

REFERÊNCIA GEOQUÍMICA REGIONAL PARA A INTERPRETAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE ELEMENTOS QUÍMICOS NOS SEDIMENTOS DA BACIA DO LAGO PARANOÁ - DF

Ricardo Cosme Arraes Moreira*

Companhia de Saneamento do Distrito Federal, SAIN, Área Especial S/N, ETA-R1 CAESB, 70620-000 Brasília - DF

Geraldo Resende Boaventura

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 70910-900 Brasília - DF

Recebido em 19/9/02; aceito em 14/3/03

REGIONAL GEOCHEMICAL REFERENCE FOR THE INTERPRETATION OF THE CHEMICAL ELEMENTS CONCENTRATIONS IN THE SEDIMENT SAMPLES FROM LAGO PARANOÁ WATERSHED-DF. The present study aimed at determining a regional geochemical reference for sediment samples from Lago Paranoá watershed through the formulation of geoaccumulation indexes. The need for obtaining information from areas representing low human impact was the basis of this work. Systematic evaluations of sediment from Lago Paranoá will bring valuable information regarding the potential risk that this layer represents for aquatic organisms. Thus, despite the recent water quality improvements achieved in this ecosystem, contaminants incorporated in the sediments may be remobilized for alterations in the adjacent environment. The adsorption capacity of chemical elements in sediment samples was controlled through the variation in the amounts of organic matter, the mineralogical composition and the granulometric variation. By creating the Sediment Enrichment Index (SEI) through the normalization of analytical data it was possible to establish the magnitude of this enrichment relatively to naturally occurring concentrations all over the region of interest. Normalized values with organic matter were especially useful for the evaluation of lotic systems.

Keywords: geoaccumulation index; sediment enrichment index; organic matter.

INTRODUÇÃO

Licht¹ descreve o sedimento de fundo como sendo aquele material não consolidado, distribuído ao longo dos vales do sistema de drenagem e orientado a partir da interação constante e contínua dos processos de intemperismo e erosão. Esses processos, por sua vez, atuam sobre os diversos tipos de rocha e/ou seus produtos de intemperização *in situ*, localizados na bacia de drenagem. Desta forma, as amostras de sedimento de rios, lagos e lagoas representam a integração de todos os processos que ocorrem no ecossistema aquático à montante e têm sido investigadas para elucidar a poluição ambiental atribuída aos elementos-traço e/ou substâncias tóxicas orgânicas¹⁻⁵.

Em ecossistemas aquáticos, o sedimento de fundo representa o principal compartimento de acumulação, reprocessamento e transferência dos elementos-traço⁶. Esses elementos, potencialmente disponíveis para a biota, podem ser liberados pela atividade microbiana e mudanças nos vários fatores físico-químicos que afetam o meio, incluindo pH, salinidade e condições de óxido-redução.

Rodrigues⁵ descreve que estas substâncias poluentes podem atingir os ecossistemas aquáticos por meio de fontes difusas, como o escoamento superficial de áreas agrícolas e urbanas, águas subterrâneas contaminadas, remobilização a partir do sedimento, disposição de material dragado e precipitação atmosférica, e/ou fontes pontuais, como descargas de efluentes industriais e urbanos.

O levantamento dessas informações torna possível a obtenção de ferramentas complementares que permitam definir as medidas de prevenção, correção e monitoramento adequadas à condução do processo de gestão ambiental, objetivando a manutenção ou mesmo o melhoramento da qualidade ambiental. Como exemplo dessas ferramentas cita-

se a normalização de um elemento de referência para a comparação com as concentrações de elementos-traço em sedimentos na base regional⁷⁻¹⁰. Essa prática é útil para a distinção entre os fatores de enriquecimento dos diversos constituintes químicos no sedimento, sejam eles naturais ou provenientes de atividades humanas.

A análise química de amostras de sedimentos aquáticos pode indicar a distribuição regional das concentrações naturais ou antrópicas de certos elementos. As frações mais finas de sedimento (<0,2 mm) são particularmente úteis para se estimar o grau de contaminação e distinguir fontes naturais das antrópicas¹¹.

A distribuição não uniforme dos elementos-traço nas diferentes frações granulométricas causa variações nos conteúdos de metais nas amostras de sedimentos¹². A fim de corrigir as concentrações dos diversos contaminantes, que são influenciadas pela variação natural observada na composição dos sedimentos, e possibilitar a comparação dos resultados obtidos em diferentes locais, é importante eliminar o efeito do tamanho das partículas pela separação de frações granulométricas (normalização física). Outra possibilidade é utilizar a comparação dos resultados com elementos conservativos, como alumínio, ferro, titânio ou com substâncias que apresentem grande afinidade com os contaminantes como, por exemplo, a matéria orgânica.

O presente estudo teve como objetivo a determinação de valores de referência geoquímica regional para amostras de sedimentos provenientes da bacia hidrográfica do Lago Paranoá, por meio da formulação de índices de geoacumulação. Para tanto, foram realizados estudos geoquímicos em áreas protegidas, Parque Nacional de Brasília e Estação Ecológica do Jardim Botânico de Brasília. O histórico de agressões ambientais na bacia do Lago Paranoá (lançamento de efluentes tratados e *in natura*, expansão urbana, uso e ocupação do solo, etc.), desde a época da mudança da Capital Federal para o Centro-Oeste, foi o principal parâmetro para a aplicação e avaliação da eficácia dos geoindicadores, obtidos a partir dos valores de "background".

*e-mail: rcam@unb.br

ÁREA DE ESTUDO

A área de interesse abrange a bacia do Lago Paranoá, localizada na região central do Distrito Federal, entre as latitudes 15°35' e 15°59' Sul e longitudes 47°47' e 48°05' Oeste, numa área de aproximadamente 1.034,07 km², correspondendo a cerca de 18% do DF¹³.

O Lago Paranoá pertence à bacia hidrográfica do Rio São Bartolomeu que, por sua vez, pertence à região hidrográfica do Rio Paraná. A bacia do Lago Paranoá é formada pelas unidades hidrográficas do Lago Santa Maria/Torto, Bananal, Riacho Fundo, Ribeirão do Gama, Córrego Cabeça do Veado e Lago Paranoá (Figura 1).

Na ausência de poluição, entendendo-se poluição como contribuição antrópica ou resultante de fontes naturais anômalas (atividades vulcânicas e fontes termais), os níveis de base, “background”, da maior parte dos elementos são determinados pela litologia original e pelo efeito e magnitude do intemperismo⁵. Desta forma, foram escolhidas como “background” para o estudo, as áreas protegidas das bacias do Lago Santa Maria (área de drenagem de 101km²) e do Córrego Cabeça do Veado (área de drenagem de 32km²), que estão localizadas nas porções norte e sudeste da bacia do Lago Paranoá, respectivamente (Figura 1).

As áreas que foram avaliadas mediante os níveis de “background” encontrados nas áreas de controle foram Riacho Fundo, Ribeirão do Torto e Lago Paranoá que, por sua vez, localizam-se nas porções oeste, norte e leste da bacia (Figura 1). A comparação entre os valores obtidos nas áreas de controle e os obtidos nos demais pontos, aliada a um bom conhecimento da área de estudo, poderá detectar locais mais ou menos impactados e propiciar o estabelecimento de associações com fontes antrópicas.

A bacia de drenagem do Lago Paranoá, além de contar com as contribuições dos afluentes principais (Ribeirões do Torto e Gama, Riacho Fundo, Córregos Cabeça do Veado e Bananal) e pequenos tributários, ainda recebe drenagens pluviais urbanas e efluentes de duas Estações de Tratamento de Esgotos, as ETEB Sul e Norte¹³.

Geologia e Geomorfologia

A geologia da bacia do Lago Paranoá é constituída por rochas pertencentes ao Grupo Paranoá com idade Meso/Neoproterozóico,

por coberturas detrito-lateríticas do terciário-quaternário e por aluviões recentes do quaternário¹⁴.

O Grupo Paranoá corresponde a uma unidade psamo-pelito-carbonatada de idade mesoproterozóica, interpretada como uma seqüência de deposição plataformar com variações na lâmina d'água no decorrer do tempo¹⁵. Dentre as onze unidades individualizadas do Grupo Paranoá¹⁴, as quatro unidades de topo são expostas na bacia do Lago Paranoá (Figura 1), denominadas da base para o topo de **S** (metassiltitos), **A** (ardósias), **R3** (metarritmito arenoso) e **Q3** (quartzito).

Freitas-Silva e Campos¹⁷ descrevem as coberturas terciário-quaternárias como provenientes de processos de intemperismo predominantemente químico, sob condicionantes geológicos, climáticos, topográficos, morfológicos, dentre outros, durante o Cenozóico. Estes processos proporcionaram o desenvolvimento de um extenso manto de intemperismo que alcança espessuras maiores que 50 m.

As porções mais elevadas do relevo (regiões de chapada ou chapadas elevadas) associam-se predominantemente às unidades R3 e Q3 do Grupo Paranoá. Estas unidades, por serem compostas majoritariamente por rochas psamíticas, apresentam maior resistência à erosão que as outras unidades e tendem a definir relevos mais elevados. As regiões de dissecação intermediárias são controladas por rochas pelíticas. Os rebordos e as escarpas são controlados pela região de transição ou contato brusco entre litologias com alto contraste de erodibilidade. A geologia é a principal condicionante das variações de altitude, incisão de vales, densidade, forma da rede de drenagem e, principalmente, da evolução morfodinâmica e da paisagem atual do DF¹⁶⁻¹⁷.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiais e métodos

A coleta de amostras contou com o apoio da Seção de Análises Físico-Químicas da Companhia de Saneamento do Distrito Federal (CAESB) e os procedimentos analíticos foram realizados nos laboratórios da Divisão de Monitoramento da Qualidade da Água – DVMQ/CAESB e nos laboratórios da Universidade de Brasília (Geoquímica – IG/UnB, Raios-X – IG/UnB).

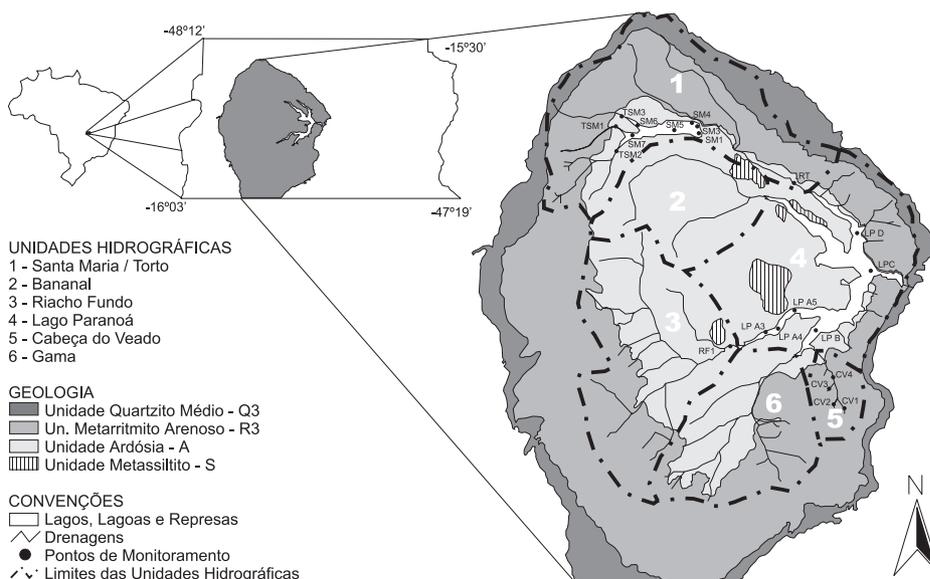


Figura 1. Localização dos pontos de monitoramento e da bacia do Lago Paranoá no Mapa Geológico Simplificado do Distrito Federal. Modificada das referências 13 e 16

Para definição da localização dos pontos de amostragem na bacia do Lago Paranoá foram utilizados mapas hidrogeológicos do DF, cartas SICAD (Sistema Cartográfico do Distrito Federal) e mapas do IBGE-DF. A identificação em campo foi facilitada pelo uso de aparelhos de geoposicionamento.

A partir da análise de informações cartográficas, foram escolhidos nove pontos de coleta na bacia do Lago Santa Maria (sendo seis no reservatório e três nos tributários), quatro na bacia do Córrego Cabeça do Veado, seis no Lago Paranoá e dois nos ribeirões Riacho Fundo e Torto (Figura 1).

As coletas de sedimento de fundo foram realizadas nos meses de março e abril de 2001 (período chuvoso).

Amostras

Para a coleta das amostras de sedimentos de fundo foi necessário o uso da draga de Eckman, nos pontos onde a profundidade não permitia a coleta direta do material. Após a coleta, o sedimento foi acondicionado em béqueres de polietileno (previamente lavados com ácido nítrico 1:1), lacrados com filme plástico e transportados para o laboratório. O material foi, então, submetido à secagem a temperatura ambiente, quarteada, sendo uma parte separada para as análises químicas, outra para a avaliação mineralógica e granulométrica e as outras duas estocadas como contra-provas. As amostras submetidas às determinações químicas e de granulometria foram desagregadas e peneiradas em sua fração menor que 2mm (Terra Fina Seca ao Ar – TFSA) retirando-se, assim, restos de plantas, pedregulhos e objetos maiores.

Procedimentos analíticos

Os procedimentos utilizados no trabalho foram definidos por meio de uma metodologia própria de análise utilizando-se, sempre que possível, as amostras para o controle analítico dos resultados, como as referências de solo do “National Institute of Standards and Technology – NIST” (“San Joaquin Soil”). Estas amostras de referência foram utilizadas para estudar as interferências causadas pelos elementos majoritários e para garantir o controle analítico dos resultados¹⁸. Nenhum parâmetro analisado, que apresentasse erro maior que 10% em relação ao padrão de referência, foi considerado neste trabalho.

Todas as análises foram realizadas com o uso de água ultrapura (resistividade de 18,2 MΩcm) e reagentes Merck ou similares. O ácido nítrico foi purificado pelo processo de sub-ebulição em equipamento apropriado.

Para as determinações químicas procedeu-se ao peneiramento das amostras para a separação das frações entre 0,212 e 0,150 mm; 0,150 e 0,045 mm e inferiores a 0,045 mm.

A decomposição total das amostras utilizadas neste trabalho seguiu o procedimento proposto por Boaventura¹⁸, consistindo na abertura ácida com HF/HNO₃/HClO₄/HCl.

Determinações

As análises das amostras foram processadas com a utilização do Espectrômetro de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado modelo Spectroflame FVM 03 da “Spectro Analytical Instruments”, equipado com policromador a vácuo e monocromador com rede holográfica de 2400 estrias/mm, onde foram determinadas as concentrações dos seguintes elementos: Zn, Ti, Ni, Cr, Be, Cu, Y, Ba, V e Sr.

Os extratos totais também foram utilizados para as determinações de Na, K e Al e¹⁹.

O P foi analisado pelo método do ácido ascórbico, após abertura ácida com HNO₃/H₂SO₄¹⁹.

As determinações de matéria orgânica na fração <0,045 mm foram realizadas pelo método de Walkley-Black modificado, constante no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa²⁰.

As análises mineralógicas das frações <0,045 mm foram executadas a partir da técnica de Difratomia de Raios-X - DRX. O material não orientado, referente à fração silte+argila, foi preparado em lâminas vazadas de alumínio e analisado com varredura de 2° a 60°, com velocidade de 2°/min. Para isso, utilizou-se o aparelho difratômetro RIGAKU – D/ MAX – 2 A/C, do Laboratório de Raios-X da UnB, operando com o tubo de cobre, 40 kV e 20 mA. A partir dos difratogramas, os minerais foram identificados com o auxílio do “software” JADE 3.0 da MDI, utilizando-se o banco de dados mineralógicos do “International Center for Diffraction Data” (ICDD).

As amostras SM1, TSM1 e TSM2 tiveram a fração argila separada para análise. As argilas foram orientadas nas lâminas por meio da técnica de esfregaço (argila orientada). Posteriormente, as lâminas secas ao ar, as glicoladas e as aquecidas (490 °C/4 h) foram analisadas com varredura de 2° a 35° e velocidade de 2°/min, conforme procedimento de rotina no laboratório supracitado.

A análise granulométrica dos sedimentos foi feita pelo método de pipetagem, que é baseado na lei de sedimentação de Stokes²⁰.

Tratamento dos dados

O teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov, sobre os dados não classificados, foi utilizado para verificar o tipo de distribuição que melhor se ajustava a cada um dos elementos analisados.

A maior diferença absoluta entre a frequência acumulada observada e a distribuição esperada é quantificada como Kolmogorov D-max. Se o teste de Kolmogorov-Smirnov é estatisticamente significativo, rejeita-se a hipótese nula, na qual se estipula que os dados observados seguem a distribuição testada²¹.

Classificação hierárquica (“cluster analysis”)

A classificação hierárquica serve essencialmente para agrupar os dados de acordo com o grau de “proximidade” ou “parentesco” entre os objetos, nos diferentes níveis. Dentre os métodos de classificação hierárquica utilizou-se o método da árvore hierárquica (“Tree Clustering”). Este método utiliza as distâncias entre os objetos quando da formação dos grupos, que são baseadas em dimensões simples ou múltiplas. Neste trabalho foi utilizada a distância euclidiana.

O método de Ward parte de uma análise de variância para avaliar as distâncias entre grupos (“cluster”). Este método tenta minimizar a soma dos quadrados de quaisquer dois grupos hipotéticos que poderão se formar em cada passo²¹. Desta forma, o método supracitado ajuda a minimizar a perda de informação de cada etapa no processo de agrupamento.

Índice de geoacumulação

Para a avaliação da intensidade da contaminação do sedimento foi empregado o índice de geoacumulação proposto por Müller²². Este índice estabelece a relação entre os teores de metais encontrados na região em análise e um valor referencial equivalente à média mundial para metais associados às argilas²²⁻²³. O valor obtido permite classificar os níveis de enriquecimento dos metais em sete extratos, com intensidades progressivas de contaminação.

Este índice é calculado por meio da fórmula:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 (C_N / 1,5C_B)$$

onde:

C_n = concentração do elemento n na fração argila (<0,002 mm) do sedimento a ser classificado;

C_b = concentração média de “background” para argilas na crosta terrestre (folhelho médio padrão);

1,5 = fator de correção para possíveis variações do “background” causado por diferenças litológicas.

Este índice consiste em sete classes distintas, que variam de 0 a 6 e estão relacionadas com o grau crescente de contaminação. O valor mais alto corresponde a um enriquecimento de aproximadamente 100 vezes em relação ao nível de “background”.

Neste trabalho, o cálculo dos índices foi adaptado às concentrações obtidas na fração silte/argila <0,045 mm. Sendo assim, C_n passa a ser a concentração do elemento n na fração silte+argila do sedimento a ser classificado e C_b , a concentração média de “background” da área de controle. Este procedimento possibilitou a melhor representação das contribuições litológicas das áreas de estudo.

Índice de Enriquecimento do Sedimento (IES)

Para uma avaliação geral da qualidade dos sedimentos foi adaptado, a partir da metodologia proposta por Liu e colaboradores²⁴, o Índice de Enriquecimento do Sedimento – IES, que varia de 1 a 100, de acordo com o menor ou maior enriquecimento da amostra, respectivamente.

Para a determinação dos IES foi necessária a normalização dos teores dos elementos investigados, em relação aos teores de matéria orgânica obtidos tanto nos pontos de controle quanto nos locais do estudo. Para tanto, foram utilizados os resultados obtidos para a fração <0,045 mm.

$$EN = \frac{[E_{amostra}] \div [MO_{amostra}]}{[E_{back}] \div [MO_{back}]}$$

onde:

EN = Elemento Normalizado

$[E_{amostra}]$ = concentração do elemento na amostra avaliada;

$[MO_{amostra}]$ = concentração de matéria orgânica na amostra;

$[E_{back}]$ = concentração média de “background” do elemento;

$[MO_{back}]$ = concentração média de “background” de matéria orgânica.

Os valores normalizados dos elementos Al, Zn, Ni, Cr, Be, Cu, Ba, V, Sr, P, Ti, Na, K e Ca foram utilizados para o cálculo do IES. A escolha desses elementos deveu-se à associação com os principais compartimentos do sedimento de fundo (análise de agrupamento), representando tanto a influência litológica quanto antrópica na distribuição de P e metais na área de estudo. O IES é calculado por meio das equações a seguir:

$$EN_i = \sum_{j=1}^m EN_{ij}$$

$$IES = 1 + (100 - 1) \times \frac{EN_i - EN_{\min}}{EN_{\max} - EN_{\min}}$$

Onde EN_{ij} representa o valor normalizado do j-ésimo elemento na i-ésima amostra, EN_{\max} e EN_{\min} são os valores máximos e mínimos encontrados em todos os EN_i , m e IES são os números de elementos químicos selecionados e Índice de Enriquecimento do Sedimento, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de sedimento constantes neste trabalho foram todos apresentados na base seca, uma vez que foram corrigidos pela umidade relativa que o sedimento registrava no momento da análise (105 °C).

Granulometria

A determinação granulométrica dos sedimentos de fundo dos pontos de amostragem teve como principal objetivo a avaliação dos compartimentos correspondentes às frações areia grossa/areia fina/silte/argila (Tabela 1).

Tabela 1. Composição granulométrica do sedimento de fundo das amostras coletadas na bacia do Lago Paranoá

Ambiente	Pontos	% Areia Grossa	% Areia Fina	% Silte	% Argila
Lótico	CV1	17,9	57,3	15,7	9,1
	CV2	5,2	32,2	47,8	14,8
	CV3	27,4	47,4	9,8	15,4
	CV4	5,1	44,4	37,4	13,1
	TSM1	30,3	34,2	23,7	11,8
	TSM2	26,1	40,5	22,2	11,2
	TSM3	33,0	17,9	20,4	28,7
	RF1	1,0	65,4	25,7	7,9
	RT	4,8	80,0	7,3	7,9
	Lêntico	SM1	58,8	23,8	10,2
SM3		8,2	30,3	35,8	25,7
SM4		25,8	19,3	35,8	19,1
SM5		21,5	31,4	21,7	25,4
SM6		1,8	28,3	41,8	28,1
SM7		23,5	42,7	10,9	22,9
LP A3		0,3	5,3	66,2	28,2
LP A4		0,4	0,2	71,3	28,1
LP A5		0,2	0,2	54,0	45,6
LP B		0,0	1,3	43,5	55,2
LPC		2,3	2,0	46,0	49,7
LP D		0,3	1,2	46,6	51,9

Como todas as determinações foram realizadas utilizando-se a terra fina seca ao ar (TFSA), desprezou-se constituintes maiores como seixos, folhas, raízes, etc. Este procedimento permitiu avaliar os principais compartimentos que concentram os elementos-traço, além de fazer inferências a respeito da energia hidrodinâmica do sistema e das condições ambientais de sedimentação²³.

Um bom exemplo de competência para o transporte de partículas foi obtido com as amostras do Riacho Fundo e do braço do Riacho Fundo no Lago Paranoá. A energia do sistema pode ser interpretada como que diminuindo no sentido da corrente:

Energia Maior = RF1 > LP A3 > LP A4 > LP A5 = Energia Menor

Nos demais pontos do Lago Paranoá, representados pelas amostras LP B, LPC e LP D, os sedimentos apresentam o predomínio da fração argila, diferentemente do que ocorre com as amostras do braço do Riacho Fundo. Esse fato pode ser atribuído às relações existentes entre o volume de água que aporta ao Lago e as dimensões do braço (volume, profundidade, largura). De todos os segmentos do lago, o braço do Riacho Fundo é o mais estreito e raso, conferindo-lhe uma característica peculiar, que é a menor resistência à entrada

das águas do principal tributário do Lago Paranoá. Desta forma, o braço do Riacho Fundo mostra-se um pouco mais competente que seus afins, no tocante ao transporte de partículas.

A dinâmica das partículas no Lago Santa Maria não difere muito da observada no Lago Paranoá. No entanto, fica evidente que no Lago Santa Maria e seus respectivos tributários predominam sedimentos mais grosseiros que no Lago Paranoá devido, provavelmente, à influência geológica dos arenitos do Grupo Paranoá.

A entrada do material particulado proveniente dos afluentes no Lago Santa Maria também provoca o assoreamento na entrada dos braços. No Lago Santa Maria o braço do Ribeirão Santa Maria (SM7) apresenta predominantemente os sedimentos arenosos, enquanto que no braço dos córregos Milho Cozido e Vargem Grande prevalecem os sedimentos mais finos (SM6).

No sentido da corrente, o ponto SM5 é bastante influenciado pelas águas do Ribeirão Santa Maria e apresenta predomínio das areias, apesar do substancial aumento nos percentuais dos sedimentos finos, se comparados aos do SM7.

Já no vertedouro do reservatório (SM4), ainda sob a influência do principal afluente e apresentando o mesmo comportamento do ponto central (SM5), nota-se a redução dos sedimentos grosseiros e dominância da fração silte.

Os pontos SM1 e SM3 foram coletados nas proximidades dos pontos de captação de água e sofrem a influência da barragem do Lago Santa Maria. Na margem sul (SM1) há a presença das ardósias em avançado estágio de intemperismo e na margem norte há acúmulo de material fino com aspecto pastoso.

Mineralogia

As determinações quantitativas dos vários minerais identificadas nas análises da fração silte+argila não foram realizadas. No entanto, pela comparação das intensidades dos picos dos minerais registrados nos difratogramas foi possível obter informações importantes sobre a dinâmica dos sistemas.

As intensidades dos picos de quartzo, registradas em $d=4,26$, foram comparadas com as intensidades das reflexões maiores $d=10,0$; $7,0$ e $4,85$, correspondentes aos picos de illita, caulinita e gibbsita, respectivamente.

No Jardim Botânico foram encontrados basicamente os mesmos minerais constituintes nos pontos CV1, CV2, CV3 e CV4: quartzo, caulinita, illita, gibbsita, anatásio, rutilo e goetita. As illitas apresentaram menor proporção do que caulinitas, gibbsitas e quartzo em todos os pontos, mostrando apenas uma discreta contribuição dos níveis argilosos do metarritmito-R3 na composição desses sedimentos. As proporções de caulinita e gibbsita podem estar associadas tanto ao intemperismo quanto à composição do material original.

No Parque Nacional de Brasília destacam-se dois grupos, quanto à composição mineralógica. O primeiro, composto pelas amostras SM6, TSM1 e TSM2, é caracterizado pela alta intensidade dos picos de quartzo, explicada pela influência dos quartzitos e metarritmitos arenosos nas drenagens, e pela presença de rutilo, goetita, anatásio, vermiculita, illita, gibbsita e caulinita. Estes três últimos minerais apresentam picos de intensidade semelhante, embora em quantidades traço. Análises da fração argila (técnicas de argila orientada, glicolagem e aquecimento) das amostras TSM1 e TSM2 indicaram a presença de vermiculita. Esse mineral foi ainda identificado em outros pontos do Lago Santa Maria, Ribeirão do Torto e Lago Paranoá.

O outro grupo, referente às amostras SM1, SM3, SM4, SM5 e SM7, apresentou picos de quartzo com menores intensidades que o agrupamento anterior, além dos minerais rutilo, goetita, anatásio, vermiculita, hematita, diásporo, gibbsita, caulinita e illita. Com relação aos três últimos minerais ocorre maior proporção de caulinita e

gibbsita que illita, à exceção do ponto SM1. Neste ponto, a intensidade da reflexão $d=10,0$ da illita é maior do que a dos outros minerais, refletindo a influência das ardósias inundadas em virtude do enchimento do reservatório. Ainda no SM1, a análise da fração argila (argila orientada, glicolagem e aquecimento) mostra picos mais intensos da caulinita, seguido da illita e gibbsita. O quartzo e a vermiculita estão ausentes nesta fração, embora estejam sugeridas na fração silte.

Nas amostras do Lago Paranoá e tributários foram identificados os minerais quartzo, gibbsita, rutilo, goetita, anatásio, illita, caulinita e hematita. Da mesma forma como é característico no Lago Santa Maria, foi detectada a presença de vermiculita no Ribeirão do Torto (RT), que recebe as águas do Lago Santa Maria, e no braço do Ribeirão do Torto no Lago Paranoá. Nestes pontos, a proporção de quartzo predomina sobre illita e caulinita que, por sua vez, são similares entre si e maiores que a de gibbsita.

No Ribeirão Riacho Fundo e nos pontos do Lago Paranoá (LP A3, LP A4 e LP A5) nota-se a predominância do mineral illita sobre caulinita e gibbsita. A contribuição da illita aumenta no sentido do riacho para o braço do Lago Paranoá, ou seja, segue a distribuição $RF1 < LP A3 < LP A4 < LP A5$. Já o quartzo obedece ao sentido inverso, confirmando o comportamento observado na variação da granulometria desses sedimentos, que se tornam mais finos no sentido do Lago.

No braço do Ribeirão do Gama no Lago Paranoá (LP B) e no ponto central, o predomínio é da gibbsita sobre quartzo, illita e caulinita.

Resumidamente, a distribuição mineralógica é fortemente influenciada pela geologia da região. Sendo assim, os termos mais argilosos e silto-argilosos foram descritos como compostos por argilominerais, quartzo e uma grande infinidade de óxidos e hidróxidos, enquanto que, havendo um incremento na granulometria, o quartzo predomina sobre os filossilicatos nos níveis sílticos¹⁷.

Análise de grupos

O teste de Kolmogorov-Smirnov foi utilizado para a avaliação do tipo de distribuição que melhor se ajusta a cada um dos componentes. Desta forma, Ni, Cu, Y, Ba, Sólidos Voláteis (SV), P, Na₂O, CaO, fração <0,045 mm (finos) e Matéria Orgânica (MO) ajustam-se melhor a uma distribuição lognormal, enquanto TiO₂, Zn, Cr, Be, V, Sr, Al₂O₃ e K₂O, a uma distribuição normal.

Os dados originais ou após anamorfose logarítmica foram utilizados mediante resultados obtidos pelo Teste K-S para a construção dos agrupamentos.

No agrupamento por parâmetros foram obtidos dois grupos principais, considerando-se um grau de amalgamação de 11 (Figura 2).

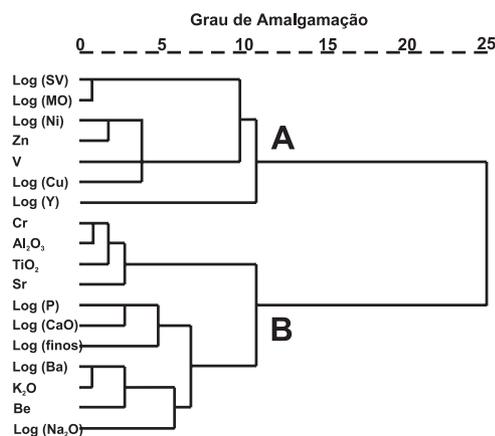


Figura 2. Dendrograma dos agrupamentos formados pela similaridade entre as variáveis na bacia do Lago Paranoá

No grupo A os sólidos voláteis, dos quais merece destaque a matéria orgânica, podem estar exercendo forte controle sobre a distribuição dos elementos-traço Ni, Zn, Y, V e Cu.

No grupo B é determinante a influência da granulometria e mineralogia. Este grupo é formado pelo Cr e Sr que tendem a associar-se ao Al e Ti, provenientes dos minerais argilosos (filossilicatos e óxidos de Al e Ti). Também as frações finas do sedimento (<0,045 mm) estão destacadas no grupo B. A afinidade deste compartimento com os elementos menores P, Ca, Na e com o elemento maior K reflete a composição dos produtos de intemperismo.

Os elementos menores P e Ca tendem a ser controlados pelas frações finas do sedimento. A importância das argilas para a adsorção de P em águas continentais tropicais e a maior concentração dos elementos neste compartimento foram os principais motivos para a investigação deste elemento na fração <0,045 mm. Os principais processos de adsorção atuantes são a ligação química da carga negativa do fosfato com a positiva das bordas das argilas e a substituição do fosfato por silicatos da argila².

A retenção de Ba, assim como de outros cátions alcalino-terrosos (Be, Ca, Sr) foi controlada pela capacidade de troca catiônica dos minerais contidos nos sedimentos finos.

Índice de Geoacumulação - I_{Geo}

Pela comparação dos resultados das análises de sedimentos obtidos na bacia do Lago Paranoá com os valores médios mundiais dos elementos associados às argilas²⁶, obteve-se a seguinte situação: as faixas de concentrações dos elementos Cr, Cu e Ti na bacia são superiores à média mundial; P, Al e V são superiores apenas na faixa de concentração obtida para a área teste; os valores de Be, Ba, Sr, Na, K e Ca dos sedimentos da bacia do Lago Paranoá estão abaixo dos valores médios da crosta terrestre. Essas variações foram consideradas críticas para o uso das concentrações médias mundiais no cálculo do I_{Geo} , uma vez que o uso de tais valores poderia estar “puxando” os resultados para um lado da escala. Optou-se por utilizar a média dos resultados obtidos na área de controle, considerando-se ser esta

a mais adequada para a avaliação litológica da área de estudo (Tabela 4).

De acordo com os valores obtidos para os índices de geoacumulação, os parâmetros são classificados em 7 classes relacionadas ao grau de poluição, conforme Tabela 2.

Como podem ser observados na Tabela 3, os índices mais elevados foram obtidos para P (LPC), K_2O (LP A5) e CaO (SM4).

O Ca obtido nas proximidades do vertedouro do Lago Santa Maria pode ter origem tanto litológica (lentes de calcário), quanto na própria hidrodinâmica do reservatório, uma vez que o sedimento do ponto SM4 foi coletado na região mais profunda do Lago Santa Maria, em um local tipicamente de deposição.

As concentrações de K no ponto LP A5 têm a sua origem mais provável na granulometria da amostra e mineralogia da região. O ponto LP A5 é o que apresenta o maior teor de sedimentos finos (silte + argila), perfazendo 99,6% do total. É também no ponto LP A5, conforme descrito anteriormente, que há um aumento gradual de ilitas e da fração argila no sentido da corrente do braço do Riacho Fundo no Lago Paranoá, principalmente. No entanto, não é descartada a contribuição antrópica para esse elemento, uma vez que é muito utilizado na agricultura como fertilizante e na composição de pesti-

Tabela 2. Classificação dos parâmetros pelo índice de geoacumulação, conforme o grau de poluição

Classificação	Classe do I_{Geo}	I_{Geo} Média “Background”
Extremamente Poluído	6	>5
Fortemente à Extremamente Poluído	5	>4 a 5
Fortemente Poluído	4	>3 a 4
Moderadamente à Fortemente Poluído	3	>2 a 3
Moderadamente Poluído	2	>1 a 2
Não Poluído a Moderadamente Poluído	1	>0 a 1
Praticamente Não Poluído	0	<0

Tabela 3. Índices de Geoacumulação

Amostras	Classe I_{Geo}					
	0	1	2	3	4	5 6
< 0,045 mm	CV1	Cr,Be,Cu,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Na ₂ O,K ₂ O,CaO	Zn,Ni,SV,MO			
	CV2	Zn,Cr,Be,Y,Ba,V,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Ni,SV,Na ₂ O,K ₂ O,MO	Cu,Sr,CaO			
	CV3	Zn,Cr,Be,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,SV,Na ₂ O,K ₂ O,CaO,MO	Ni,Cu			
	CV4	Zn,Cr,Be,Cu,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,SV,Na ₂ O,K ₂ O,CaO,MO	Ni			
	SM1	Zn,Cr,Be,Cu,Y,V,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Ni,SV,CaO,MO	Ba,Sr,Na ₂ O,K ₂ O			
	SM3	Zn,Be,Cu,Y,Ba,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,SV,CaO,MO	Ni,Cr,V,Sr,Na ₂ O,K ₂ O			
	SM4	Zn,Cr,Be,Cu,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,Na ₂ O	Ni,SV,P,K ₂ O,MO	CaO		
	SM5	Zn,Cr,Be,Cu,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,Ni,Na ₂ O,K ₂ O,CaO	SV,P,MO			
	SM6	Zn,Cr,Be,Cu,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Ni,SV,Na ₂ O,K ₂ O,CaO,MO				
	SM7	Zn,Cr,Be,Cu,Y,Ba,Sr,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Ni,SV,Na ₂ O,K ₂ O,CaO	V,MO			
	TSM1	Zn,Cr,Be,Cu,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Ni,SV,Na ₂ O,K ₂ O,CaO,MO				
	TSM2	Zn,Cr,Be,Cu,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Ni,SV,Na ₂ O,K ₂ O,CaO,MO				
	TSM3	Zn,Cr,Be,Cu,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Ni,SV,Na ₂ O,K ₂ O,CaO,MO				
	RT	Zn,Cr,Be,Cu,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Ni,SV,Na ₂ O,CaO,MO	K ₂ O			
	RF1	Zn,Cr,Be,Cu,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Ni,SV,Na ₂ O,MO	K ₂ O,CaO			
	LP A3	Zn,Cr,Be,Cu,Y,V,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Ni,SV,Na ₂ O,MO	Ba,Sr,K ₂ O,CaO			
	LP A4	Cr,Be,Cu,Y,V,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,SV,Na ₂ O,MO	Zn,Ni,Ba,Sr,P,K ₂ O,CaO			
	LP A5	Cr,Be,Cu,Y,V,TiO ₂ ,SV,MO	Zn,Ni,Ba,Sr,Al ₂ O ₃ ,P,Na ₂ O,CaO	K₂O		
	LP B	Zn,Cr,Be,Cu,Y,V,Sr,TiO ₂ ,SV,Na ₂ O,CaO,MO	Ni,Ba,Al ₂ O ₃ ,P,K ₂ O			
	LPC	Zn,Cr,Be,Cu,Y,Ba,V,Sr,Al ₂ O ₃ ,TiO ₂ ,Ni,SV,Na ₂ O,CaO,MO	K ₂ O	P		
	LP D	Zn,Cr,Be,Cu,Y,V,Al ₂ O ₃ ,P,TiO ₂ ,Ni,SV,Na ₂ O,CaO,MO	Ba,Sr,K ₂ O			

cidas, bem como no uso doméstico em sabões, detergentes, inseticidas e outros produtos. A contribuição antrópica de K no braço do Riacho Fundo do Lago Paranoá não parece ser tão significativa quanto a contribuição natural, porque os metais pesados, freqüentemente encontrados na composição química de vários produtos supracitados, apresentaram baixos índices nesta região.

O ponto LPC, localizado na região mais profunda do Lago Paranoá, está sujeito a variações sazonais dos teores de oxigênio dissolvido, incluindo períodos mais longos de anoxia. Sendo assim, grande parte da matéria orgânica pode ser preservada, contribuindo para o enriquecimento do elemento P nesta área. Aliado a isto está a forma em V do Lago Paranoá que propicia, nesta região em particular, o lugar ideal para acúmulo de sedimentos e, conseqüentemente, P sedimentar.

A classificação final dos sedimentos da bacia do Lago Paranoá pode ser obtida pelas faixas de concentrações dos seus principais constituintes, conforme apresentado na Tabela 4.

Índice de enriquecimento do sedimento

A normalização em função da matéria orgânica deveu-se a sua importância no meio aquático, seja pela ciclagem de nutrientes e manutenção da biota, seja pela formação de complexos estáveis com os elementos-traço. O controle da mobilidade ou retenção dos elementos-traço na interface sedimento-água pode estar relacionado ao estado de oxidação do meio e aos diferentes teores de matéria orgânica e substâncias húmicas nos sedimentos.

Como o P é considerado um dos principais responsáveis pela eutrofização de reservatórios, especial atenção deu-se a esse elemento. A normalização do P com a matéria orgânica, P_{MO} , forneceu importantes informações sobre a dinâmica desse elemento no meio aquático, uma vez que a matéria orgânica é um dos principais agentes complexantes e um indicador das condições redox no meio aquático.

O P_{MO} apresentou os maiores valores para as amostras na área teste, ou seja, nas amostras referentes ao Lago Paranoá e aos ribeirões Torto e Riacho Fundo (Figura 3). Destacam-se os fatores obtidos nas amostras LP A5, sob influência do lançamento de efluentes da Estação de Tratamento de Esgotos Sul, de esgotos clandestinos e LPC. Sendo este último o principal sítio de acumulação de sedimentos.

Pela Figura 3 é possível notar a distribuição do P_{MO} no Lago Paranoá, onde se identifica o enriquecimento significativo no ponto central do reservatório.

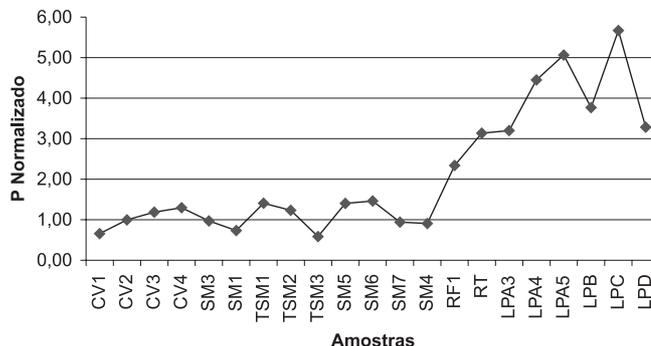


Figura 3. Fósforo normalizado

Três dos quatro braços do Lago Paranoá foram estudados neste trabalho. Neste contexto, pode-se observar as seguintes seqüências desde os tributários até o ponto central do lago (Figura 3):

- Riacho Fundo <LP A3 <LP A4 <LP A5 < LPC;
- Córrego Cabeça do Veado (CV1; CV2; CV3; CV4) <LP B <LPC;
- Ribeirão do Torto <LP D <LPC.

Para a avaliação da qualidade dos sedimentos foi adaptado, a partir da metodologia proposta por Liu e colaboradores²⁴, o IES, que varia de 1 a 100, de acordo com o menor ou maior enriquecimento da amostra, respectivamente.

Os pontos localizados no Lago Paranoá, especificamente no braço do Riacho Fundo, são caracterizados por se situarem em ambientes relativamente rasos, possibilitando uma boa oxigenação das águas o ano inteiro o que, conseqüentemente, permite a degradação da matéria orgânica. Os elementos químicos que se encontravam ligados à matéria orgânica podem ser disponibilizados para a coluna d'água e provocar riscos ao meio ambiente.

Os relatos de Burnett e colaboradores²⁵ sobre duas sucessivas mortandades de peixes no Lago Paranoá confirmam a importância que deve ter o monitoramento dos sedimentos de fundo. Os autores relatam que houve uma mortandade de 150 toneladas de peixes, em 1997, no Lago Paranoá, na sua quase totalidade referente a duas espécies de tilápias (*Oreochromis niloticus* e *Tilapia rendalli*), assim como a ocorrência de uma nova mortandade de 150 toneladas no ano seguinte. Segundo os autores, ambas foram provocadas por pulsos naturais (inversão térmica e fortes chuvas, respectivamente), a que foram atribuídas a ressuspensão do sedimento de fundo provo-

Tabela 4. Referência Geoquímica para as concentrações de sedimentos na bacia do Lago Paranoá

L. Detecção ($\eta\text{g/mL}$)	Média de "Background"	Classe do I_{Geo}							
		0	1	2	3	4	5	6	
Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$)	0,46	48,7	< 73	74 - 146	147 - 292	293 - 584	585 - 1169	1170 - 2337	2338 - 4675
Ni ($\mu\text{g g}^{-1}$)	3,86	16,81	< 25	26 - 50	51 - 101	102 - 202	203 - 403	404 - 807	808 - 1613
Cr ($\mu\text{g g}^{-1}$)	0,95	81	< 122	123 - 243	244 - 486	487 - 972	973 - 1944	1945 - 3888	3889 - 7776
Be ($\mu\text{g g}^{-1}$)	0,13	1,59	< 2,4	2,5 - 4,8	4,9 - 9,6	9,7 - 19,1	19,2 - 38,3	38,4 - 76,5	76,6 - 153,1
Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$)	0,66	40,25	< 60	61 - 121	122 - 241	242 - 483	484 - 966	967 - 1932	1933 - 3864
Y ($\mu\text{g g}^{-1}$)	0,3	23,18	< 35	36 - 70	71 - 139	140 - 278	279 - 556	557 - 1112	1113 - 2225
Ba ($\mu\text{g g}^{-1}$)	0,4	227,16	< 341	342 - 681	682 - 1363	1364 - 2726	2727 - 5452	5453 - 10904	10905 - 21807
V ($\mu\text{g g}^{-1}$)	4,4	113,1	< 170	171 - 339	340 - 679	680 - 1357	1358 - 2714	2715 - 5429	5430 - 10858
Sr ($\mu\text{g g}^{-1}$)	9,5	19,3	< 29	30 - 58	59 - 116	117 - 232	233 - 463	464 - 926	927 - 1852
P ($\mu\text{g g}^{-1}$)	20	1228	< 1841	1842 - 3683	3684 - 7365	7366 - 14731	14732 - 29461	29462 - 58923	58924 - 117845
TiO ₂ (mg g^{-1})	0,46	11,9	< 17,9	18,0 - 35,7	35,8 - 71,4	71,5 - 143	144 - 286	287 - 571	572 - 1000
Na ₂ O (mg g^{-1})	50	0,85	< 1,3	1,4 - 2,6	2,7 - 5,1	5,2 - 10,2	10,3 - 20,5	20,6 - 40,9	41,0 - 81,9
K ₂ O (mg g^{-1})	50	6,41	< 9,62	9,63 - 19,2	19,3 - 38,5	38,6 - 76,9	77,0 - 154	155 - 308	309 - 616
CaO (mg g^{-1})	2,07	2,31	< 3,46	3,47 - 6,92	6,93 - 13,8	13,9 - 27,7	27,8 - 55,4	55,5 - 111	112 - 221

cando, entre outras coisas, déficit de oxigênio na coluna d'água e morte dos peixes.

A análise da Figura 4 demonstra que o braço do Riacho Fundo representa um local de enriquecimento significativo de elementos químicos. Esse enriquecimento foi representativo para os 14 elementos avaliados (Zn, Ni, Cr, Be, Cu, Ba, V, Sr, P, Ti, Na, K, Al e Ca). Como pode ser visto na análise de agrupamentos, esses elementos estão associados aos principais compartimentos do sedimento de fundo. As contribuições naturais e antrópicas advindas do Riacho Fundo, da usina de tratamento de lixo, do lançamento clandestino de esgotos e da Estação de Tratamento de Esgotos Sul (ETEBSul) devem ser consideradas como as mais importantes.

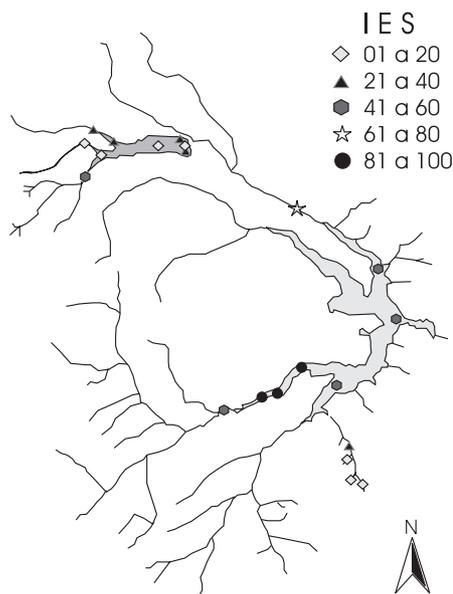


Figura 4. IES na bacia do Lago Paranoá

CONCLUSÃO

Os estudos de mineralogia, granulometria, geologia e determinações dos elementos químicos nos sedimentos permitiram concluir que as áreas de controle escolhidas, sub-bacia do Lago Santa Maria e Córrego Cabeça do Veado, foram adequadas para o monitoramento da bacia do Lago Paranoá.

A seleção e análise das frações finas do sedimento de fundo atuaram como importantes ferramentas para a avaliação e localização dos diversos contaminantes nas regiões de interesse. A capacidade de adsorção desses poluentes nas amostras foi controlada pela variação das quantidades de matéria orgânica, pela composição mineralógica e pela variação granulométrica.

As variações obtidas nas concentrações dos elementos nos sedimentos de fundo da bacia do Lago Paranoá podem estar relacionadas tanto à geologia e às condições hidrodinâmicas, quanto aos aportes antrópicos.

As altas concentrações de vários elementos químicos foram obtidas nas regiões de baixa velocidade de corrente das drenagens ou recirculação, que promoveram o acúmulo de sedimentos finos (silte e argila) e matéria orgânica.

A separação granulométrica dos sedimentos em três frações (0,212-0,150 mm; 0,150-0,045 mm e < 0,045 mm), reduziu a variação dos resultados analíticos, mas não foi suficiente para explicar as prováveis contaminações nos ambientes lóticos (Ribeirão do Torto e Riacho Fundo). Esse fato foi atribuído à abundância de quartzo nes-

sas amostras, onde o maior percentual de sílica "mascarou" os resultados dos elementos-traço.

Somente após a normalização dos elementos com a matéria orgânica foi possível estabelecer a magnitude do enriquecimento. Essa normalização elimina interferências, como a quantidade de quartzo na amostra, e mostrou-se adequada aos estudos ambientais, uma vez que possibilita comparar o enriquecimento de elementos químicos em ambientes com características distintas.

Com isso, pode-se estabelecer um indicador, Índice de Enriquecimento dos Sedimentos, que possibilita uma melhor visualização dos dados, uma vez que se podem gerar facilmente gráficos com esses valores. No entanto, a normalização tem como inconveniente a geração de resultados adimensionais, que dificultam a comparação com os obtidos para outras regiões.

Os valores de referência regional para os elementos químicos na bacia do Lago Paranoá foram obtidos a partir dos dados originais e dos Índices de Geoacumulação. No entanto, para uma investigação ambiental mais representativa deve-se utilizar, conjuntamente, os índices de enriquecimento do sedimento.

A normalização, em função da matéria orgânica, mostrou-se adequada para a avaliação das condições ambientais, principalmente para o elemento P.

Os maiores valores de P_{MO} foram obtidos nas amostras provenientes dos pontos LP A5, sob influência do lançamento de efluentes da ETEBSul, e LPC, que representa o principal sítio de acumulação de sedimentos do Lago Paranoá. Pela distribuição do P_{MO} no Lago Paranoá notou-se o enriquecimento significativo no ponto central do reservatório. Este enriquecimento foi atribuído à preservação de grande parte da matéria orgânica e pela geometria do reservatório. Da mesma forma, pelo I_{GEO} do ponto LPC, a área central é classificada como moderadamente poluída para P.

Finalizando, pode-se concluir que o presente estudo poderá servir como base metodológica, uma vez que estabeleceu faixas de concentração e relações de referência para inúmeros elementos químicos presentes nos sedimentos desta região.

REFERÊNCIAS

- Licht, O. A. B.; *Prospecção Geoquímica – Princípios, Técnicas e Métodos*, CPRM: Rio de Janeiro, 1998.
- Esteves, F. de A.; *Fundamentos de Limnologia*, Interciência/FINEP: Rio de Janeiro, 1988.
- Lacerda, L. D.; Vianna, F.; Carrasco, G.; Moresco, H.; Pessi, M.; *Geochimica Brasiliensis* **1998**, *12*, 63.
- Ansari, A. A.; Singh, I. B.; Tobschall, H. J.; *Chem. Geol.* **2000**, *162*, 245.
- Rodrigues, M. L. K. Em *PNMA II DI Subcomponente Monitoramento da Qualidade da Água*; Ministério do Meio Ambiente: Brasília, 2001.
- Förstner, U.; Wittman, G. T. W.; *Metal Pollution in the Aquatic Environment*, 2th ed., Springer-Verlag: Berlin, 1981.
- Bidone, E. D.; Fernandes, H. M.; Silva Filho, E. V.; dos Santos, L. F. T.; *Environ. Technol.* **1993**, *14*, 271.
- Chen, M.; Ma, L. Q.; Harris, W. G.; *J. Environ. Qual.* **1999**, *28*, 1173.
- Covelli, S.; Fontolan, G.; *Environmental Geology* **1997**, *30*, 34.
- Salminen, R.; Gregorauskiene, V.; *Appl. Geochem.* **2000**, *15*, 647.
- Kralik, M.; *A rapid procedure for environmental sampling and evaluation of polluted sediments*, Universidade de Viena: Viena, 1998.
- Groot, A. J.; Zschuppe, K. H.; Salomons, W.; *Hydrobiologia* **1982**, *92*, 689.
- Ferrante, J. E. T.; Rancan, L.; Netto, P. B. Em *Olhares sobre o Lago Paranoá*; Fonseca, F. O., coord.; Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos: Brasília, 2001.
- Carvalho Jr., O. A.; Boaventura, G. R.; Mateus, E. S.; Pereira, F. J.; de Brito, V. E. B.; Bispo, R. S.; *Revista Escola de Minas* **1998**, *51*, 47.
- Campos, J. E. G.; Freitas-Silva, F. H. Em ref. 13, cap. III.
- Campos, J. E. G.; Freitas-Silva, F. H.; *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Relatório Técnico, Hidrogeologia do Distrito Federal*, IEMA/UnB: Brasília, 1998, vol. IV.
- Freitas-Silva, F. H.; Campos, J. E. G.; *Boletim de Geociências do Centro-Oeste* **1995**, *18*, 32.

18. Santos, R. V.; de Carvalho Jr., O. A.; Martins, E. S. Em *Caracterização Geoquímica de Águas e Sedimentos de Corrente do Distrito Federal. Relatório Final de Atividades*; Boaventura, G. R., coord., FAPDF/UnB/IG: Brasília, 1997.
19. APHA, AWWA, WPCF; *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed.; Washington, 1999.
20. Embrapa: *Manual de Métodos de Análise de Solo*, 2^a ed., Ministério da Agricultura e do Abastecimento: Rio de Janeiro, 1997.
21. Ferreira, A. M. P. J.; *Tese de Doutorado*, Universidade de Aveiro, Portugal, 2000.
22. Förstner, M.; Pfeiffer, W. C.; de Lacerda, L. D.; *Environ. Technol. Lett.* **1984**, 5, 567.
23. Rodrigues, M. L. K.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
24. Liu, W.; Luan, Z.; Tang, H.; *Water; Air; Soil Pollut.* **1999**, 113, 227.
25. Burnett, J. A. B.; Mattos, S. P.; Azzolin, N. M. P. Em ref. 13, cap. IX.
26. Wedepohl, K. H.; *Geochim. Cosmochim. Acta* **1995**, 57, 1217.