INCERTEZA E COMBINAÇÃO DE EVIDÊNCIAS: A QUESTÃO DOS DIAMANTES DO RIO TIBAGI-PR (BRASIL)

PAULO C. SOARES & LEILA C. PERDONCINI

RESUMO Como uma ciência da natureza, a geologia é impregnada de incertezas. Isto está presente nas observações, conceitos e relações geológicas, definindo três tipos de incertezas no raciocínio geológico: i) observacional, associada à evidência E, ii) conceitual, associada ao conceito (P) proposto e iii) relacional, associada à aplicabilidade do conceito à evidência (dado A, então P). A metodologia apropriada para avaliar a confiabilidade na conclusão é discutida e exemplificada com o caso da fonte de diamantes no vale do rio Tibagi, Bacia do Paraná, Brasil. O método usa evidências qualitativas e atribui valores de probabilidade básica, como escores para cada comprometimento da proposição com a evidência usada, tal como na função *belief*. Vinte e duas evidências geológicas são consideradas na avaliação de duas hipóteses alternativas: i) da fonte dos diamantes nos conglomerados basais do Grupo Itararé (Pensilvaniano); ii) da fonte em rochas kimberlíticas-lamproíticas. O comprometimento da evidência como confirmação ou negação de cada proposição é complementada pela ambiguidade. A combinação das várias evidências consideradas utilizou a regra de combinação de evidências independentes de Dempster-Schafer. O resultado aponta para uma confiabilidade (Belief) de 0,73 com uma ambiguidade de 0,25 para a hipótese da fonte no Grupo Itararé, comparada a confiabilidade de 0,06 e ambiguidade de 0,86 para a hipótese de fonte em rochas kimberlíticas-lamproíticas.

Palavras-chaves: raciocínio probabilístico, Bacia do Paraná, diamantes, incerteza, combinação de evidências.

ABSTRACT *UNCERTAINTIES AND COMBINATION OF EVIDENCES: THE QUESTION OF DIAMOND OF THE TIBAGI RIVER, PR, BRAZIL* As a science of nature, geology is impregnated of uncertainty, always present in the geological observations, concepts and relationships. Three kinds of uncertainty affect geological reasoning: (1) observational, associated with evidence E; (2) conceptual, associated with the proposed concept (P), and (3) relational, associated with the applicability of concept to evidence (if E, then P). The methodology appropriated to evaluate the confidence in the conclusion is discussed and exemplified with the case of the source of diamonds in the Tibagi valley, Paraná basin, Brazil. The method uses qualitative evidence and attributes basic probability as scores for each commitment of proposition with evidence, like belief function. Twenty two geological evidences are considered in the evaluation of the two hypothesis considered: first, a source in Pennsylvanian Itararé Group, basal conglomerates; second, of a source in kimberlite-lamproite rocks. The commitment of evidence as confirmation or denying for each proposition, is complemented by ambiguity. The combination of the many evidences considered was done using the rule of combination of independent evidence of Dempster-Schafer. The results points out for a confidence (belief) of 0.73 with ambiguity of 0.25, for the Itararé source hypothesis, against a confidence of 0.06 and ambiguity of 0.86 for the kimberlite-lamproite hypothesis.

Keywords: probabilistic reasoning, Paraná Basin, diamonds, uncertainty, evidence combination.

INTRODUÇÃO Em geologia, como uma ciência da natureza, do real, não de construções abstratas, tanto a descrição de fatos observacionais (p. ex. a observação de uma propriedade descritiva) ou dados (p. ex. uma determinação analítica), como os conceitos (p. ex. falha, granito, calcita) são imprecisos e incompletos. Os conceitos são entidades cuja definição não delimita precisamente seu campo de aplicação, daí a famosa expressão "existem granitos e granitos". Adicionalmente os argumentos para discriminar ou diagnosticar uma proposição ou outra não são inequívocos ou não-ambíguos (*unambiguos*).

Em razão desta imprecisão, incompletude e ambiguidade devemos abrir espaço em nossas estruturas de raciocínio para considerá-las. Devemos considerar no raciocínio espaços para três tipos de incertezas: i) associada à evidência; ii) associada à proposição; iii) associada à relação entre evidência (S) e proposição (P) (Fig. 1). Uma coluna representa a imprecisão no estabelecimento da evidência e uma linha para a imprecisão no estabelecimento da proposição. As caixas internas representam a incerteza na relação entre a evidência E (ou conjunto S de evidências) e a proposição P.

Consideremos que S contém uma evidência E de que P é verdade. Por exemplo, na cava de um conglomerado observamos o aparecimento de diamantes lavados na bateia. Como fato temos um diamante em um horizonte litológico do Grupo Itararé (Carbonífero Superior da Bacia do Paraná). Isto seria uma evidência factual (E) de proveniência do diamante aluvionar a partir do Itararé (proposição P).

Sobre a evidência poderíamos revelar a dúvida, admitindo que é apenas um "chibiu" e que poderia ter havido contaminação, pois logo ao lado ocorre aluvião diamantífero. Trata-se de uma incerteza observacional (O) ou experimental. Atribuímos, então, uma confiança C em nossa discriminação do diamante no conglomerado, uma imprecisão I nesta nossa observação factual, e admitimos uma possibilidade N de que esta ocorrência não exista. Poderia ser argumentado que esta incerteza não deve existir, que é devida à forma pouco criteriosa da observação. Entretanto, a prática mostra que existe, pois nossa observação é muito influenciada pela experiência ou pelo que conhecemos (Soares, em prep.).

Outra incerteza é conceitual (D), a qual está associada com a proposição; o conceito Grupo Itararé tem um conteúdo estabelecido pela definição, feita com maior ou menor clareza, com certo campo de aplicação e com certa identidade descritiva ou genética. Estas três propriedades que caracterizam a definição revelam as imprecisões associadas. Por exemplo, "um conglomerado na faixa de ocorrência de diamictitos, arenitos e ritmitos do Grupo Itararé" é uma boa definição descritiva de conglomerado do Itararé. Contudo, admitimos

		Imprecisão na evidência		
		Sc=S	Sa=S,-S	Sn=-S
Imprecisão conceitual	Pc=P	R	R	R
	Pa=P,-P	R	R	R
	Pn=-P	R	R	R

Figura 1 - Diagrama de estrutura de raciocínio considerando as incertezas experimentais ou observacionais em S, e as incertezas conceituais em P. Podem ser avaliados relativamente às expectativas (R) quanto à implicação (incerteza relacional) dos três domínios de S nos três domínios de P.

que ocorrem "monchões" ou vales incisos, preenchidos por conglomerados, dentro da faixa de ocorrência do Grupo Itararé, mas que são depósitos cenozóicos. Como vemos, afirmações que aparentemente são factuais, irrefutáveis, vão perdendo a identidade descritiva, tornando difuso o campo de aplicação e obscurecendo a clareza. Admitimos, pois, uma possibilidade de que o conglomerado não seja Itararé, de tal forma que ao mesmo tempo uma realidade pode ser admitida como sendo ou como não sendo Itararé: $P = (V, -V)$, ou $V = (P, -P)$ e inferimos a possibilidade de estar incerta a definição adotada para o Grupo Itararé.

Define-se outra fonte de incerteza: a incerteza relacional, aquela associada à validação da relação entre um estado da evidência e um estado da proposição; e implica na avaliação de:

- (1) a validade, ou confiabilidade (C), nas premissas maiores, representadas pelos argumentos de que a evidência observada S implica que P seja verdade (S confirma P), ou que P seja incerto (S implica P ou -P) ou que P seja falso (S implica em -P).
- (2) a negação (N) na premissas maiores representadas pelos argumentos de que se S é falso, então P é verdadeiro (-S implica em P), ou P pode ser falso ou verdadeiro (-S implica em (P,-P)) ou ainda P é falso (-S implica em -P).

- (3) o complemento de C+N, a ambiguidade (A) nas premissas maiores representadas pelos argumentos de que tanto existindo ou não a evidência, a proposição é verdadeira (S,-S, implica em P), sendo neste caso P independente de S, ou a proposição é indefinida ((S,-S) implica em (P,-P)) ou ainda a proposição é falsa ((S,-S) implica em -P).

A representação no diagrama da estrutura do raciocínio fica constituído de 9 premissas maiores ou regras (Fig.2), para as quais podemos avaliar a confiabilidade na afirmação (C), na negação (N) e na ambiguidade (A).

Neste trabalho consideramos apenas a evidência positiva (S=E) sem admitir as possibilidades de -S ser presente. Da mesma forma em relação à proposição, vamos admitir apenas que P é positivo, sem aceitar a possibilidade de que a concepção de Itararé seja equivocada. Assim sendo, podemos representar de forma mais simples o raciocínio probabilístico desenvolvido com o diagrama da figura 3.

Admitimos que podemos considerar que as diversas implicações das evidências são apenas esperadas, ou seja, são prováveis. Pode-se então tentar atribuir um valor de probabilidade para cada implicação, de tal forma que se associe no final uma probabilidade à conclusão. Esta associação de expectativa, ou esperança, ou probabilidade a cada implicação, nos leva a um raciocínio probabilístico.

Ainda, como raciocinamos com várias evidências simultaneamente, devemos ao final considerar como combinar o poder indicador das diversas evidências.

Os diversos fatos levantados e relatados em Perdoncini (1997) e Perdoncini & Soares (1999), relativos à ocorrência de diamantes no Estado do Paraná, indicam uma origem secundária para a mineralização. Entretanto, estes fatos não constituem isoladamente evidências conclusivas. Aquele fato que poderia ser uma evidência comprobatória, a existência de rochas sedimentares com diamantes, não foi documentado nem pelos ensaios realizados nem pelo testemunho inequívoco dos garimpeiros.

Apesar dos poucos dados sugestivos de uma origem primária, esta proposição foi defendida e mesmo utilizada nos modelos exploratórios na região, nos quais já foram despendidos volumes significativos de recursos financeiros. Isto revela como, em muitos casos, uma decisão prática tem que ser tomada com base em relações de incertezas. A meta certamente foi tomar a decisão que resultasse em menor probabilidade de perdas, a partir de um diagnóstico com maior probabilidade de estar correto. Contudo, situações como esta não constituem situações de rotina, não se dispondo de uma distribuição de frequência de situações similares, para se fazer uma abordagem probabilística, tomando a decisão com maior probabilidade de sucesso: a situação real é única.

Neste trabalho propõe-se realizar uma análise do poder dos fatos como evidências e da combinação do poder destas evidências como indicadores da veracidade de uma ou de outra proposição. Desta forma a decisão exploratória poderá ser tomada em cima desta ou daquela informação ou conclusão que apresente maior chance de representar a verdade.

Nesta análise devem ser considerados dois momentos: 1º) definir o poder de cada evidência E_i como indicadora da veracidade da proposição P e da sua negação -P; 2º) estabelecer as combinações possíveis das diferentes evidências.

O PODER DAS EVIDÊNCIAS A definição do poder de cada evidência é feita com base em relações de necessidade e suficiência, como premissa para que a proposição seja verdadeira dada a ausência da evidência ou dada a sua presença. Os procedimentos lógicos de

raciocínio são a forma mais inteligível de estabelecer estas relações entre premissas e conclusão. Mas as premissas geológicas não são inequívocas e por isto as condições de necessidade e suficiência não são sim ou não, **um** ou **zero**, mas algum valor entre zero e um, e com um nível variado de contradição quando se consideram diferentes evidências. Os procedimentos estatísticos certamente são as melhores formas de quantificar estas relações entre evidência e proposição, ou entre premissa e conclusão. Entretanto, mesmo num caso real único, valores numéricos de necessidade e suficiência, podem representar a incerteza referente às relações evidência/proposição obtidas a partir de uma análise cuidadosa dos muitos outros casos em que existe esta relação evidência/proposição fora o caso particular em avaliação.

Diversas técnicas estatísticas podem ser utilizadas para definir o poder da evidência a favor da proposição, como a teoria da probabilidade condicional (teorema de Bayes) ou teoria da correlação (coeficientes de correlação, análise característica, etc.) (Rostirolla et al., 1998). A utilização destes recursos estatísticos depende de um conjunto de dados relativos à ocorrência associada ou não entre a evidência e a proposição, num determinado domínio geológico espacial e conceitual.

Cinco relações básicas podem ser estabelecidas entre a evidência e a proposição, conforme pode ser visto nos diagramas da figura 4.

1ª) Dada a evidência E, a proposição P é verdadeira; corresponde ao sub-espaço de probabilidade $r|$

$T) = e$ e interseção n .

No exemplo, a probabilidade de P ser verdadeira no espaço P, dada a existência de E, é:

$$p(PIE) = 0,06/0,4 = 0,15$$

Entretanto, se a proposição fosse independente da evidência, o sub-espaço probabilístico da ocorrência dos dois eventos (P e E independentes) seria:

$$p(PIE)^* = 0,1 \times 0,4 = 0,04 \text{ (probabilidade esperada)}$$

Como a frequência de eventos de ocorrência conjunta de E e P é muito maior que a esperada, pode-se admitir uma elevada dependência entre um e outro. Diversos parâmetros podem medir esta dependência, constituindo uma medida do poder da evidência E em indicar a validade de P.

2ª) Dado E, P é falso; corresponde ao sub-espaço $(e - T| - y)$

A probabilidade de P ser falso dada a presença da evidência E é:

$$p(-PIE) = (e - T| - y) / e$$

$$\text{No exemplo, } p(-PIE) = (0,4 - 0,06 - 0,01) / 0,4 = 0,8$$

3ª) Dada a inexistência de E (domínio $(1 - e = 0,6)$), P é verdadeiro; a probabilidade de P ser verdadeiro dada a ausência de E é:

$$p(PI-E) = (7i - r) / (1 - e)$$

No caso $p(PI-E) = 0,04/0,6 = 0,07$, é muito baixa

4ª) Dada a inexistência de E, P é falso; Constitui a interseção dos conjuntos $(1 - E)$ e $(1 - n - a)$.

A probabilidade de P ser falso dada a ausência de E é:

$$p(-PI-E) = (1 - e - (T| - r) - a) / (1 - e) = 0,53/0,60 = 0,9$$

5ª) Dada a existência de E, P pode ser falso ou verdadeiro, representado um domínio onde é ambígua a informação sobre a realização de P.

A probabilidade de P ser falso ou ser verdadeiro, dada a existência de E é:

$$p((P,-P)IE) = 1$$

no exemplo é = 0,03.

	S	S, -S	-S
P	C	C	C
-P,P	C	C	C
-P	C	C	C

	S	S, -S	-S
P	N	N	N
-P,P	N	N	N
-P	N	N	N

	S	S, -S	-S
P	A	A	A
-P,P	A	A	A
-P	A	A	A

Figura 2 - Avaliação independente da confiabilidade da premissa "Se existe S, então P é verdade", n confiabilidade na premissa negativa "se existe S, então P é falso" e na ambiguidade: "se existe S, então P pode ser tanto falso como verdadeiro".

Esta formulação aceita o fato de que a adição das probabilidades de P ser falso e de P ser verdadeiro é menor que 1, no caso 0,97.

A primeira formulação constitui uma medida primitiva do poder da evidência, ou da suficiência do argumento E para validar a proposição P, ou ainda, da confiança no atributo E como indicador do objeto P. A segunda constitui a medida do poder da evidência E como indicadora da negação ou falsidade de P, ou do poder do argumento E para falsear a proposição P. A terceira é uma medida do poder da ausência da evidência E. A quarta é uma medida do poder da ausência da evidência como condicionadora da negação da proposição P, ou seja a uma medida da necessidade da evidência como condição para a realização da proposição P; se esta evidência não existe, a proposição não se verifica. A quinta é uma medida da ambiguidade da evidência E como indicadora da proposição P.

Nessas formulações consideram-se inter-relacionadas as medidas de suficiência, ou confirmação da proposição (medida pelo parâmetro designado c), a negação da proposição {n} e da ambiguidade da evidência (a) na validação da proposição. É fácil demonstrar que:

$$c + n + a = 1$$

Atribuição de probabilidade básica Neste trabalho não se dispõe de um banco de informações com significado estatístico, no domínio geológico da área trabalhada, a partir do qual se pudesse inferir as diferentes probabilidades para as diversas evidências. Entretanto, considerando cada evidência e sua relação observacional lógica ou genética com a proposição, num domínio conceitual, baseado em informações já consolidadas na literatura, torna-se possível atribuir valores para o poder da evidência como confiança na relação entre a evidência e a proposição. Este valor numérico alocado à incerteza é relativo a uma situação particular e é obtido por uma análise cuidadosa da situação, das semelhanças e diferenças existentes entre diferentes casos, e não com base em uma análise de distribuição de frequência (Neapolitan 1990). Neste tipo de análise é importante a criatividade científica, a intuição e a experiência.

Este procedimento de avaliação do poder da evidência, justificando o valor atribuído, foi chamado de "atribuição de probabilidade básica"

(basic probability assignment, bpa; Shafer, 1976 *apud* Neapolitan, 1990).

É este o procedimento que será utilizado aqui, para cada informação levantada, considerada como indicadora positiva ou negativa de uma ou outra proposição. Foi feita uma atribuição de valores para a confirmação e para a negação, designados MC e MD, respectivamente. O complemento de MC+MD para a unidade resulta na ambiguidade ($MA=1-(MC+MD)$) da evidência (Fig. 5).

Os valores de MC e MD são escores que determinam a força ou o grau de confiança com que as evidências sustentam as hipóteses, utilizando, relações observacionais e genéticas, verificadas ou deduzidas. Os seguintes tipos de afirmações qualitativas foram convertidas quantitativamente em faixas de valores para a atribuição de bpa:

- não há relação entre a proposição e a evidência; 0,05
- a evidência apresenta alguma relação de implicação com a proposição; 0,25
- possivelmente existe uma relação entre a evidência e a proposição; 0,50
- provavelmente existe relação entre a evidência e a proposição; 0,75
- certamente a evidência implica na proposição; 0,95.

Os valores máximo e mínimo (0,95 e 0,05) foram adotados admitindo-se a possibilidade de existência de pequenas porcentagens de erro nas afirmativas.

Esta avaliação foi utilizada, tendo com base as relações encontradas na literatura sobre a informação como evidência da proposição. Desta forma estabeleceu-se o peso da evidência como crença ou confirmação e como negação para ambas proposições: i) os diamantes provêm do Grupo Itararé (Tab. 1) e ii) os diamantes provêm diretamente de kimberlitos ou rochas afins (Tab. 2)

A principal evidência a favor de fonte primária para as mineralizações de diamantes no Estado do Paraná é a distribuição da mineralização na região do Arco de Ponta Grossa, por isso atribui-se uma alta probabilidade básica de estar certa a proposição ($MC=0,75$), pois kimberlitos tendem a ocorrer em jêgões de arcos associados a grandes bacias, tal como observa-se na África, na Sibéria e no Brasil (Biondi 1982). A frequente relação da ocorrência de diamantes com os diques de diabásio distribuídos ao longo do arco reforça esta hipótese ($MC=0,75$). Entretanto, a profundidade de geração desses diques é bem menor (50km) do que a dos kimberlitos (>50km) ($MD=0,25$) e esta relação pode ser resultado de um processo atual de armadilhamento dos minerais e frações pesadas pela quebra de energia dos rios quando cortam os diques.

0,3
0,7
ambiguidade.a

Figura 3 - Representação do domínio as incertezas a ser abordado neste trabalho; c, a, e n são respectivamente as medidas da associação entre S (a evidência) e P, entre S e P ou não P indiferentemente, e entre S e não P.

■ P existe (10%)

P existe ou não existe (3%)

E existe (40%)

sub-espço n onde P é verdadeiro ~~~~~

sub espaço T| onde P e E são verdadeiros

$$(3=1; T|=0,06; a=0,03) \\ e=0,4 : \pi=0,1$$

Figura 5 - Quadro esquemático da relação entre ambiguidade e confirmação/negação.

sub-espço e onde E é verdadeira

sub-espço y onde E existe e P é ambíguo

sub-espço a onde P é ambíguo

Figura 4 - Representação no espaço geológico (A, formato raster) e no espaço probabilístico (B, diagrama de Venn) das relações entre evidência e proposição. A maior ou menor superposição entre os sub-espços de probabilidade indica a relação de dependência entre a proposição e a evidência. Considera-se como exemplo observacional que $e=0,4$.

•••••

Tabela 1 - Hipótese de fonte secundária: o poder das evidências. Evidências que sustentam a hipótese da mineralização de diamante derivar das rochas do Grupo Itararé; medidas de crença/descrença (MC/MD):

Evidências	Medida de crença MC=	Medida de descrença MD=
1 Predominância de diamantes de qualidade gema	0,50	0,05
2 Presença eventual de lascas de diamantes	0,50	0,25
3 Predominância de diamantes com formas tendendo a esférica	0,50	0,05
4 Predominância de minerais ultraestáveis na assembleia de pesados	0,75	0,05
5 Ausência de satélites de kimberlitos e de rochas afins	0,25	0,05
6 Assembleia de pesados compatível com a do Grupo Itararé	0,5	0,05
7 Ausência de anomalias magnéticas indicadoras de kimberlitos	0,25	0,05
8 Presença das mineralizações sobre a Bacia do Paraná	0,75	0,05
9 Ausência de mineralizações no escudo adjacente	0,25	0,05
10 As inclusões nos diamantes são similares às da África e da Sibéria	0,75	0,05
11 Não existem exposições de rochas kimberlíticas	0,25	0,05
12 Presença de diques de diábasio de filiação toleítica	0,05	0,25
13 Presença de conglomerados e arenitos de fácies trativas do Grupo Itararé, na área de erosão das bacias mineralizadas	0,75	0,05
14 Presença de depósitos de ressedimentação pró-glacial	0,75	0,05
15 Maior parte das ocorrências sobre os sedimentos do Grupo Itararé	0,75	0,05
16 Distribuição da mineralização principalmente na área do Arco de Ponta Grossa	0,05	0,25
17 Várias ocorrências associadas aos diques básicos	0,25	0,25
18 Presença de mineralizações em drenagens que cortam exclusivamente os sedimentos do Grupo Itararé	0,75	0,05
19 Maior frequência das mineralizações nas áreas de domínio dos depósitos continentais basais do Grupo Itararé	0,75	0,05
20 Diferenças nas características dos diamantes com relação aos de kimberlitos brasileiros do Cretáceo	0,50	0,05
21 Ocorrência de ouro associado aos depósitos diamantíferos	0,75	0,25
22 Direção geral das paleocorrentes dos lobos glaciais de S/SE para N/NW indicando proveniência do Sul da África	0,50	0,05

O caráter toleítico dos diques (MC=0,75) é bastante compatível com o quimismo e condicionamento tectônico dos kimberlitos, sendo que ambos são formados em regime de estiramento litosférico.

A relação das várias mineralizações com os diques básicos pode ser apenas resultado de um processo atual de armadilhamento dos minerais e frações pesadas a montante e a jusante dos diques, pela quebra de energia dos rios nesses pontos (MD=0,25).

A possibilidade da existência de fontes primárias no escudo adjacente à bacia também foi considerada, mas não se tem registro de ocorrências diamantíferas nessa área (MD=0,25). Nas porções noroeste e norte da bacia também ocorrem mineralizações diamantíferas próximo a sua borda, porém nessas porções as rochas do embasamento da bacia estão a jusante dos rios mineralizados.

A idade brasileira desse embasamento (MD=0,50) desfavorece a hipótese de fonte primária para a mineralização, pois, segundo a regra de Clifford (1988 *apud* Gonzaga Tompkins 1991), não ocorrem kimberlitos/lamproitos mineralizados em áreas onde o último evento magmático foi mais jovem que 1,5 Ga. Este fato restringe a possibilidade de ocorrência de kimberlitos mineralizados associados às manifestações magmáticas na área da Bacia do Paraná.

As características dos diamantes no noroeste da bacia e os da região do rio Tibagi são geralmente semelhantes, mas diferem dos diamantes da região de Juína-MT (kimberlitos de idade cretácea), o que é indicativo de que os diamantes desta região têm origem diferente daqueles que ocorrem sobre a Bacia do Paraná (MD=0,25).

A prospecção de fontes primárias de diamantes é baseada na presença de seus minerais satélites. No Estado do Paraná não foram encontrados minerais que indicassem a proximidade ou presença de kimberlitos ou lamproitos (MD=0,75), exceto a ocorrência do próprio diamante. Outra possibilidade aventada é a da ocorrência de fontes primárias que tenham sido totalmente erodidas deixando apenas os diamantes como testemunho de sua existência. No entanto, a existência de tais rochas deveria ser indicada pela presença de seus minerais satélites entre a assembleia de minerais pesados.

Tanto o fato da assembleia de pesados ser compatível com a assembleia mineralógica do Grupo Itararé quanto a ausência dos mesmos na Formação Furnas não tem qualquer implicação na hipótese de fontes kimberlíticas para os diamantes (MC e MD=0,05).

A predominância de diamantes de boa qualidade (MC=0,50), com formas tendendo a esférica/arredondadas (rombododecaédricas) (MC=0,50) e tamanho médio pequeno são, segundo Sutherland (1982), características de longo e seletivo transporte, devido à destruição das pedras fracas com inclusões e fraturas e facilidade no transporte das formas esféricas. Contudo, o tamanho médio pequeno dos diamantes (0,1 a 0,3 et) indicaria uma área fonte superior a 200 km, porém a maior distância da drenagem atual no rio Santa Rosa é inferior

Tabela 2 - Hipótese de fonte primária: o poder das evidências. Evidências relacionadas à hipótese da mineralização de diamante derivar diretamente de kimberlitos; medidas de crença/descrença (MC/MD) no poder das evidências:

Evidência	Medida de crença MC=	Medida de descrença MD=
1-Predominância de diamantes de qualidade gema	0,25	0,05
2-Presença eventual de lascas de diamantes	0,05	0,50
3-Predominância de diamantes com formas tendendo a esférica	0,50	0,25
4-Predominância de minerais ultra-estáveis na assembleia de pesados	0,05	0,50
5-Ausência de satélites de kimberlitos e de rochas afins	0,05	0,75
6-Ausência de anomalias magnéticas indicadoras de kimberlitos ou lamproitos	0,05	0,25
7-Presença das mineralizações sobre a Bacia do Paraná	0,05	0,50
8-Ausência de mineralizações no escudo adjacente	0,05	0,25
9-Não existem exposições de rochas kimberlíticas	0,05	0,75
10-Presença de diques de diábasio de filiação toleítica	0,75	0,75
11-Maior parte das ocorrências sobre os sedimentos do Grupo Itararé	0,05	0,05
12-Distribuição da mineralização principalmente na área do Arco de Ponta Grossa	0,75	0,05
13-Embasamento da área de idade brasileira	0,05	0,50
14-Várias ocorrências associadas aos diques básicos	0,75	0,25
15-Presença de mineralizações em drenagens que cortam exclusivamente os sedimentos do Grupo Itararé	0,05	0,25
16-Maior frequência das mineralizações nas áreas de domínio dos depósitos continentais basais do Grupo Itararé	0,05	0,25
17-Diferenças nas características dos diamantes com relação aos de kimberlitos brasileiros do Cretáceo	0,05	0,25
18-Ocorrência de ouro associado aos depósitos diamantíferos	0,05	0,25

a 20 km enquanto que uma fonte primária implicaria em um tamanho médio grande para as pedras. A presença de lascas indica que o agente transportador não foi seletivo (MC=0,50). Essa associação de características é forte indicativo de proveniência sedimentar a partir de longo transporte ou de transporte policíclico. Em contrapartida, a presença de diamantes com essas características não revela nenhuma informação com relação a fontes kimberlíticas e é improvável (MD=0,25 e 0,05) que eliminem a possibilidade de ocorrência destas rochas.

A predominância de minerais ultra-estáveis na assembleia de pesados, que é uma característica de longo transporte (MC=0,75), e a ausência de satélites de kimberlitos indica que, provavelmente (MC=0,25) não ocorrem kimberlitos na região. Sendo provável que os citados minerais associados aos diamantes estejam sendo liberados do Grupo Itararé, uma vez que os mesmos são encontrados em drenagens de pequeno porte.

A presença de mineralizações exclusivamente sobre a Bacia do Paraná (MC=0,75) descarta a possibilidade de fontes diamantíferas na região do escudo adjacente, onde seria mais provável a ocorrência de rochas kimberlíticas ou afins, pois este escudo é de idade brasileira e em crostas mais jovens as isothermas de formação de kimberlitos/lamproitos estão acima do campo de estabilidade do diamante (Clifford 1988; *apud* Gonzaga; Tompkins, 1991); sendo que, kimberlitos/lamproitos mineralizados tendem a ocorrer principalmente em áreas cratonizadas há mais de 1,5 Ga. Dessa forma, a relação espacial da mineralização com as rochas sedimentares do Grupo Itararé sugere, possivelmente (MC= 0,75), fonte nessas rochas, uma vez que não são conhecidas exposições de rochas kimberlíticas (ou rochas afins) diamantíferas.

As inclusões de natureza peridotítica nos diamantes são similares às da África, Sibéria e Venezuela. Isto caracteriza apenas as condições de cristalização, mas não significa que a fonte primária (rochas kimberlíticas) esteja presente onde os diamantes situam-se atualmente. Os diamantes provavelmente (MC=0,75) tiveram sua origem na porção sul do continente africano e foram transportados pelas geleiras que geraram as rochas do Grupo Itararé.

A presença de sedimentos do Grupo Itararé, na área de erosão das bacias mineralizadas, associados à mineralização (MC=0,75) pode ser um indicativo de fonte dos diamantes nesses sedimentos glaciogênicos.

Depósitos pró-glaciais são importantes alvos de formação de depósitos, uma vez que apresentam suficiente energia de transporte para concentração de minerais. Os conglomerados e arenitos flúvio-glaciais do Grupo Itararé que compõem tais depósitos ocorrem nas áreas que alimentam as bacias de drenagens mineralizadas (áreas-fonte), mostrando que possivelmente (MC=0,75) esses fatos estão relacionados à formação dos depósitos diamantíferos, além do que algumas bacias de drenagens mineralizadas estão desenvolvidas inteiramente sobre os sedimentos do Grupo Itararé.

A presença de ouro junto às mineralizações de diamante (MC=0,75) sugere a atuação processo de transporte que teria associado em um só

"cc" é o sub-espço de probabilidade no qual a proposição é confirmada pelas duas evidências

Nove sub-espços de probabilidade nos quais a proposição é confirmada, negada ou a relação é ambígua, por uma ou pelas duas evidências

Figura 6 - Representação dos espaços de probabilidade de duas evidências independentes E1 e E2 referentes à proposição P. No primeiro caso é representado apenas os campos nos quais as evidências indicam a validade da proposição. No segundo, representam-se os três campos de eventos possíveis: confirma (c), nega (n), ou é ambígua (a) para cada evidência e as possíveis combinações

tipo de depósito (rocha sedimentar) minerais de géneses diferentes, pois magmas diamantíferos não são auríferos.

Combinação das evidências O passo seguinte foi o tratamento dado à combinação de evidências. Sendo cada evidência independente, num caso qualquer pode ocorrer que uma evidência confirme a proposição, enquanto a outra negue, e uma terceira seja ambígua. Ou seja, como combinar os três campos c, n, a, no qual pode cair cada relação evidência/proposição? Será utilizada a regra de Dempster-Shafer (Dempster 1968, Shafer 1976) de combinação de evidências, desenvolvida aqui com pequenas modificações.

Considere-se a representação abaixo (Fig. 6) dos espaços de probabilidades de duas evidências referentes à proposição:

Sendo as evidências independentes, o sub-espço de probabilidade das combinações é o produto das probabilidades individuais, podendo ser representado no diagrama pelo retângulo delimitado por estes valores. O domínio cc, ou cl interseção c2 é o sub-espço de probabilidade cl x c2 tanto pela evidência 1, cl, como pela evidência 2, c2, como eventos independentes ou evidências independentes. Da mesma forma, o domínio nn (n l interseção n2) é o sub-espço de probabilidade onde a proposição é negada por ambas as evidências. A combinação de uma negação com uma ambiguidade é interpretada como negação, e de uma negação com uma afirmação é interpretada como uma ambiguidade. A combinação das duas evidências gera nove sub-espços de probabilidade que são interpretados da seguinte maneira:

cl n c2 domínio da confirmação da proposição, c
cl n a2 confirma a proposição, c
cl n n2 domínio ambíguo, a
ai n c2 confirma, c
ai n a2 domínio ambíguo, a
ai n n2 nega a proposição, n
nl n c2 domínio ambíguo, a
nl n a2 negação, n
nl n n2 negação, n

Logo:

$$c = cl \times c2 + cl \times a2 + ai \times c2$$

$$n = ai \times n2 + nl \times a2 + nl \times n2$$

$$a = cl \times n2 + ai \times a2 + nl \times c2$$

A combinação das duas evidências gerou novamente os três campos c, n, e a, que podem ser combinados com uma terceira evidência, e assim sucessivamente. As propriedades comutativa e associativa da multiplicação permitem que o resultado seja independente da ordem de entrada das evidências.

O valor de c (credibilidade) computado ao final, corresponde ao valor da função "belief" de An et al. (1994), e é a medida da confiabilidade ou confirmação na validade da proposição dada uma combinação de evidências, sendo:

Bei (P) = c, o valor da crença na validade da proposição,

Tabela 3 - Valores obtidos para a combinação das evidências listadas na tabela 1, a favor da hipótese dos diamantes terem sido provenientes do Grupo Itararé.

Proposição 1- Grupo Itararé como fonte dos diamantes:		
• Credibilidade da proposição ou função Belief (H)	• [C]	• 0,73
• Credibilidade da negação da proposição ou função Belief -H)	• [N]	• 0,00
• Ambiguidade das evidências	• A = [1 - (C+N)]	• 0,25
• Plausibilidade da proposição	• Plaus = [1 - N]	• 0,99
• Grau de Certeza:	• GC = [C - N]	• 0,72
• Fator certeza	• FC = [C - N] / [C + N]	• 0,99

Tabela 4 - Valores obtidos para a combinação das evidências listadas na tabela 2, a favor da hipótese dos diamantes terem sido provenientes diretamente de kimberlitos/lamproitos.

Proposição 2 - kimberlitos/lamproitos como fonte dos diamantes:		
• Credibilidade da proposição ou função Belief	• [C]	• 0,06
• Credibilidade da negação da proposição ou função Belief -H)	• [N]:	• 0,12
• Ambiguidade das evidências	• A = [1 - (C+N)]	• 0,81
• Plausibilidade da proposição	• Plaus = [1 - N]	• 0,87
• Grau de Certeza	• GC = [C - N]	• -0,70
• Fator Certeza	• FC = [C - N] / [C + N]	• -0,86

Bei (-P) = n, o valor da crença na falsidade da proposição, e

Bei (P, -P) = a, o valor da crença na ambiguidade das evidências.

Considera-se também a **plausibilidade** como o espaço em que as evidências permitem a aceitação da proposição, ou seja, mede até que ponto as evidências em favor de -P (negação de H) deixam espaço para crença em P, embora não indiquem sua validade, sendo medida pelo complemento da negação:

$$\text{Plaus (P)} = 1 - n$$

Pode-se definir ainda uma medida de certeza, excluindo-se o campo da ambiguidade. Assim, o **grau de certeza** pode ser medido pela diferença entre os valores de confirmação e da negação, ou seja a probabilidade adicional de P ser correta em relação à de P estar errada:

Certeza = $c - n$

Define-se também o **fator de certeza** como sendo a razão entre a probabilidade adicional da validade de P e a soma das probabilidades de P estar certo e de estar errado:

$$R = (c - n) / (c + n)$$

Este fator varia entre -1 e 1, sendo que os valores negativos indicam que as evidências contrárias à proposição são mais fortes que as favoráveis. O valor um positivo indica que todas as evidências são inteiramente a favor da proposição, sem ambiguidades. Os valores baixos, tanto negativos como positivos são indicadores da ambiguidade das evidências.

Avaliação das proposições A combinação das evidências, com base na teoria descrita, foi feita através de um programa em Basic (Soares, 1996), no qual entrando-se com os escores atribuídos (MC e MD) obtêm-se, para cada proposição, os valores finais de c (credibilidade ou confirmação), n (negação) e a (ambiguidade). Fornece também o grau e o fator de certeza. Nas hipóteses aventadas para a origem dos diamantes da bacia do Rio Tibagi, com base nas evidências listadas nas tabelas 1 e 2, foram gerados os resultados das tabelas 3 e 4.

CONCLUSÕES Observa-se que as evidências apontam uma elevada credibilidade para a hipótese de fonte secundária a partir do Grupo Itararé, enquanto que a negação desta hipótese é praticamente nula. A hipótese de fonte primária (kimberlito/lamproíto) apresenta valores muito baixos tanto de credibilidade (0,06) quanto de negação (descrença, 0,12), embora seja maior o valor de descrença na hipótese..

A ambiguidade representa um campo que não corresponde nem à afirmação nem à negação da hipótese, atribuindo uma extensão da ambivalência ou indiferença da relação entre a hipótese e as evidências. As evidências listadas apresentam, dessa forma, uma ambiguidade de 0,25 para a hipótese de fonte dos diamantes do Grupo Itararé e de 0,51 para uma origem primária para tais mineralizações. A elevada am-

biguidade para a hipótese de fonte primária indica que o conjunto de informações transformadas em evidências não constituem um conjunto confiável para avaliar a hipótese, ou ainda que muitas evidências listadas não são nem a favor nem contra a hipótese.

A plausibilidade das proposições revelou um valor de 0,99 em favor da hipótese dos diamantes terem como fonte o Grupo Itararé, ou seja as evidências listadas, quase todas, são aceitas por esta hipótese. Enquanto que um valor de 0,87 foi encontrado para a proposição da existência de fontes primárias na região, indicando que não há uma contradição muito grande entre o conjunto de evidências e a hipótese.

O grau de certeza oferecido pelos dois conjuntos de informações já é mais significativo, pois ao comparar a diferença a favor e contra, no caso da hipótese secundária o somatório dos pesos pende para o lado positivo (0,72) enquanto no caso da hipótese primária este valor é altamente negativo (-0,70).

O fator certeza é mais contundente ao indicar que na ponderação final 99% do potencial resoluto das informações é a favor da hipótese de origem a partir do Grupo Itararé. Por sua vez, 86 % deste potencial indica que os diamantes não provieram de fontes primárias kimberlíticas/lamproíticas na região.

Do ponto de vista metodológico fica clara a facilidade de trabalhar com um elevado conjunto de informações que constituem evidências a favor de uma determinada proposição tanto em modelo explicativo, como no caso estudado, como em modelos preditivos para avaliação de potencial. O principal avanço representado pela metodologia diz respeito à possibilidade de se considerar o caráter ambíguo sempre presente na informação geológica. Inclui um grau de incerteza na relação entre a informação e a proposição, incerteza esta avaliada pela ambiguidade.

Agradecimentos Ao apoio financeiro recebido da FINEP-PADCT (ct.65.95.8001) e às bolsas do CNPq e CAPES.

Referências

- An, P.; Moon & W. M.; Bonham-carter, G. F. 1994. Uncertainty management in integration of exploration data using the Belief Function. *Nonrenewable Resources* 3(1), p. 1-25.
- Biondi, J. C. 1982. Kimberlitos. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 32: 1982: Salvador, *Anais*... Salvador: SBG, v.2, p. 452-464.
- Clifford, T. N. 1966. Tectono-metallogenetic units and metallogenic provinces of África. *Earth and Planetary Science Letters*, 1: 421-434.
- Dempster, A. P. 1968. "A generalization of Bayesian inference". *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*. 30: 205-247.
- Gonzaga, G. M & Tompkins, L. A. 1991. Geologia do diamante. In: PRINCIPAIS depósitos minerais do Brasil. Brasília: DNPM-CPRM, 4:53-116.
- Neapolitan, R. E. 1990. *Probabilistic reasoning in expert systems: theory and algorithms*. New York, John Wiley. 433 p.
- Perdoncini, L.C. 1997. *Diamantes do rio Tibagi, Paraná: fonte no Grupo Itararé?*. - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Dissertação de Mestrado, 164 p.
- Perdoncini, L. C. & Soares, P. C. O diamante na bacia do rio Santa Rosa, Tibagi (PR). *Rev. Brás. Geoc.*, neste volume.
- Rostirolla, S.; Soares, P.C. & Chang, H.K., 1998. - Bayesian and multivariate methods applied to favorability quantification in Recôncavo Basin and Ribeira Belt, Brazil, *Nonrenewable Resources* *Intsrn. Ass. Mathematical Geology. 7: 7-24.
- Shafer, G. 1976. *A mathematical theory of evidence*. Princeton, N. J., Princeton University Press.
- Soares, P.C. 1996. *Função Belief, Belief.exe Programa em Turbo-basic para combinação de evidências*. UFPR-Departamento de Geologia. Curitiba..
- Soares, P.C. 1998. *Raciocínio probabilístico em Geologia: um ensaio*., UFPR-Departamento de Geologia. Curitiba, 58 p (Inédito).
- Sutherland, D. G. 1982. The transport and sorting of diamond by fluvial and marine processes. *Economic Geology* * Lancaster, 77:1613-1620

Manuscrito A-986

Recebido em 04 de junho de 1998

Revisão dos autores em 05 de março de 1999

Revisão aceita em 15 de março de 1999