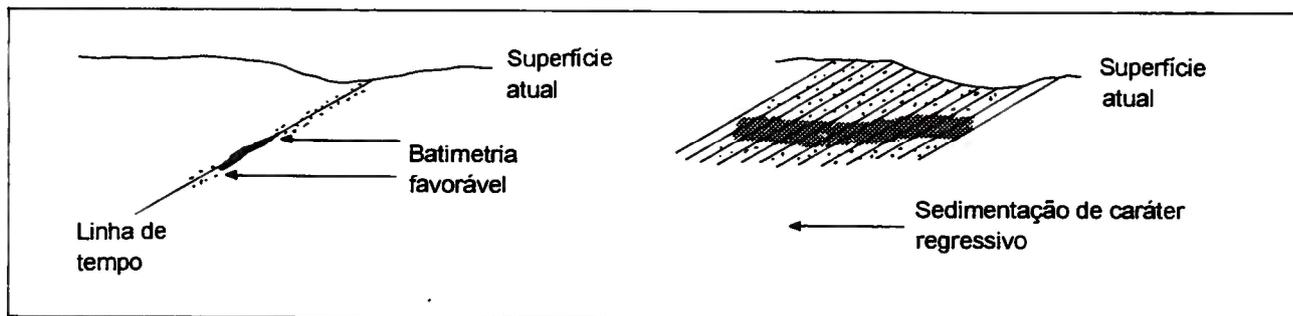


Figura 3.2 – Modelo genético da mineralização de Pb-Zn-Cu-Ag e do halo geoquímico primário na jazida Santa Maria, RS, Brasil. Seg. Licht (1982).

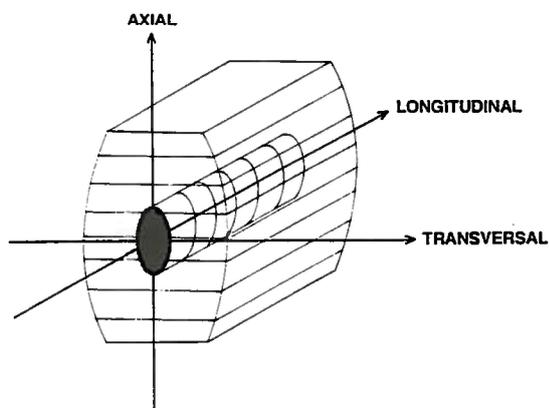


Figura 3.3 – Direção das zonalidades de um corpo mineralizado. Seg. Beus e Grigorian (1977).

O estudo da zonalidade dos halos geoquímicos (tabela 3.1) foi realizado com dados analíticos de uma grande variedade de elementos químicos, em diversas posições espaciais de um grande número de depósitos e/ou ocorrências minerais.

Esses estudos permitiram que os geoquímicos da ex-URSS estabelecessem a *seqüência universal de Grigorian-Ovchinnikov*. Os dados analíticos obtidos numa certa profundidade de um jazimento, comparados com a *seqüência universal*, permitem que sejam estabelecidas certas conclusões probabilísticas. Dentre essas, é possível concluir se a posição espacial do nível amostrado em relação ao depósito pesquisado está acima ou abaixo da mineralização principal, ou melhor, se o halo geoquímico delineado com a pesquisa é *supra* ou *inframineralização*. De posse dessa informação vetorial, estabelecida em um

dado nível de certeza estatística (tabela 3.2), existem condições de direcionar sondagens e posicionar escavações para a pesquisa dos níveis superiores ou inferiores aos já pesquisados (figura 3.4)

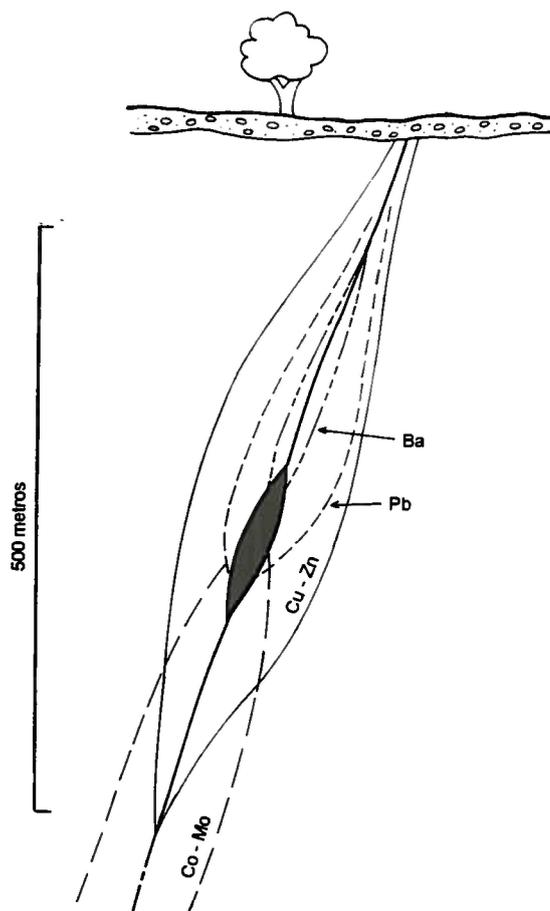


Figura 3.4 – Halos geoquímicos primários em um depósito de pirita cuprífera. Modif. Ovchinnikov e Baranov (1972, em Rose, Hawkes e Webb, 1979).

Tabela 3.1 – Zonação vertical e lateral dos halos geoquímicos primários em diferentes tipos de mineralizações.
Seg. Ovchinnikov e Grigorian (1971, em Rose, Hawkes e Webb, 1979).

Depósitos	Zonação transversal (lateral)	Zonação axial (vertical)
Pb-Zn em skarns	Ba, Zn, Pb , As, Ag, Cu, Sb	Sb, Cu, As, Ba, Ag, Pb, Zn , Cu
Pb-Zn em efusivas ácidas	Pb , Ba, Zn , Ag, Cu, As, Co	As, Ba, Ag, Pb, Zn , Cu, Co
Scheelita em skarns	W , Mo, Cu, Ba, Zn, Pb	Ba, Pb, Zn, Cu, W , Mo
Quartzo aurífero	Au , As, Bi, Ag, Pb, Sb, Cu, Be, Mo, Co, Zn	Sb, As, Ag, Pb, Zn, Cu, Bi, Mo, Au , Co, Be
Ouro-cobre	Au, Cu , Mo, Ag, As, Sb	Sb, As, Ag, Cu, Mo, Au
Cobre-bismuto	Cu, Bi , Pb, Ag, As, Ba, Zn, Co	Ba, Ag, Pb, Zn, Cu, Bi, Co
Urânio-molibdênio	U, Mo , Pb, Cu, Zn, Ag	Ag, Pb, Zn, Cu, Mo, U
Mercúrio	Hg , As, Ba, Cu, Pb, Zn, Ni, Ag, Co	Ba, Hg(?) , Sb, As, Ag, Pb, Zn, Cu, Ni, Co
Cassiterita-sulfeto	Ag, Zn, Pb, Sn , Cu, Mo	Ag, Pb, Zn, Cu, Mo, Sn
Pb-Zn estratiforme	Ag, Pb , Cu, As, Ba, Co, Zn , Ni	As, Ba, Ag, Cu, Pb, Zn , Co

Observações: os elementos são apresentados em ordem decrescente da largura de seus halos em perfil. Por exemplo, para os depósitos de Pb-Zn em skarns, o Sb tem o halo mais estreito, enquanto o Ba tem o mais amplo. Os indicadores de supramineralização gradam da esquerda para a direita para os indicadores de inframineralização. Estão representados em negrito os elementos maiores e com significado econômico na mineralização.

Tabela 3.2 – Seqüência universal de zonalidade de Grigorian e Ovchinnikov. Os números indicam a probabilidade de ocorrência de cada elemento na posição correspondente na seqüência. Aqueles elementos cuja posição na seqüência de zonalidade não pôde ser indicada com certeza são apresentados entre parênteses. Seg. Beus e Grigorian (1977).

Ba	(Sb	As	Hg)	Cd	Ag	Pb	Zn	As	Cu	Bi	Ni	Co	Mo	U	Sn	Be	W
93	100	87	100		80	84	87	84	86	72	50	55	48	100	66	60	72

4 O AMBIENTE SUPERGÊNICO

4.1 Halos geoquímicos secundários

Os halos geoquímicos secundários estão relacionados à destruição de um depósito mineral sob condições supérgenas, formando zonas que o circundam e que são enriquecidas ou empobrecidas em vários elementos químicos.

As características dos modelos de dispersão secundária são consequência da atuação de uma série de processos dinâmicos. Esses processos e a ampla gama de ambientes nos quais eles agem são extremamente complexos e as feições do material redistribuído também mostram diversidades de origem, modo de ocorrência de seus constituintes e forma física.

4.1.1 Modelos de dispersão superficial

Os modelos de dispersão superficial podem ser classificados de acordo com: (1) tempo de formação em relação à matriz e (2) modo de formação. Esse sistema de classificação, apresentado por Rose, Hawkes e Webb (1979), é adotado porque a correta identificação do tempo e modo de formação do modelo geoquímico fornece uma base segura para sua interpretação em termos prospectivos. Baseado nisso, as *feições introduzidas e depositadas ao mesmo tempo que a matriz* são classificadas como *singenéticas*, enquanto que *aquelas introduzidas na matriz após a sua formação* são chamadas de *epigenéticas*. Entende-se como matriz o material que dá o suporte físico à anomalia, como solo, rocha, água ou vegetal. As feições podem ser também classificadas como:

- (1) *clásticas*, quando a dispersão é feita basicamente por partículas sólidas em movimento;
- (2) *hidromórficas*, quando o agente dinâmico são soluções aquosas com carga iônica;
- (3) *biogênicas*, quando a movimentação é o resultado da atividade biológica.

4.1.1a Modelos singenéticos

Os modelos singenéticos podem ser clásticos, hidromórficos ou biogênicos. Na grande maioria dos casos, esses modelos são relativamente simples de interpretar, desde que a história da matriz forneça uma ligação direta entre a feição do material disperso e sua fonte primária.

Modelos singenéticos clásticos – O solo residual, o colúvio e os sedimentos aluvionares são os suportes comuns para todos os modelos singenéticos clásticos (figura 4.1). No solo residual, reflete-se a distribuição dos elementos na rocha subjacente.

As feições de distribuição dos elementos pouco móveis são mais fielmente preservadas que as dos elementos móveis, já que estão submetidos à lixiviação e à redistribuição no resíduo do intemperismo. Os modelos singenéticos no colúvio também apontam para sua fonte na rocha-matriz, muito embora a interpretação possa ser um pouco mais complicada, devido à ocorrência de fortes movimentações dessas coberturas.

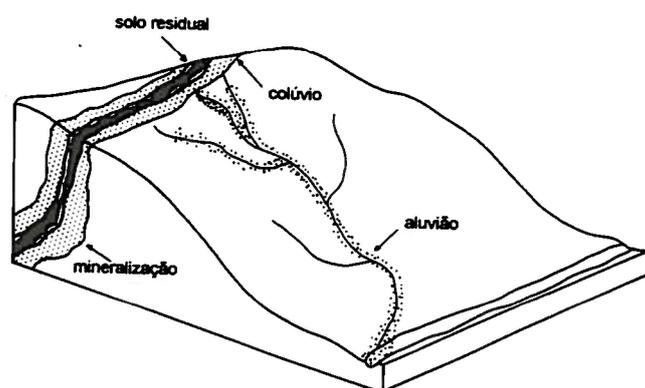


Figura 4.1 – Modelos de anomalias singenéticas clásticas.

Os modelos clásticos nos sedimentos das drenagens são o resultado da erosão e do transporte aluvial de coberturas de solo, ricas em metais. A relação entre as anomalias e a fonte primária pode, entretanto, ser complicada por toda a história da dispersão prévia do metal na cobertura. Se a anomalia no sedimento for derivada da erosão direta de uma anomalia de solo residual, a fonte primária do metal deverá estar nas vizinhanças imediatas da anomalia de solo. No entanto, se a anomalia do sedimento for produzida pela erosão de uma anomalia de surgência (*seepage*) no solo, a fonte primária deverá ser procurada vertente acima do afloramento do lençol freático.

Modelos singenéticos hidromórficos – A carga em solução das águas subterrâneas e superficiais produz um outro tipo de feição de anomalia singenética, só que a matriz é a própria água em vez de solo ou outro tipo de material sólido (figura 4.2). Do mesmo modo que nas anomalias singenéticas no solo, a posição espacial da fonte primária dos elementos anômalos vai orientar e definir a posição, forma e intensidade da feição aquosa rica em metais.

Os depósitos evaporíticos e precipitados químicos maciços poderiam ser bem enquadrados nos modelos singenéticos de origem hidromórfica, onde os precipitados não são maciços, mas disseminados nos interstícios da matriz clástica. O modelo poderia ser considerado como epigenético. Um exemplo importante de modelos singenéticos desse tipo seriam aqueles formados contemporaneamente aos depósitos sedimentares químicos de Fe e Mn (Rose, Hawkes e Webb, 1979).

Modelos singenéticos biogênicos – Uma concentração anômala de metais disponíveis no solo se refletirá como uma anomalia desses metais nos seres vivos, vegetais ou animais, que ali habitam (figura 4.3). As anomalias fitogeoquímicas são singenéticas, já que são formadas contemporaneamente com o crescimento dos vegetais. De modo similar, a dispersão geoquímica dos elementos contidos nos detritos vegetais, que seja derivada somente da acumulação de plantas parcialmente decompostas, é considerada como singenética. Os modelos biogênicos de origem singenética refletem a composição das litologias ou coberturas locais e também a composição das águas e soluções circulantes no solo.

4.1.1b Modelos epigenéticos

Os modelos epigenéticos (superpostos à matriz) são necessariamente o resultado de processos hidromórficos ou biogênicos. Por essa razão, são melhor definidos por elementos móveis como Zn e Cu, que podem ser facilmente dissolvidos e precipitados sob pequenas alterações muito localizadas das condições ambientais.

Modelos epigenéticos hidromórficos – A passagem de soluções aquosas naturais por uma matriz qualquer, sempre deixa uma marca composta de algum tipo de precipitado químico. As feições de dispersão epigenética resultantes são superpostas nas feições originalmente presentes na matriz, seja rocha ou solo residual ou transportado. Anomalias hidromórficas desse tipo são, em geral, bem desenvolvidas, especialmente onde o ambiente local seja favorável à precipitação (figura 4.4).

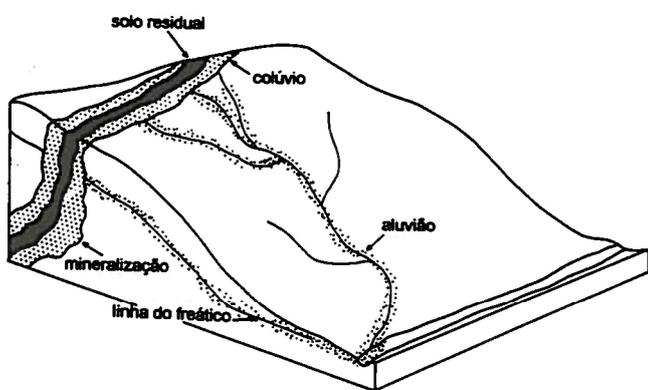


Figura 4.2 – Modelos de anomalias singenéticas hidromórficas

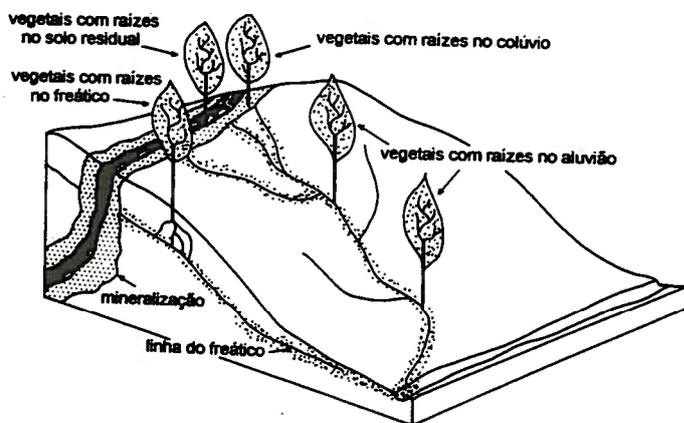


Figura 4.3 - Modelos de anomalias singenéticas biogênicas

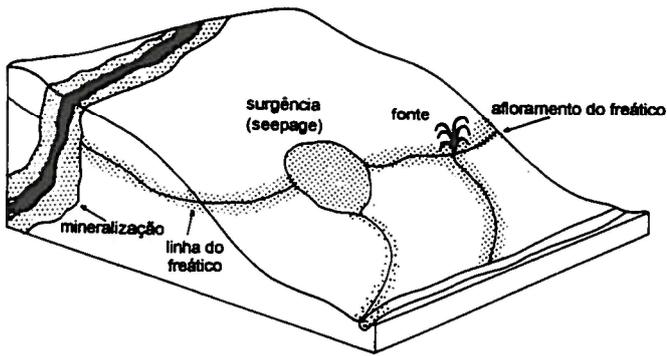


Figura 4.4 – Modelos de anomalias epigenéticas hidromórficas.

Essas condições são comuns em fontes, em áreas de surgência (*seepages*) ou em pântanos, onde haja abundância de matéria orgânica em decomposição. A fonte das anomalias hidromórficas está sempre localizada a montante ou em profundidade, dependendo do trajeto seguido pelas águas mineralizadas.

Modelos epigenéticos biogênicos – Quando um ser vivo (vegetal ou animal), cujos tecidos servem de matriz para uma anomalia biogeoquímica morre, deposita-se no solo e é decomposto, a maior parte do seu conteúdo mineral será lixiviado. Uma certa fração dessa matéria mineral, liberada pela decomposição, pode vir a ser retida

no solo, onde pode constituir uma anomalia epigenética de origem biológica (figura 4.5). Esse tipo de modelo é especialmente desenvolvido a partir de vegetais, pela sua presença abundante; no caso dos animais, isso é simples curiosidade científica. Feições biogênicas desse tipo podem se desenvolver tanto nas coberturas residuais quanto nas transportadas. Seu relacionamento com a fonte litológica é o mesmo que daquelas feições singenéticas de vegetação, das quais são derivadas.

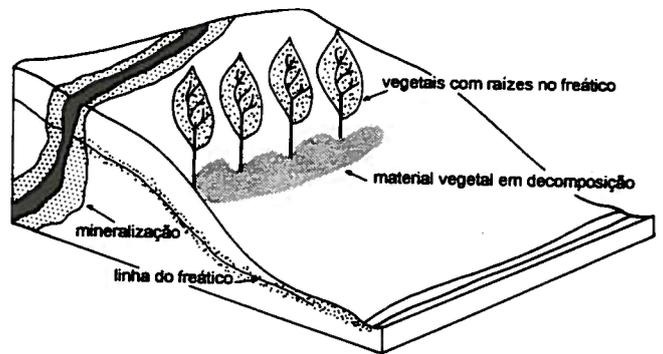


Figura 4.5 – Modelos de anomalias epigenéticas biogênicas.