



Aplicação da Análise Geoestatística para Modelagem Espacial do Mercúrio e Matéria Orgânica em Solos Florestais na Amazônia Ocidental

José Vicente Elias Bernardi ¹
Marcos Paulo Neira ²
Angelo Gilberto Manzatto ³
Igor Bruno Barbosa de Holanda ⁴
Ronaldo de Almeida ⁵
Wanderley Rodrigues Bastos ⁶
José Garrofe Dórea ⁷
Paulo Milton Barbosa Landim ⁸
Ludgero Cardoso Galli Vieira ⁹

RESUMO:

O presente estudo foi realizado, na Amazônia Ocidental, em uma área situada no campus universitário da Universidade Federal de Rondônia em Porto Velho, Rondônia. Foram analisadas em amostras de solos as concentrações de mercúrio (Hg) e matéria orgânica (MO) em um trecho de floresta ombrófila aberta. A concentração média de Hg foi de $150 \pm 28 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, enquanto que a concentração de MO foi da ordem de $21,87 \pm 5,87\%$. O método utilizado para obtenção dos padrões de distribuição espacial das concentrações de Hg e MO foi a krigagem indicativa (KI), que demonstrou que a ocorrência de Hg obedece a padrões de distribuição controlada por fatores geológicos da região, rica em rochas

¹ Doutor em Geociências e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP. Docente na Universidade de Brasília Faculdade Planaltina - UnB/FUP. Brasil. bernardi@unb.br

² Graduado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Rondônia - UNIR. Brasil. mpneira@gmail.com

³ Doutor em Ciências Biológicas (Biologia Vegetal) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP. Docente na Universidade Federal de Rondônia - UNIR. Brasil. manzatto@unir.br

⁴ Mestre em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Rondônia - UNIR. Docente no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO. Brasil. igorbruno16@gmail.com

⁵ Doutor em Ciências Biológicas (Biofísica) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Docente na Universidade Federal do Ceará - UFC e na Universidade Federal do Amazonas - UFAM. Brasil. ronaldoufam@gmail.com

⁶ Doutor em Ciências Biológicas (Biofísica) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Docente na Universidade Federal de Rondônia - UNIR. Brasil. wanderley@pq.cnpq.br

⁷ Doutor em Nutritional Biochemistry pela University Of Massachusetts - UMASS, Estados Unidos. Docente na Universidade de Brasília - UnB. Brasil. dorea@rudah.com.br

⁸ Doutor em Estratigrafia pela Universidade de São Paulo - USP. Docente na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP. Brasil. plandim@rc.unesp.br

⁹ Doutor em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Goiás - UFG. Docente na Universidade de Brasília - UnB. Brasil. ludgero@unb.br



Aplicação da Análise Geoestatística para Modelagem Espacial do Mercúrio e Matéria Orgânica em Solos Florestais na Amazônia Ocidental

graníticas, e pelos parâmetros morfológicos do solo, como textura argilosa, que apresenta alto grau de adsorção de elementos-traço. A distribuição da MO por sua vez, está relacionada pela grande quantidade de serrapilheira acumulada na superfície do solo, aliada à presença dos microorganismos, fungos e, pequenos invertebrados. A conversão deste material em húmus favorece o crescimento vegetal e sua concentração elevada influencia na quantidade de elementos-traço no solo. O modelo variográfico ajustado demonstrou a dependência espacial, entre os teores de mercúrio contidos no solo da área estudada em relação à utilização pretérita da área. A determinação entre a MO e Hg foi da ordem de 0,173 e significativa ($p=0,0001$).

Palavras chave: Geoestatística; Krigagem Indicativa; Matéria Orgânica; Amazônia Ocidental.

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

Nos últimos anos, a Amazônia brasileira vem experimentando de forma incessante a exploração de seus recursos naturais, com consequências sérias para as populações tradicionais (índios, ribeirinhos, seringueiros) que dependem da floresta para sobreviver. Uma das formas de exploração é a atividade garimpeira de ouro, que além de provocar o assoreamento dos rios, contamina o ecossistema com a adição de metais pesados tóxicos, a exemplo do mercúrio. Aspectos relacionados a esse tipo de poluição ambiental nos ecossistemas amazônicos têm despertado interesse científico nos últimos 30 anos, com destaque para a presença de Hg oriundo da atividade garimpeira de ouro na região (Pfeiffer & Lacerda 1988, Pfeiffer et al. 1991, Wasserman et al. 2001, Bastos & Lacerda 2004).

Inicialmente os estudos realizados na Amazônia a respeito da toxicidade do mercúrio se concentravam na calha dos rios, principalmente o rio Madeira e o rio Tapajós, devido à intensa atividade garimpeira de ouro desenvolvida nessas áreas e que atingiu seu auge de atividade na década de 80 (Bastos & Lacerda 2004). Em meados da década de 1990, contudo, os estudos envolvendo mercúrio na Amazônia tomaram outro enfoque indicando que os solos amazônicos podem ser originalmente depósitos ricos em Hg, sendo considerados como estoques naturais deste elemento nos ecossistemas terrestres (Roulet & Lucotte 1995, Lacerda et al. 1999, Fadini & Jardim 2001, Hermann 2004).

O Hg naturalmente estocado nos solos amazônicos atingiria os corpos d'água pela lixiviação e assoreamento, e através de mudanças das condições físico-químicas e microbiológicas locais sofreria processos de metilação e contaminaria a biota local (Roulet et al. 2000), principalmente em peixes que são a principal fonte de proteína das populações ribeirinhas (Barbosa 1997, Bastos et al. 1998). Dentro deste contexto, o Hg teria tanto uma origem natural como antrópica e a constatação de que o Hg não possui uma única origem permitiu que outras abordagens e interpretações relativas à sua gênese fossem investigadas (Wasserman et al. 2001).

A gênese dos solos amazônicos estaria relacionada a fontes geológicas decorrentes de processos que vem ocorrendo a milhões de anos e que tem acumulado Hg gradualmente por meio de deposição de poeira de erupções vulcânicas e de outras fontes (Roulet & Lucotte 1995, Roulet et al. 1996a). A dinâmica da liberação do Hg sob esta perspectiva possui especial interesse científico, pois o processo contemporâneo de ocupação desordenada das áreas naturais florestais permite uma ação combinada de fatores, tais como a fragmentação da paisagem e os diferentes processos de uso, ocupação e substituição da cobertura vegetal podendo atuar como mecanismos diferenciados no tempo e no espaço.

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

Herrmann (2004) destaca que o processo de desmatamento seguido de queimada e posterior estabelecimento da agropecuária tem grande influência na liberação do mercúrio nos solos amazônicos, pois facilita o processo de lixiviação e erosão superficial do solo, favorecendo a chegada do Hg a outras áreas. Além disso a queima da floresta seria responsável pela liberação de Hg da própria biomassa e do solo, devido às altas temperaturas que promovem a volatilização deste elemento. Cinzas decorrentes de queimadas e incêndios florestais são muito frequentes na Amazônia, alcançando um pico máximo nos meses de seca (julho, agosto e setembro). Portanto, pode haver acúmulo de Hg em áreas relativamente longe das grandes empreitadas agropastoris e de comércio madeireiro, as principais responsáveis pelo desmatamento em Rondônia.

Entretanto, estas evidências de antropização não seguem um padrão convergente, demonstrando que podem ocorrer particularizações no processo de disponibilidade e concentração do Hg em áreas espacialmente próximas. Os conhecimentos acumulados nos últimos anos a respeito da presença do mercúrio em solos de floresta apontam para esta afirmação demonstrando que em muitas áreas ocorrem padrões complexos e irregulares na disponibilização do Hg na natureza (Malm et al. 1991, Lacerda et al. 1999, Roulet et al. 2000, Fadini & Jardim 2001, Herrman 2004, Bastos & Lacerda 2004). É importante destacar, também, que grande parte dos estudos envolvendo metais pesados realizados na Amazônia apresentaram baixa representatividade pelo insuficiente número de amostras coletadas (Wasserman et al. 2001), e grande parte dos resultados adquiridos foram extrapoladas para áreas mais abrangente.

Assim, no presente estudo foi feito, para uma área restrita, uma rede de amostragem obedecendo a um pequeno gradiente ambiental que percorre áreas impactadas e borda de floresta de terra firme. A ideia é que o levantamento/diagnóstico das condições biogeoquímicas dos solos poderá contribuir para o entendimento do ciclo do Hg e dos processos que controlam e determinam os seus padrões locais e regionais. Para tanto foram utilizadas ferramentas geoestatísticas para modelar a variabilidade espacial dos dados produzindo mapas da distribuição de Hg nos solos de uma área de floresta de terra firme, localizada em Porto Velho, Rondônia, Amazônia Ocidental.

MATERIAL E MÉTODOS

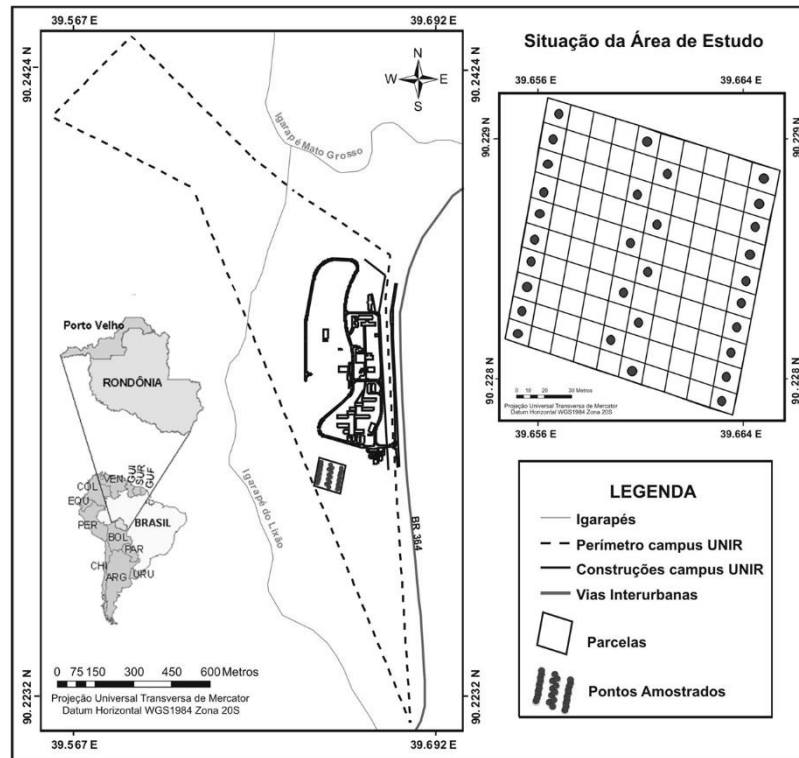
1. ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado em um trecho de floresta de terra firme, localizada no Campus universitário “José Ribeiro Filho”, da Universidade Federal de Rondônia em Porto Velho, Rondônia

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

(Figura 01). A área apresenta histórico de ocupação antrópica e atualmente sofre com invasões desordenadas de sitiantes no seu entorno.

Figura 01. Mapa da área de estudo e o desenho experimental mostrando os pontos de coleta. Modificado de Miranda (2005), Rondônia (2002)



Fonte: Os Autores.

O clima da região caracteriza-se por ser do tipo Aw - Clima Tropical Chuvoso, segundo a classificação de Köppen, e a vegetação característica da área é Floresta Ombrófila Aberta de Terras Baixas com Palmeiras, segundo Veloso (2001).

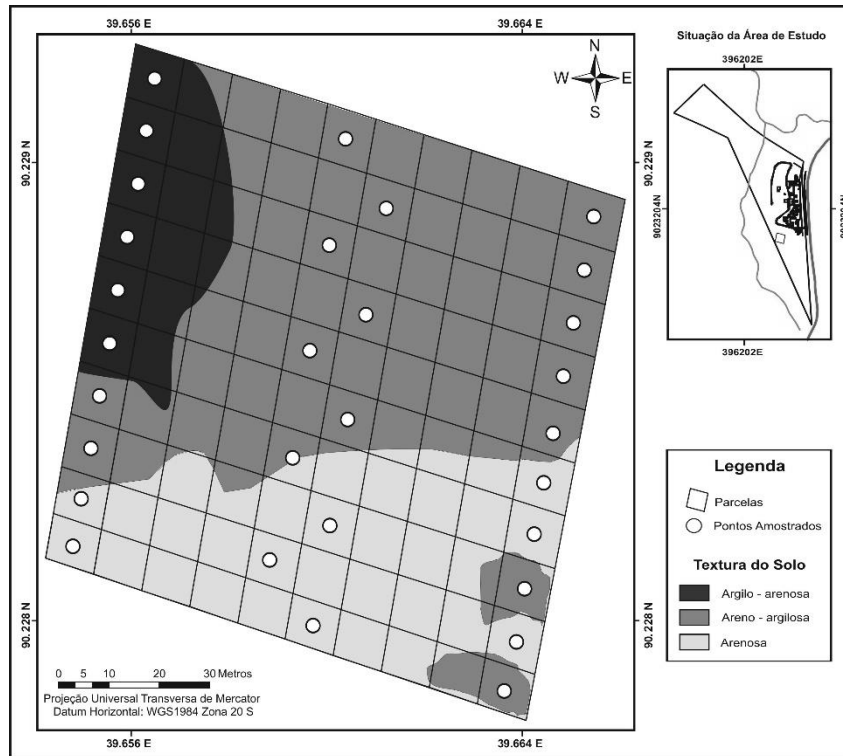
Segundo levantamento pedológico o solo predominante da área em questão é da classe Latossolo Vermelho-Amarelo (coloração Vermelho-Amarelo, teor de ferro intermediário), geralmente encontrado em relevo predominante plano e suave ondulado, com texturas variando entre a argilo-arenosa e arenosa (Figura 02). A fertilidade natural baixa há muito constitui a principal limitação de uso agrícola, necessitando de correção e adubação (Rondônia 2002).

O quadro geológico da área de estudo pertence ao domínio Cráton Amazônico, Província Tapajós, Subprovíncia do Madeira, Complexo Jamari, Suíte Intrusiva Santo Antônio. Compreende unidades litológicas e sistemas estruturais envolvidos em uma longa história geodinâmica que registra os

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

seus primórdios no final do Paleoproterozóico (1.8 a 1.9 B.a.), com continentalização no início do período Neoproterozóico (900 M.a.) (Rondônia 2002).

Figura 02. Mapa de textura do solo da área de estudo com localização dos pontos de amostragem



Fonte: Os Autores.

2. MÉTODOS UTILIZADOS

Dentro da área selecionou-se 1 hectare (1000m²) para a instalação e alocação de unidades amostrais (parcelas), demarcadas com estacas. Foram realizadas expedições de campo ao local, a fim de escolha do trecho florestal a ser estudado e constatação de que a área de floresta corresponde hoje a um trecho bem conservado. Todas as amostras foram georreferenciadas para compor o mapa do desenho experimental da amostragem. A partir da marcação dos pontos foi iniciada a amostragem dos solos. Para todas as amostras foram obtidas as coordenadas em UTM (Unidade Transversa de Mercator) com a utilização de dois aparelhos GPS (*Global Position System*), modelo *Ashtech Solutions*, padrão geodésico, com acurácia de 2 cm na horizontal e 4 cm na vertical, para a verificação da representatividade de mercúrio nos solos da área.

Em campo, amostrou-se a fração superficial de 0-10 cm do solo utilizando o *trado holandês*. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados. Após

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

a amostragem, a aparelhagem utilizada sofreu um processo de limpeza com pano seco, de modo a impedir o transporte e contaminação entre amostras.

Para quantificação do Hg presente nas amostras, adotou-se metodologia proposta por Bastos et al. (1998). A determinação de Hg total no solo foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica acoplada ao gerador de vapor frio (FIMS-400, *Perkin-Elmer*). Foram realizadas também análises do teor de matéria orgânica, tendo sido utilizado o método da perda de peso por ignição (Schulte et al. 1987).

Para a análise dos dados foram utilizados tanto métodos da estatística tradicional como da geoestatística. A geoestatística diferencia-se da estatística tradicional por focar variáveis regionalizadas, ou seja, variáveis que se caracterizam não apenas pelos valores apresentados, mas também pela sua posição no espaço. No estudo do comportamento das variáveis regionalizadas há duas ferramentas fundamentais: o semivariograma e a krigagem (Landim 2003).

O semivariograma é a ferramenta matemática que permite estudar a dispersão espacial da variável regionalizada (Guerra 1988) ou conforme definido por Landim (2003), a medida do grau de dependência entre valores de amostras. O variograma descreve a auto-correlação espacial de dados, em função da distância e da direção entre pares de observações $[z(x_i), z(x_{i+h})]$. A função semivariograma é apresentada da seguinte maneira:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i) - z(x_{i+h})]^2 \quad (1)$$

onde: (h) é a semi-variância; $n(h)$ é o número de pares de valores da variável considerada em uma determinada direção; $z(x_i)$, $z(x_{i+h})$ são valores da variável em dois pontos distintos, separados por uma distância preestabelecida e constante em uma direção; h é o intervalo de distância preestabelecida; $\frac{1}{2}$ é a metade da média das diferenças quadráticas.

O cálculo de $\gamma(h)$ em função do intervalo (h) resulta no semivariograma, normalmente denominado variograma, sendo que o formato deste gráfico descreve o grau de autocorrelação presente.

A *krigagem* é um processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma. Trata-se, em último caso, de um método de estimativa por médias móveis. A partir de uma matriz de

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

covariância espacial determina os pesos atribuídos às amostras adjacentes, num modelo de dependência espacial, para prever valores em pontos não amostrados. O ponto a ser estimado obedece aos critérios de não tendenciosidade e mínima variância. Existem diversos tipos de krigagem: simples, ordinária, universal, indicativa, etc. (Gonçalves 1997).

A *krigagem indicativa* consiste basicamente na aplicação da krigagem ordinária para a variável transformada, ou seja, a variável resultante da aplicação da função não linear $f(z) = 0$ ou 1 . No processo básico da krigagem ordinária, a estimativa é feita para determinar um valor médio em um local não amostrado. Pode-se, porém, também fazer estimativas baseadas em valores que se situam abaixo ou acima de um determinado nível de corte (cutoff) (Landim & Sturaro 2002).

O objetivo tanto pode ser a determinação de teores anômalos de um determinado bem mineral, com valores acima do nível de corte, como em análise ambiental para determinação de níveis de poluição abaixo de certo teor crítico. Esta técnica tem como principal vantagem ser não paramétrica, não requerendo um conhecimento prévio da função de distribuição para a variável regionalizada.

Para atingir estes objetivos, o primeiro passo na krigagem indicativa, é transformar os dados originais em indicadores, isto é, transformar os valores que estão acima de um determinado nível de corte em zero (0) e os que estão abaixo em um (1):

$$i_j(v_c) = \begin{cases} 1 & \text{se } v_j \geq v_c \\ 0 & \text{se } v_j < v_c \end{cases} \quad (2)$$

Desta forma, são calculados os semivariogramas experimentais indicativos para determinados níveis de corte e estabelecidos os modelos variográficos para os mesmos. Os semivariogramas indicativos podem ser estimados pela função:

$$\gamma_i(h, v_c) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_k} [i(x+h, v_c) - i(x, v_c)]^2 \quad (3)$$

onde: h é igual ao passo (lag) básico; v_c é o nível de corte; N é o número de pares.

Efetuada-se a krigagem ordinária pontual nos valores transformados, obtêm-se a probabilidade de $v_i < v_c$. Desta forma, à medida que se incrementa v_c , obter-se-á valores estimados de uma função de distribuição acumulada, assim expresso:

$$F\left(v; \frac{v_c}{(n)}\right) = E\left\{\frac{i(v; v_c)}{(n)}\right\} \quad (4)$$

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

Definidas as funções de distribuição acumulada, pode-se, portanto, obter qualquer intervalo probabilístico da variável, ou seja, onde:

$$v_j < v_i \quad (5)$$

A análise espacial dos dados, com o ajuste de semivariogramas e a aplicação da krigagem indicativa foi realizado no módulo *geostatistical wizard* presente no software ArcGIS 9.2 (Esri 2006).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 01 apresenta a estatística descritiva das análises químicas realizadas. Os teores de Hg e MO foram quantificados e seus valores encontram-se em g.kg⁻¹ e porcentagem, respectivamente. A análise estatística descritiva das variáveis em estudo foi realizada pelo *software* STATISTICA 7.0 (Statsoft 2003).

Tabela 01. Estatística descritiva do Hg (g.kg⁻¹) e da matéria orgânica (%) do solo da parcela permanente. N = número de amostras

VARIÁVEL	N	MÉDIA	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO PADRÃO
Hg	30	150,0	145,0	90,0	210,0	28,0
MO	30	21,9	22,1	15,0	34,6	5,9

Fonte: Os Autores.

Na Tabela 01 verifica-se que a média de Hg, próximo ao valor da mediana, indica distribuição próxima à normal dos dados. O mesmo pode ser dito em relação ao teor de matéria orgânica, que apresentou uma média de 21,9% e uma mediana com 22,1%.

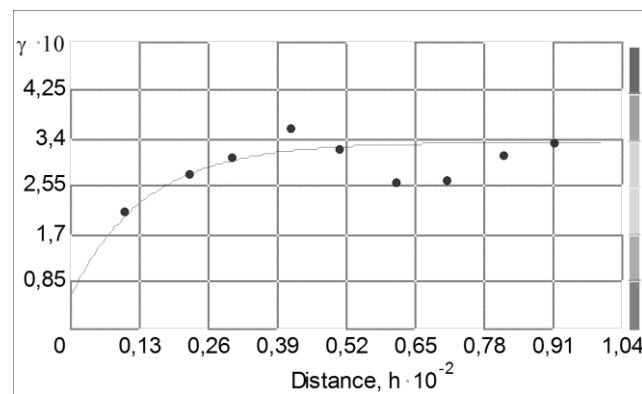
Comparando com resultados encontrados por outros autores (Roulet et al. 1996a, Fadini 1999, Hermann 2004, Hu et al. 2006), as concentrações de Hg obtidas neste estudo são semelhantes.

1. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

A quantificação da dependência espacial para Hg e MO foi realizada por meio da elaboração de dois semivariogramas, adotando como valor de corte a mediana, ou seja, 145 g.kg⁻¹ para Hg e 22,1% para MO, para a construção dos mapas de probabilidades de ocorrência (Figuras 03 e 04). Observa-se que o alcance máximo para as distribuições de Hg e MO foram, em ambos os casos, de 650 metros, demonstrando haver uma dependência espacial na distribuição dos teores de Hg e MO totais no solo até a essa distância.

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

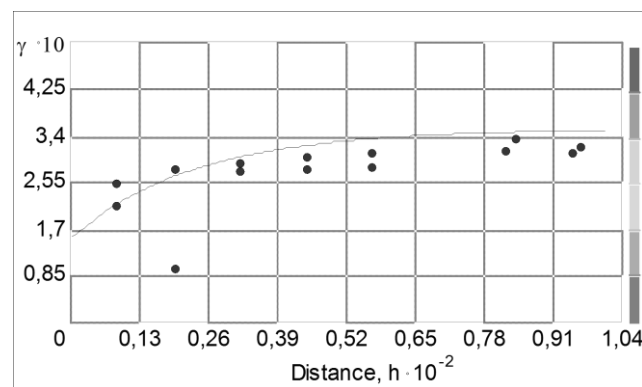
Figura 03. Modelo semivariográfico para o mercúrio



Fonte: Os Autores.

Os modelos variográficos ajustados são do tipo exponencial, que apresentam patamares semelhantes (0,34). Tais semivariogramas apresentam efeito pepita (0,054 para Hg e 0,151 para MO) indicando haver variação das concentrações em intervalos menores que o intervalo amostrado. A anisotropia é do tipo zonal, influenciada para a região NW do mapa, em direção ao rio Madeira.

Figura 04. Modelo semivariográfico para a matéria orgânica



Fonte: Os Autores.

2. VALIDAÇÃO CRUZADA

Segundo Almeida (2006), a validação cruzada é uma forma para medir a incerteza da predição dos dados, ou seja, uma maneira de verificar a confiabilidade do modelo variográfico, que terá reflexos na interpolação dos dados e, conseqüentemente, no mapeamento por krigagem. Na validação cruzada, depois de obtido o modelo variográfico, cada valor original é removido do domínio espacial e, usando-se os demais, um novo valor é estimado para esse ponto. Desse modo, pode-se verificar as diferenças entre os valores originais e os respectivos estimados e obter uma somatória dessas diferenças, também conhecidas como erros.

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

A técnica de Jack-knifing tem, exatamente, por objetivo, calcular os erros de estimação e avaliar a qualidade do método de estimação. Os valores estimados $Z^*(xi)$ e a variância de estimação $\sigma^2E(xi)$ são calculados para cada posição xi , onde existe um valor medido $Z(xi)$, a partir de então os erros podem ser calculados. A qualidade do método de estimação pode ser avaliada através de duas condições, no caso específico dos erros reduzidos: a média dos erros reduzidos deve ser igual a 0 (zero); e - a variância dos erros reduzidos deve ser igual a 1 (Isaaks & Srivastava 1989).

Conforme registrado por Almeida (2006) o valor médio da predição do erro próximo à zero indica que os valores estimados não são enviesados. Informação de igual teor pode ser obtida analisando a raiz quadrada do erro padronizado, indicando que o erro médio padronizado é maior que a raiz média quadrada do erro predito. A raiz média quadrada do erro predito é a medida da predição dos dados de um ponto observado e determina a média para o intervalo de confiança. Finalmente, a raiz média quadrada padronizada, que representa a variância do erro estimado da média das estimativas de cada ponto for próximo do valor um (1) indica um bom ajuste entre os pontos observados e os pontos estimados.

A Tabela 02 traz os parâmetros de validação cruzada utilizando o algoritmo krigagem indicativa para o Hg e MO.

Tabela 02. Validação cruzada para os modelos ajustados para os elementos estudados no solo da parcela permanente Campus Unir –PVH. M = Média; RM = Raiz quadrada média; EMP = Erro médio padrão

PARÂMETROS	M	RM	EMP	M	RM
Hg (cdf >145 μ g. kg ⁻¹)	0,018	0,53	0,525	0,026	1,01
M.O. (cdf > 22,1%)	-0,004	0,506	0,508	-0,009	1,006

Fonte: Os Autores.

3. KRIGAGEM INDICATIVA DO MERCÚRIO E DA MATÉRIA ORGÂNICA

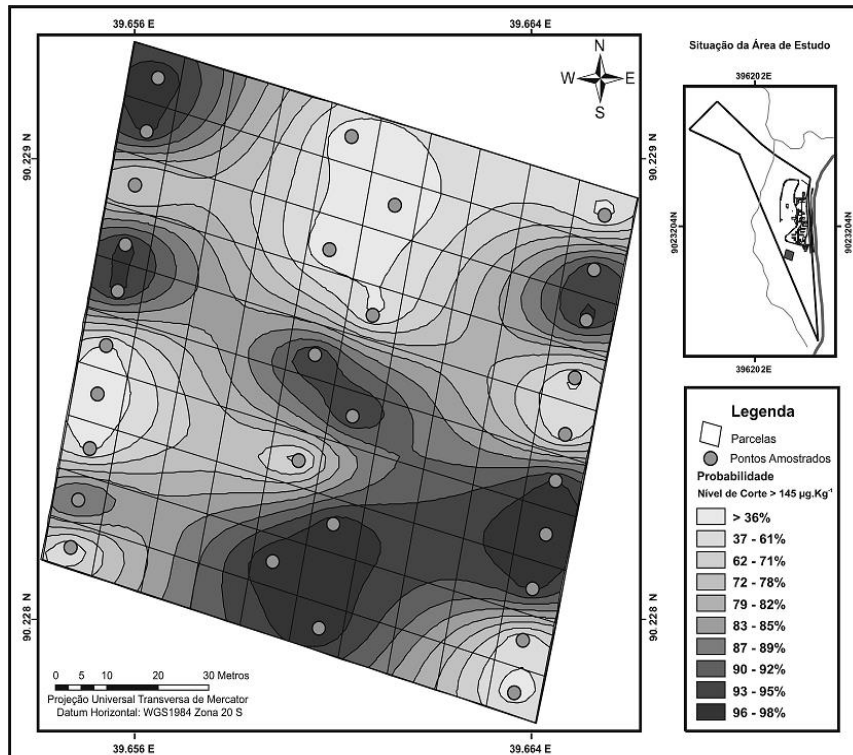
Através da modelagem do variograma, verificada pelos testes de validação cruzada, foi possível elaborar mapas de probabilidade de ocorrência de Hg e de MO na área de estudo que tornaram possível a visualização do comportamento espacial do conjunto amostral.

A Figura 05 mostra o mapa de indicação de probabilidades de ocorrência para valores maiores que 145g.kg⁻¹ de Hg em toda a área amostrada. Nela observa-se uma região onde há 90% de probabilidade de encontrar um valor maior que 145g.kg⁻¹, e regiões onde as probabilidades são de 70%

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

até 30%. Nessa figura, é possível, também, observar zonas de concentração de Hg na área compreendida pela parcela permanente, sendo as maiores localizadas na região sul/leste do mapa, áreas onde se concentram as maiores partes dos latossolos vermelho-amarelos, de textura arenosa a argilo-arenosa, com abundância de espécies vegetais de grande porte.

Figura 05. Mapa de probabilidade de ocorrência de mercúrio



Fonte: Os Autores.

A ocorrência de Hg nessa parcela corrobora com os resultados encontrados por Lacerda et al. (1999) e Hu et al. (2006), que, juntamente com o conteúdo de matéria orgânica e características morfológicas do solo, como textura e consistência, podem apresentar uma alta capacidade para adsorver e complexar metais como o Hg. Desse modo foi possível, verificar em campo, que as áreas mais preservadas da parcela são as que mais contribuem para probabilidades elevadas de se encontrar Hg.

A Figura 06 mostra o mapa de probabilidades de ocorrência para valores maiores que 22,1% de MO no solo. Observa-se na figura duas áreas onde há probabilidades de ocorrência entre 90 a 96% de se encontrar tais valores. Também ocorrem na região, probabilidades de ocorrências de valores entre 40 e 90% .

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

As concentrações médias da MO refletem muito bem o atual uso florestal que esta área vem apresentando, fortemente influenciadas pela grande quantidade de serrapilheira acumulada na superfície do solo. Aliada à presença dos microorganismos, fungos e pequenos invertebrados que consomem a serrapilheira, a conversão deste material em húmus favorece o crescimento vegetacional e sua concentração elevada influencia na quantidade de metais pesados no solo.

Com relação às correlações entre a MO e Hg, embora alguns trabalhos, como o de Hu et al. (2006), tenham demonstrado a afinidade entre os metais pesados e a MO, os resultados experimentais obtidos por diversos pesquisadores têm sido contraditórios. Roulet et al. (1998), Lacerda et al. (1999) apontam para a existência de uma relação entre a concentração de matéria orgânica no solo e a concentração de mercúrio total presente. No entanto, trabalhos como o de Malm et al. (1995), Fadini & Jardim (2001) e Hermann (2004) não diagnosticaram ou diagnosticaram uma pobre correlação entre os mesmos. Vergotti (2001) ao estudar a presença de Hg em lagos da região do rio Madeira, também constatou o baixo nível de correlação entre o Hg total presente e a MO volátil associada. Neste trabalho a correlação foi 42%, significativa ($F=325,809$; $p=0,0001$). O modelo ajustado pela regressão linear ($Hg = 0,135401499532071*MO$) indica que 42% pode explicar a variação do Hg em relação a MO.

CONCLUSÃO

Neste trabalho a krigagem indicativa demonstrou haver regiões de probabilidade de ocorrência maior de Hg em determinadas regiões, seguindo provavelmente padrões de mobilidade e lixiviação. Os valores probabilísticos verificados indicaram que o Hg esteja fortemente adsorvido à solução de elementos do solo, tendo sua mobilidade controlada pela argila e que a matéria orgânica pode ter contribuição para esse processo.

Neste estudo, foi verificado também que as correlações espaciais existentes entre os teores de matéria orgânica e as concentrações de mercúrio indicam haver um processo de mobilização dos metais pesados, em decorrência do lixiviamento do solo. A baixa quantidade de argila favorece o transporte destes elementos para outras regiões, inclusive os corpos d'água existentes na base das encostas.

A aplicação da metodologia geoestatística mostrou ser uma ferramenta eficaz na modelagem ambiental de poluentes em matrizes ambientais, como os solos. A partir de pontos amostrados, a krigagem indicativa permitiu reconstruir superfície representativa das concentrações de Hg no solo.

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

Estas conclusões apoiam a hipótese que as altas concentrações de Hg em solos e rios da região amazônica, pode ter também uma origem natural, apesar de haver uma crescente atividade de natureza antrópica, que contribui para o aumento destas concentrações e disponibilidade cada vez maior para a biota.

A devastação da floresta, principalmente em áreas de topografia acidentada, para posterior implantação de atividades agropastoris, ou qualquer outra atividade de caráter exploratória, também contribui para a acumulação de metais pesados nos corpos d'água, na fauna aquática e, conseqüentemente, na população que se alimenta dessa fauna e que consome essas águas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve apoio financeiro do Conselho Nacional de Pesquisa CNPq através do projeto MCT-CNPq/Universal – 2006 (processo N°. 479818/2006-1).

REFERÊNCIAS

- Almeida R 2006. *Análise geoestatística das concentrações de mercúrio no lago Puruzinho - Amazônia Ocidental*. Dissertação de Mestrado. Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR, Porto Velho.
- Barbosa AC 1997. Mercury in Brazil: Present or future risks? *Ciê. Cult.* 49(1/2):111-116.
- Bastos WR, Lacerda LD 2004. A contaminação por mercúrio na Bacia do Rio Madeira: Uma Breve Revisão. *Geochemistry, Brasiliensis* 18(2): 099-114.
- Bastos WR, Malm O, Pfeiffer WC, Cleary D 1998. Establishment and analytical quality control of laboratories for Hg determination in biological and geological samples in the Amazon-Brazil. *Ciê. Cult.* 50(4):255-260.
- ESRI & MAPIM SOFTWARE Arc GIS 9.2 (2007) In: <http://www.esri.com/>.
- Fadini P 1999. *Química Aquática do Mercúrio no Rio Negro: Importância da Luz Solar nos processos redox*. Tese de Doutorado – Unicamp, Campinas.
- Fadini PS, Jardim WF 2001. Is the Negro River Basin (Amazon) impacted by naturally occurring mercury? *Science of the Total Environment* 275(1):71-82.
- Gonçalves ACA 1997. *Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação*. Tese de Doutorado (Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz") – Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Guerra PAG 1988. *Geoestatística Operacional*. Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasília, 145 pp.
- Herrman JC 2004. *Mercúrio em solos de Rondônia: A geoestatística como ferramenta de análise da influência da ação antrópica (Um Estudo de Caso)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho.

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

Hu K, Zhang FR, Li H, Huang F, Li BG 2006. Spatial Patterns of Soil Heavy Metals in Urban-Rural Transition Zone of Beijing. *Pedosphere* 16(6):690-698.

Isaaks EH, Srivastava RM 1989. *Applied Geostatistics*. Orford Univ. Press, New York, 560 pp.

Lacerda LD, Ribeiro MG, Souza M, Ayres GA 1999. *Distribuição de mercúrio em solos e sedimentos lacustres na região de Alta Floresta, MT*. (CETEM/MCT) Série Tecnologia Ambiental, Rio de Janeiro, 23 pp.

Landim PMB 2003. *Análise Estatística de Dados Geológicos*. Fundação Editora da UNESP 2º edição, São Paulo, 226 pp.

Landim PMB, Sturaro JR 2002. *Krigagem indicativa aplicada a elaboração de mapas probabilísticos de risco*. DGA, IGCE, UNESP, Lab. Geomatématica, Texto Didático, Rio Claro 19 pp.

Malm O, Castro MB, Bastos WR, Branches FJP, Guimaraes JRD, Zuffo CE, Pfeiffer WC 1991. An assessment of Hg pollution in different goldmining areas, Amazon Brazil. *Science of the Total Environment* 175(2):127-140.

Miranda A 2005. *Mapeamento, Georeferenciamento e Criação de Modelo Digital de Elevação Utilizando Geoestatística e Dados Secundários do Campus Universitário José Ribeiro Filho, Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, Rondônia – Brasil*. Monografia – Fundação Universidade Federal de Rondônia (Departamento de Ciências Biológicas), Porto Velho.

Pfeiffer WC, Lacerda LD 1988. Mercury inputs to the Amazon region, Brazil. *Environment Technology* 9(4):325-330.

Pfeiffer WC, Malm O, Souza CMM, Lacerda LD, Silveira EG, Bastos WR 1991. Mercury in the Madeira River ecosystem, Rondônia, Brazil. *Forest Ecology and Management* 38(3):239-245.

Rondônia (2002). *Atlas Geoambiental de Rondônia*. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental (SEDAM), Porto Velho, 146 pp.

Roulet M 1996. Mercury in Amazonian soils: accumulation and release. *Anais do IV International Conference on the Geochemistry of the Earth's Surface*, p. 453-457.

Roulet M, Lucotte M 1995. Geochemistry of mercury in pristine and flooded ferralitic soils of tropical rainforest in French Guiana, South America. In Porcella DB, Huckabee JW, Wheatley B, *Mercury as a Global Pollutant*, Springer Netherlands p. 1079-1088.

Roulet M, Lucotte M, Canuel R, Farella N, Courcelles M, Guimarães JR D, Mergler D, Amorim M 2000. Increase in mercury contamination recorded in lacustrine sediments following deforestation in the central Amazon. *Chemical Geology* 165(3):243-266.

Roulet M, Lucotte M, Saint-Aubin A, Tran S, Rhéault I, Farella N, Silva EJ, Dezencourt J, Passos CJS, Soares GSS, Guimarães JRD, Mergler D, Amorim M 1998. The geochemistry of mercury in central Amazonian soils developed on the Alter-do-Chão formation of the lower Tapajós River Valley, Para State, Brazil. *The Science of Total Environment* 223(1):1-24.

Schulte EE, Peters JB, Hodgson PR 1987. *Wisconsin Procedures for soil testing, plant analysis and food & forage analysis*. Department of soil Science. University of Wisconsin- Extension, Madison, 9 pp.

José V. E. Bernardi; Marcos P. Neira; Angelo G. Manzatto; Igor B. B. de Holanda; Ronaldo de Almeida; Wanderley R. Bastos; José G. Dórea; Paulo M. B. Landim; Ludgero C. G. Vieira

STATISTICA 7.0 (2007). Statistica: Data Analysis software System, Version 7.0. 2003. In: <http://www.statsoft.com/>.

Ushizima TM, Bernardi JVE, Landim PMB 2003. Estudo da distribuição espacial do angico (*Anadenanthera peregrina*) na floresta estadual "Edmundo Navarro de Andrade" – Rio Claro-SP, Brasil, empregando metodologia geoestatística. *HOLOS Environment* 3: 59-73.

Veloso HP, Rangel-Filho ALR, Lima JCA 1991. *Classificação da Vegetação Brasileira Adaptada a Um Sistema Universal*. IBGE Rio de Janeiro, 123 pp.

Wasserman JC 2001. O ciclo do mercúrio no ambiente amazônico. *Mundo & Vida* 2(1/2):1-2.

Application of Geostatistical Analysis for Spatial Modelling of Mercury and Organic Matter in Soils of Western Amazon Forest

ABSTRACT

This study was conducted in the Western Amazon, in an area located on the campus of the Federal University of Rondônia in Porto Velho, Rondônia. Were analyzed in soil samples of mercury (Hg) and organic matter (OM) concentrations in a stretch of open rain forest. The average Hg concentration was $150 \pm 28 \mu\text{g.kg}^{-1}$, whereas the concentration of OM was approximately $21.87 \pm 5.87\%$. The method used to obtain the spatial distribution patterns of Hg and OM concentrations was the indicator kriging (KI), which showed that the occurrence of Hg distribution patterns obeys controlled by geological factors in the region, rich in granitic rocks, and the morphological parameters such as soil texture clay, which has a high degree of adsorption of heavy metals. The distribution of OM in turn, is related to the large amount of litter accumulated on the soil surface, together with the presence of microorganisms, fungi and small invertebrates. The conversion of this material into humus favors vegetation growth and its high concentration influences the amount of heavy metals in soil. The model set variography showed spatial dependence among the mercury levels in the soil of the area studied in relation to the use of the bygone area. The OM and Hg determination was approximately of 0.173 and significant ($p = 0.0001$).

Keywords: Geostatistics; Indicative Kriging; Organic Matter; Western Amazonia.

Data Submissão: 08/09/2015
Data Aceite: 01/12/2015