Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Caracterização Textural dos Sedimentos de Fundo do Lago Guaíba (sul do Brasil) e sua Importância em Diagnósticos Ambientais

Luciano Laybauer, Edison Dausacker Bidone

Pesquisas em Geociências, 28 (1): 13-26, maio/ago., 2001.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/20164>

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - maio/ago., 2001.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Caracterização Textural dos Sedimentos de Fundo do Lago Guaíba (sul do Brasil) e sua Importância em Diagnósticos Ambientais

LUCIANO LAYBAUER¹ & EDISON DAUSACKER BIDONE²

¹ Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
CEP 91501-970 - Porto Alegre, RS, Brasil. e-mail: luciano.laybauer@ig.com

² Departamento de Geoquímica, Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense.
CEP 24020-007 - Niterói, RJ, Brasil. e-mail: geobida@vm.uff.br

(Recebido em 12/00. Aceito para publicação em 07/01)

Abstract - This work detaches the importance of understanding the sedimentary dynamics in environmental researches. One hundred eighty seven bottom sediment samples from Guaíba Lake were collected in 1998. These samples were analyzed for texture and organic matter content. Those physical parameters associated to the lake's morfodynamics show preferential sites to accumulate fine sediments and organic matter; those are potential geochemical carriers of pollutants. Four textural fields (A: 0-10%, B: 10-50%, C: 50-90% and D: 90-100%) based on the mud percentage (fraction <63µm) of the sediments were defined. They indicate a growing potential of pollutant sorption. Environmental assessment should prioritize sampling of fields C, and especially D, to the detriment of fields A and B. The textural map based on this approach, shows the division of Guaíba Lake in three great cells of fine sediments called, North cell, Central cell and South cell. Future environmental researches carry on the Guaíba Lake can use this tool to orient sediment sampling.

Keywords - Sediment, texture, lake environment.

INTRODUÇÃO

O crescente interesse na análise dos sedimentos por parte das agências ambientais de diversos países, em seus programas de pesquisa e monitoramento de ecossistemas aquáticos, demonstra a importância que esse compartimento ambiental tem recebido nos últimos anos.

A utilização dos sedimentos em diagnósticos ambientais requer determinados cuidados que envolvem, principalmente, a compreensão da hidrodinâmica do meio, responsável pelo padrão textural impresso no leito sedimentar. O desconhecimento da dinâmica de sedimentação tem levado a desperdícios financeiros e a conclusões questionáveis. Laybauer (1998) chama atenção a essa questão, ilustrando com alguns trabalhos realizados no sul do Brasil.

Boa parte da contaminação causada por compostos orgânicos e inorgânicos é transportada na água, preferencialmente, junto ao material em suspensão. Mais de 50% dos sólidos suspensos consistem de partículas com diâmetro inferior a 63µm (silte e argila), também denominadas de sedimentos de granulação fina ou lama (Irion & Zöllmer 1990).

O diâmetro desses grãos determina importantes propriedades físico-químicas, que afetam o potencial de adsorção de poluentes. À medida que se reduz o tamanho das partículas, aumenta-se a área superficial específica e a capacidade de troca de cátions (Fig. 1), assim como a concentração de poluentes nas mesmas.

Essas finas partículas constituídas, principalmente, por matéria orgânica, argilo-minerais e óxidos/hidróxidos de Fe e Mn, são responsáveis pelo suporte de uma parcela significativa de poluentes no meio aquoso.

Dependendo das características hidrodinâmicas do meio, essas partículas, ou parte delas, podem decantar, depositando-se no substrato sedimentar (Malle 1990). Portanto, locais de acumulação/deposição de sedimentos finos representam sítios preferenciais, nos quais ficam registrados, além das características geológicas naturais, o histórico de ocupação e contaminação da bacia hidrográfica, ou seja, constituem uma "memória" do ecossistema aquático. Logo, esses locais são sítios prioritários à investigação e devem ser mapeados.

Os sedimentos representam um compartimento integrador e um dos melhores meios

Figura 1 - Relações entre o tamanho de partículas e suas propriedades físico-químicas: (a) diâmetro x superfície específica e (b) diâmetro x capacidade de troca de cátions, segundo Malcolm & Kennedy (1970 *apud* Walling & Moorehead, 1989).

concentradores de poluentes, especialmente, de metais pesados no ambiente aquático (Luoma & Bryan, 1981; Badri & Aston, 1983; Tessier & Campbell, 1987). Esse substrato funciona tanto como reservatório, quanto como fonte de contaminação (Förstner & Wittmann, 1981; Mudroch, 1983; Salomons *et al.*, 1987; Thomas & Frank, 1987; Esteves, 1998; Förstner, 1989; Förstner *et al.*, 1990; Salomons & Förstner, 1984).

Entre os ecossistemas aquáticos continentais, os lagos constituem ambientes deposicionais e reservatórios potenciais de diversos contaminantes, podendo, em determinados locais, atingir níveis de poluição bastante elevados, comprometendo a integridade do ecossistema e das populações (inclusive humana) que façam uso desse recurso (Esteves, 1998).

Um problema comum relacionado à elaboração de diagnósticos e programas de monitoramento ambiental, que contemplam a coleta de sedimentos de fundo, refere-se à localização e densidade de amostragem.

A variação textural dos sedimentos de fundo e a estratificação vertical (componente temporal) dos mesmos, devem ser consideradas no estabelecimento de qualquer programa de amostragem (Herr

& Gray, 1997). Para tanto, recomenda-se uma caracterização granulométrica prévia do ambiente.

O primeiro trabalho que aborda a questão da sedimentação do Lago Guaíba foi realizado há quase 30 anos (Cunha, 1971), com outros objetivos. Recentemente, foram realizados outros estudos (CECO, 1999 e Bachi *et al.*, 2000) abordando esse tema, porém com enfoques diferenciados.

Esse artigo apresenta um panorama da sedimentação atual do Lago Guaíba e suas implicações ambientais, considerando as características granulométricas e o teor de matéria orgânica dos sedimentos de fundo, consorciadas com parâmetros morfodinâmicos do sistema. Essa caracterização delimita sítios preferenciais à acumulação de sedimentos finos e matéria orgânica, que constituem suportes geoquímicos potenciais de poluentes. Os resultados desse estudo fornecem uma nova base temática, que auxiliará na localização adequada dos pontos de coleta, redução do número de análises e otimização dos recursos financeiros necessários aos diagnósticos e monitoramentos ambientais realizados nos sedimentos do Lago Guaíba.

CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHBG) onde se encontra o lago homônimo, objeto deste estudo, possui o maior contingente populacional do território do RS, a maior concentração de atividades econômicas e, conseqüentemente, o maior número de problemas ambientais (Fig. 2). A RHBG é dividida em oito bacias, sete delas interligadas por grandes rios, que levam o nome de seus principais formadores: Alto Jacuí, Taquari-Antas, Vacacaí, Pardo-Baixo Jacuí, Caí, Sinos, Gravataí, e a oitava, pelos arroios que desembocam diretamente nas margens leste e oeste do Lago Guaíba.

O Guaíba, tradicionalmente chamado de “rio” ou “estuário”, é um lago onde quatro rios se encontram. Em tupi-guarani, Guaíba significa baía de todas as águas, portanto constitui um “reservatório” ou local de passagem das cargas transportadas pelos rios da RHBG, após drenarem uma área superior a 80 mil km² (30% do Estado do RS).

Esse lago é um dos mananciais de água doce mais importantes do sistema costeiro lagunar do Rio Grande do Sul, especialmente para Porto Alegre, situada na sua margem leste, que utiliza suas águas para abastecimento público (Oliveira, 1979).

Figura 2 - Localização da área de estudo.

A região metropolitana de Porto Alegre possui um clima subtropical úmido (tipo Cfa), conforme a classificação de Köppen (1948), por registrar valores de temperatura média do mês mais quente superiores a 22°C e apresentar chuvas bem distribuídas ao longo do ano. A temperatura média do ar é de 19,4°C e a precipitação anual média de longo prazo (1912 a 1997) é de 1324 mm (Livi, 1998).

O Lago Guaíba se desenvolve desde o Delta do Jacuí, ao norte, até a Ponta de Itapuã – entrada da Laguna dos Patos, ao sul, numa área delimitada pelos meridianos 51°01'W e 51°20'W e paralelos 30°00'S e 30°24'S (Fig. 2). O lago ocupa uma área de 496 km², acumulando um volume de água de 1.440.200.000 m³, com profundidade de 0 a 30 metros e extensão de 50 km. O Guaíba possui um estreito canal de navegação, com profundidades entre 5 e 7 metros (DMAE, 1978), uma largura mínima de 900 m, entre a Ponta do Gasômetro e a Ilha da Pintada, e uma largura máxima de 19 km,

entre as enseadas das Praias de Itapuã e Faxina (Menegat & Kirchheim, 1998).

O Lago Guaíba encontra-se na região geomorfológica denominada Planície Costeira Interna, caracterizada por uma área plana de baixas altitudes constituída, predominantemente, por sedimentos inconsolidados (IBGE, 1986). Nessa região distribuem-se diversas lagoas, sendo a mais importante a Laguna dos Patos. À noroeste dessa laguna, situa-se a Bacia do Guaíba, com suas várias ilhas e praias de composição predominantemente arenosa. Próximo à foz do Rio Jacuí, observa-se um relevo suavemente ondulado, composto por colinas, tabuleiros e a planície aluvial do Delta do Rio Jacuí, que se alarga no baixo curso desse rio, estreitando-se na entrada do Lago Guaíba, onde atravessa o embasamento de rochas graníticas e granito-gnáissicas que formam os morros das cidades de Porto Alegre e Guaíba. Além das rochas graníticas, fazem parte da geologia das sub-bacias hidrográficas, que deságuam nas margens leste e oeste do lago, depósitos sedimentares do Quaternário, relacionados as quatro grandes transgressões marinhas.

Apesar de predominar o sentido natural de escoamento (Lago Guaíba – Laguna dos Patos), as águas do Guaíba sofrem forte influência dos ventos, o que causa represamento e inversão dos fluxos de água (Ferreira & Dewes, 1984; Casalas & Cybis, 1985; Silveira, 1986; Silveira & Tucci, 1988). A dinâmica das correntes no Guaíba é bastante complexa e, por várias vezes, já foi constatada inversão no sentido natural do escoamento, quando da formação de marés de certa amplitude, combinadas com ventos do quadrante sul (DMAE, 1986).

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo utilizou o banco de dados do Projeto “Sedimentação do Complexo Guaíba” (CECO, 1999), decorrente do Convênio de Cooperação Técnica e Apoio Recíproco, firmado entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), através do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica do Instituto de Geociências (CECO-IG), e o Departamento Municipal de Águas e Esgotos da Prefeitura Municipal de Porto Alegre (DMAE-PMPA), através de sua Divisão de Pesquisa (DVP).

Foram realizadas dez campanhas de coleta de sedimentos, que totalizaram 187 pontos (Fig. 3 - 136 amostras na primeira fase e 51 amostras na fase de detalhamento), entre janeiro e novembro de

1998, com participação de técnicos das duas instituições, utilizando embarcações do DMAE (lanchas Cymbella e Salminus).

A amostragem obedeceu, inicialmente, perfis E-W, transversais ao Lago Guaíba, desde o Delta do Jacuí à entrada da Laguna dos Patos (Fig. 3), em pontos pré-estabelecidos, tomados da Carta Batimétrica nº 2.111 da Diretoria de Hidrografia e Navegação do Ministério da Marinha e Folha de Porto Alegre, SH22-Y-B-III-2; MI-2987/2, ambas na escala 1:50.000.

O georeferenciamento dos pontos foi realizado com GPS da marca Garmin modelo 45. Em cada ponto de amostragem foi medida a profundidade do leito do lago e coletada uma amostra de sedimento (± 1 kg), com draga do tipo Ponar®.

A análise granulométrica dos sedimentos foi realizada por peneiramento da fração grossa ($>63\mu\text{m}$), em intervalos de ϕ inteiro, e pipetagem da fração fina ($<63\mu\text{m}$), considerando somente a segregação percentual de silte e argila da amostra. A pipetagem só foi realizada nas amostras que apresentaram um peso de finos superior a 5%. A relação percentual areia-silte-argila, apresentada nesse trabalho, incorporou as porcentagens de grãos maiores do que 2 mm, obtidas em algumas amostras, ao intervalo de classe areia ($63\mu\text{m}$ a 2mm).

O teor de “matéria orgânica” (M.O.) foi determinado somente nas amostras que apresentaram teor de silte e argila superior a 5%, por perda ao fogo, utilizando 1 g de amostra seca. A concentração de M.O. foi estabelecida por diferença de massa, após calcinação em mufla, à temperatura de 700°C, durante 2 horas, em cadinhos de porcelana, conforme metodologia adaptada de Gross (1971).

A estatística descritiva dos parâmetros estudados (profundidade, granulometria e teor de matéria orgânica dos sedimentos) considerou a média e a mediana como medidas de tendência central, o desvio padrão como medida de dispersão e o intervalo de variação de valores (máximo e mínimo). Para determinar as relações entre as variáveis foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson (r) ao nível de significância $p < 0,05$.

Os mapas de isovalores (batimetria, compartimentação hidrodinâmica baseada na porcentagem de lama e teor de matéria orgânica) foram elaborados com o *software* Surfer 6.02. As interpolações utilizaram o método de “krigagem” (variograma modelo exponencial), com varredura por quadrante na direção preferencial NW-SE, em função da orientação e das características de contorno do lago.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra o mapa batimétrico do Lago Guaíba, construído a partir dos dados da carta náutica acrescidos das medidas realizadas nesse estudo. O padrão de distribuição das isóbatas exerce um forte condicionamento sobre as características texturais do lago, bem como sobre os teores de matéria orgânica.

Caracterização Granulométrica

Segundo Martins *et. al.* (1987), a composição mecânica dos sedimentos de fundo do sistema Guaíba – Laguna dos Patos revela uma sedimentação mais arenosa ao norte, na região do Guaíba, e mais argilosa ao sul, em especial, na porção estuarina da laguna. Esses autores, caracterizam o Guaíba como uma área de aporte e transferência de material lamoso, associado aos sólidos em suspensão, que ingressam na Laguna dos Patos.

Deve-se destacar que, além da transferência de material lamoso à Laguna dos Patos, mencionada por Martins *et. al.* (1987), existem zonas expressivas de sedimentação pelítica no leito do Lago Guaíba.

Cunha (1971) define quatro fácies sedimentares no Guaíba, divididas da seguinte forma: i) arenosa, sub-dividida em areia grossa, média e fina; ii) areno-siltica; iii) silto-arenosa; e iv) areno-silto-arenosa.

Os resultados apresentados neste trabalho (Figura 4), mostram uma diferença marcante em relação ao trabalho de Cunha (1971), uma vez que, existe uma grande quantidade de amostras silte-argilosas, inexistentes ou não caracterizadas naquele estudo.

Os sedimentos do Lago Guaíba mostram heterogeneidade textural e podem ser agrupados em quatro classes principais, conforme o diagrama triangular de Shepard (1954): i) areia; ii) areia siltica; iii) silte arenoso, e iv) silte argiloso; apesar de algumas amostras possuírem características distintas desses grupos (Fig. 4).

A Tabela 1 apresenta a análise estatística descritiva, considerando, além da profundidade de amostragem e parâmetros texturais (teor de areia, silte e argila), a razão silte/argila e o teor de matéria orgânica na fração fina dos sedimentos do Lago Guaíba.

A profundidade média dos pontos de amostragem é de 3,7 metros, variando de 0 (margem) a 12,7 metros (canal de navegação).

Figura 3 - Mapa batimétrico e de localização dos pontos de amostragem de sedimento no Lago Guaíba.

Figura 4 - Classificação textural dos sedimentos do Lago Guaíba, com base nos teores de areia, silte e argila, segundo Shepard (1954).

A areia é a classe textural dominante nos sedimentos do Lago Guaíba, ocorrendo com um teor médio de 52,5%. Todas as amostras apresentam algum percentual de areia (mínimo de 0,1%). São constituídas exclusivamente dessa classe textural 58 amostras.

A fração fina do sedimento, menor que 63µm, ocorre em 69% das amostras e possui um teor médio de 42,5%, atingindo um valor máximo de 99,9% da amostra.

Os teores médios de silte e argila são de 31,4% e 11%, enquanto os valores máximos atingem 87,6% e 64%, respectivamente. Esses dados, assim como as razões silte/argila (média de 3,9) caracterizam o franco predomínio da fração silte sobre a fração argila nos sedimentos finos do Lago Guaíba.

Como o transporte de poluentes, associados ao material em suspensão na água, é muito influenciado pelo comportamento de partículas finas (<63µm), é importante a compreensão dos fatores que influenciam os modelos de deposição. Neste sentido, a razão silte/argila, junto com outras carac-

terísticas granulométricas dos sedimentos, tem sido empregada como indicadora de diversas condições de sedimentação (Sly, 1989). De uma forma geral, pode-se prever um incremento de energia do meio, à medida que aumenta a razão silte/argila no sedimento.

Essa razão indica que, mesmo nas regiões ou depocentros de sedimentos finos, a energia do meio não é suficientemente baixa a ponto de permitir a deposição expressiva de argila. Logo, boa parte do material argiloso, presente na carga em suspensão, é exportado para a Laguna dos Patos, ficando retido no Guaíba o material predominantemente siltico.

Matéria Orgânica

Normalmente, as partículas minerais presentes no ambiente aquático encontram-se cobertas por finas camadas ou películas (“coatings”) orgânicas, que podem modificar drasticamente sua capacidade de sorção. Essas películas são formadas por substâncias húmicas e biofilmes. Em contraste com a matriz mineral, muitas vezes inerte, os biofilmes podem influenciar, de forma significativa, os processos de sorção, desorção e decomposição de poluentes no meio aquático (Schorer & Eisele, 1997).

Diversos autores têm destacado a tendência de elementos-traço a associarem-se com a matéria orgânica (Vestergaard, 1979; Rapin *et al.*, 1983; Aragon *et al.*, 1986).

O teor médio de matéria orgânica na fração fina (<63µm) do sedimento do Lago Guaíba é de 10%, com grande amplitude de variação, ou seja, de 1% a 15,9% (Tab. 1).

As relações entre a morfologia de fundo, características texturais e teor de matéria orgânica da fração fina dos sedimentos foram avaliadas por meio de uma matriz de correlação, baseada no coeficiente de Pearson (Tab. 2).

Tabela 1 - Estatística descritiva das amostras de sedimento do Lago Guaíba (RS), coletadas através do Convênio CECO-DMAE (CECO, 1999).

Parâmetros estatísticos	Profundidade ¹ (m)	% Areia	% Silte	% Argila	% fr.<63µm (silte+arg.)	Razão silte/arg.	% M.O. na fr.<63µm
Média	3,7	52,5	31,4	11,0	42,5	3,9	10,0
Mediana	3,3	49,3	22,4	6,8	32,8	2,9	10,6
Valor mínimo	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,4	1,0
Valor máximo	12,7	100,0	87,6	64,0	99,9	28,4	15,9
Desvio padrão	2,3	40,4	29,5	12,1	39,6	3,7	3,6
Nº amostras (n)	187	187	187	187	187	129	129

¹ profundidade de coleta da amostra;

² razão proposta por Sly (1989), como indicadora de condições de transporte, deposição e distribuição de partículas.

Tabela 2 - Matriz de correlações entre as profundidades de amostragem e os parâmetros físicos dos sedimentos do Lago Guaíba, coletados através do Convênio CECO-DMAE (CECO, 1999). Coeficientes de correlação em negrito são significantes ao nível $p < 0,05$.

	Prof. (m)	% Areia	% Silte	% Argila	% de Finos ¹	Silte/Arg. ²	% de M.O.
Prof. (m)	1,00						
Areia	-0,39	1,00					
Silte	0,19	-0,86	1,00				
Argila	0,34	-0,77	0,78	1,00			
% de Finos	0,25	-0,87	0,98	0,88	1,00		
Silte/Arg.	-0,35	0,16	0,03	-0,42	-0,12	1,00	
% de M.O.	0,46	-0,38	0,24	0,63	0,40	-0,67	1,00

¹ soma percentual de silte e argila;
² razão proposta por Sly (1989), como indicadora de condições de transporte, deposição e distribuição de partículas.

Dentre as diversas correlações da Tab. 2 destaca-se o seguinte:

- a) os teores de areia e a razão silte/argila nos sedimentos diminuem com o aumento da profundidade (-0,39 e -0,35), enquanto os teores de silte, argila e finos aumentam com a mesma (0,19; 0,34 e 0,25, respectivamente), indicando uma clara relação entre a batimetria do lago e a granulometria dos sedimentos do seu leito;
- b) a porcentagem de matéria orgânica nos sedimentos apresenta correlações negativas significativas com o teor de areia e razão silte/argila (-0,38 e -0,67). Entretanto, as correlações de M.O. com a profundidade e porcentagens de silte, argila e finos são positivas e significativas (0,46; 0,24; 0,63 e 0,40, respectivamente), indicando um ambiente de sedimentação mais profundo e de menor energia, que é comum à deposição destes suportes geoquímicos de poluentes (Figs. 3 e 5).

Embora as correlações entre o teor de matéria orgânica e profundidade, e porcentagens de argila, silte e conteúdo de finos sejam significativas, não foram maiores, pois o teor de M.O. foi determinado somente na fração menor que 63µm, o que reduz os coeficientes de correlação.

A comparação entre os mapas batimétrico, de isoteores de matéria orgânica na fração menor que 63µm e de compartimentação hidrodinâmica, com base na porcentagem de lama, confirma as correlações entre a profundidade e os teores de matéria orgânica e lama nos sedimentos do Lago Guaíba (Figs. 3, 5 e 7).

Hidrodinâmica

O regime hidrodinâmico do sistema lagunar, onde o Guaíba está inserido, é bastante complexo, tanto na época das cheias, como na época de estia-

gem. As relações de causa e efeito dos diversos fatores que intervêm no escoamento do Guaíba, em especial, a forte influência da ação dos ventos, mostram que o lago não é só um canal de extensão dos seus tributários, mas um tipo de reservatório, intimamente ligado à Laguna dos Patos.

O modelo matemático de qualidade de água desenvolvido para o Guaíba confirma que a região situada fora do canal de navegação funciona como um lago, com maior tempo de residência das cargas presentes na coluna d’água, enquanto na estreita região do canal, essas cargas tem um tempo de residência reduzido (DMAE, 1978).

A construção do Delta do Rio Jacuí está relacionada à perda de competência dos rios tributários (Jacuí, Caí, Sinos e Gravataí) ao ingressar na ampla bacia deposicional do Guaíba. Nessa condição, fica retida boa parte da carga de grãos grossos, que contribuem para a estruturação das ilhas e barras arenosas do delta, enquanto a pluma de material mais fino, constituída principalmente por silte e argila, se mantêm em suspensão. O regime hidrodinâmico normal do Guaíba faz com que parte da carga de material em suspensão seja depositada no interior do lago e parte seja exportada para a Laguna dos Patos.

Herz (1977), estudando a circulação das águas do Guaíba e Laguna dos Patos, com técnicas de sensoriamento remoto, menciona que as águas turvas do Rio Jacuí, com grande quantidade de material em suspensão, são desviadas da região do delta para a margem oeste, oposta à cidade de Porto Alegre, até a Ponta do Jacaré, situada entre Guaíba e Barra do Ribeiro. Por outro lado, as águas dos rios Caí, dos Sinos e Gravataí, de menor carga sólida escoam pela margem urbanizada, misturando-se a efluentes domésticos transportados pelo Arroio Dilúvio e outros de menor importância.

Figura 5 - Mapa de isoteores de matéria orgânica na fração menor que 63µm dos sedimentos do Lago Guaíba.

Cunha (1971), ao examinar a hidrodinâmica do Guaíba, menciona uma grande dispersão de correntes na saída do Delta do Jacuí, que provoca intensa sedimentação de finos. Segundo o autor, o canal de navegação principal está sujeito ao assoreamento contínuo, uma vez que o acréscimo lateral de material siltico é constante, proveniente da margem esquerda do lago e das correntes da região do delta.

Os sedimentos do Lago Guaíba apresentam características texturais vinculadas às áreas fonte, morfologia, hidrodinâmica e evolução desse sistema. A batimetria (Figura 3) e as correntes induzidas por ventos exercem um papel importante no padrão de sedimentação observado.

Pejrup (1988) propôs um diagrama triangular para a classificação de sedimentos estuarinos, constituído de 16 grupos ou campos, identificados por letras e números, através do qual são relacionados os teores de areia-silte-argila e as condições hidrodinâmicas vigentes à época da deposição das partículas. Essa metodologia tem sido utilizada por alguns pesquisadores no território nacional (Batista Neto & Silva, 1996).

Para avaliar as características hidrodinâmicas do Lago Guaíba foram plotadas nesse diagrama as análises granulométricas efetuadas nesse estudo (Fig. 6).

Os sedimentos do Guaíba encontram-se, predominantemente, nos grupos III e IV, distribuídos nos campos granulométricos, designados pelas letras A, B, C e D. A ampla concentração de amostras na parte inferior do diagrama está relacionada aos baixos teores de argila na textura dos sedimentos do lago.

Entretanto, verifica-se boa distribuição das amostras nos campos A, B, C e D, que indicam

teores crescentes de lama ou teores decrescentes de areia, respectivamente. Com isso foi elaborado um mapa textural simplificado do leito do Guaíba, modificado a partir da metodologia proposta por Pejrup (1988), considerando somente os campos A, B, C e D (CECO, 1999; Bachi *et al.*, 2000).

O uso deste tipo de abordagem se constitui em um bom indicador ambiental da energia de sedimentação e, conseqüentemente, dos sítios preferenciais à deposição e acumulação de poluentes. A figura 7 apresenta o mapa síntese da compartimentação hidrodinâmica do Lago Guaíba, modificado a partir dos trabalhos realizados pelo CECO (1999) e Bachi *et al.* (2000).

Os sedimentos localizados nos campos C e, especialmente, D são prioritários à investigação ambiental. Nesses locais pode-se ter estoques expressivos de poluentes orgânicos e inorgânicos, enquanto nos campos A e B esse potencial é reduzido de forma significativa, devido à pequena concentração de suportes geoquímicos necessários à sorção desses compostos.

A margem leste do Lago Guaíba é formada por pontais de morros graníticos, intercalados com zonas de acumulação constituídas por praias e enseadas compostas por sedimentos, predominantemente, areno-siltosos, enquanto a margem oeste é formada por esporões e praias de sedimentos arenosos. Esses esporões e seus bancos arenosos submersos, construídos em zonas protegidas da corrente principal, tendem a avançar em direção ao canal, até serem barrados por correntes, que equilibram o aporte lateral de sedimento, com uma leve erosão, suficiente para impedir o crescimento dessas coroas, o que poderia conduzir a um seccionamento do sistema (Fig. 7). Esses pontais também são observados na Laguna dos Patos e, da mesma forma, não tendem a produzir um seccionamento do sistema, em função do enorme fluxo proveniente da bacia hidrográfica formadora do Guaíba (Toldo Jr., 1991).

A disposição e o espaçamento das isóbatas do Lago Guaíba (Fig. 3) contribuem para a formação de três grandes células de sedimentação (células Norte, Central e Sul), que são melhor visualizadas no mapa de compartimentação hidrodinâmica (Fig. 7).

As células Norte, Central e Sul, propostas neste trabalho, foram definidas como três importantes zonas de acumulação de sedimentos finos, silte-argilosos, provenientes da carga de material em suspensão transportada pelos rios tributários do Guaíba, assim como pelos arroios, que aportam ao lago (Fig. 7).

Figura 6 - Caracterização textural e hidrodinâmica dos sedimentos do Lago Guaíba, baseado no Diagrama de Pejrup (1988).

Figura 7 - Compartimentação hidrodinâmica baseada na porcentagem de lama (fração $<63\mu\text{m}$) dos sedimentos do Lago Guaíba (modificado de CECO, 1999).

A célula Norte está limitada entre a região do Delta do Jacuí e o alinhamento formado entre a cidade de Guaíba (margem oeste) e o Morro do Sabiá (margem leste), localizado no extremo norte da baía da Praia de Ipanema em Porto Alegre. Essa célula é a que possui menor área e mostra características hidrodinâmicas distintas, podendo ser compartimentada em três diferentes “núcleos” deposicionais (Fig. 7). O primeiro é representado pelo Saco de Santa Cruz, que constitui uma área de pequena profundidade (2 a 2,5 m) com depocentro de sedimentação fina, protegido do efeito de ondas. Essa área representa um segmento abortado de canais distributários da região do Delta do Rio Jacuí, numa situação de nível de mar mais elevado, possivelmente, relacionada à última transgressão marinha na costa Sul-rio-grandense. Essa interpretação é corroborada pelas características morfológicas da região, assim como pela presença de um pacote arenoso, a poucos centímetros de profundidade (± 50 cm), identificado em três testemunhos de sondagem realizados nesse local, com características texturais similares àquelas das ilhas e barras do delta. O segundo núcleo se desenvolve desde a Ponta do Gasômetro – Foz do Arroio Dilúvio até a região do antigo Estaleiro Só – Hipódromo do Cristal. Essa área é uma das regiões mais impactadas do lago, sofreu intenso processo de dragagem e aterramento e recebe importantes cargas de poluição doméstica e industrial, tanto de Porto Alegre, quanto das bacias hidrográficas dos rios Gravataí, Sinos e Caí. O terceiro e último núcleo de sedimentação fina da célula Norte está restrito a área do canal de navegação (profundidades de 4 a 6 m), a nordeste da cidade de Guaíba.

A célula Central se distribui em uma área pelo menos duas vezes superior à célula Norte, limitada entre o alinhamento da cidade de Guaíba - Morro do Sabiá (Porto Alegre) até o alinhamento NE-SW, formado entre a Ponta do Salgado (Barra do Ribeiro) e a Ponta do Arado (Porto Alegre). Essa célula apresenta um núcleo principal de sedimentação fina na área do canal (região mais profunda) e núcleos secundários na Praia de Ipanema e foz do Arroio do Salso (Fig. 7).

A célula Sul possui uma área equivalente à célula Central e está limitada ao alinhamento das Pontas do Salgado e Arado até a Ponta de Itapuã (foz do Lago Guaíba – entrada da Laguna dos Patos). Essa célula apresenta uma área expressiva e contínua de sedimentação fina, que não se restringe

à porção do canal, distribuindo-se na bacia de deposição formada em frente às praias do Lami e Itapuã (Fig. 7).

Dependendo das características morfo- e hidrodinâmicas do meio, pode-se ter deposição de partículas finas em períodos de calmaria e/ou estiaagem em locais que, normalmente, não seria esperado este tipo de sedimentação. Porém, essas partículas jamais são removidas, pela inexistência de correntes suficientemente competentes para dar-lhes o impulso inicial, arrancando-as do fundo. Essa característica é comum em setores semi-isolados de baías e sacos, conforme Herz (1977).

No extremo meridional da célula Sul, na altura da Ilha do Junco – Morro da Fortaleza ocorre um estrangulamento do Guaíba, resultante do condicionamento geomorfológico de suas margens, compostas por pontais de rochas graníticas. Esse efeito produz uma zona de alta energia hidrodinâmica, caracterizada por sedimentos essencialmente arenosos, inclusive no canal de navegação, que difere do padrão textural observado no canal nas células Norte, Central e porção norte da célula Sul (Figs. 7 e 8).

Apesar das bacias hidrográficas, que deságuam nas margens do lago, contribuirão com importantes cargas de contaminação, deve-se evitar boa parte das zonas marginais à amostragem, em virtude da textura arenosa desses locais, que reduz o potencial de sorção de poluentes. Constituem exceção, ao acima exposto, a região da foz do Arroio Dilúvio – Estaleiro Só, Praia de Ipanema e a foz do Arroio do Salso (Fig. 7).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compreensão da dinâmica de sedimentação do ambiente aquático é peça fundamental à definição espacial e temporal de qualquer programa de amostragem, visando o monitoramento e/ou diagnóstico ambiental de uma área.

A granulometria dos sedimentos é um bom indicador da energia do meio. Sempre que possível, locais com grande porcentagem de partículas grossas ($>63\mu\text{m}$) devem ser evitados em estudos ambientais, em detrimento de áreas de menor hidrodinâmica, caracterizadas por sedimentos lamosos.

A abordagem metodológica, baseada na porcentagem de lama das amostras, define quatro campos (A, B, C e D) distintos de sedimentação no Lago Guaíba. Locais com características texturais dos campos C (50-90% lama) e, especialmente, D

Figura 8 - Caracterização granulométrica dos sedimentos de fundo, ao longo do canal de navegação do Lago Guaíba.

(90-100% lama) são prioritários a estudos ambientais, pois constituem sítios preferenciais à deposição e acumulação de poluentes.

A imagem textural do leito do Guaíba, com base na metodologia adotada, mostra a segmentação do lago em três importantes zonas de deposição e acumulação de sedimentos silte-argilosos, denominadas de células Norte, Central e Sul.

Portanto, a caracterização e mapeamento das zonas de acumulação de partículas finas (<63µm), onde se encontram importantes suportes geoquímicos potenciais de poluentes é de suma importância em diagnósticos e monitoramentos ambientais, que utilizem os sedimentos como compartimento de investigação.

Agradecimentos - Ao Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO/IG/UFRGS) e à Divisão de Pesquisa do Departamento Municipal de Águas e Esgotos (DVP/DMAE/ Prefeitura Municipal de Porto Alegre) pela participação no "Projeto Sedimentação do Complexo Guaíba", que possibilitou a amostragem e análises dos sedimentos utilizados para a elaboração deste trabalho. A Prof^a. Renata Fraga dos Santos pela revisão gramatical deste manuscrito, aos geólogos Eduardo Guimarães Barboza e Juliano Kuchle pelo auxílio na edição das figuras e, por fim, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de doutorado e pesquisa concedidas aos autores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aragon, G. T.; Pires, V. S.; Lacerda, L. D. & Patchineelan, S. R. 1986. Distribuição espacial de nutrientes e metais pesados em sedimentos e águas superficiais em um ecossistema de manguezal. *Acta Limnológica Brasileira*, 1:365-385.
- Bachi, F. A.; Barboza, E. G. & Toldo Jr., E. E. 2000. Estudo da sedimentação do Guaíba. *Ecos*, 17:32-35.
- Badri, M. A. & Aston, S. R. 1983. Observation on heavy metal geochemical associations in polluted and non-polluted estuarine sediments. *Environmental Pollution* (Series B), 6:181-193.
- Batista Neto, J. A. & Silva, M. A. M. 1996. Caracterização dos sedimentos de fundo e dinâmica sedimentar da Enseada de Jurujuba (Baía de Guanabara), Niterói, RJ. *Pesquisas*, 23(1/2):7-16.
- Casalas, AB. & Cybis, L. F. 1985. Modelo matemático de circulação e de qualidade das águas do estuário do Rio Guaíba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS/SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS EM REGIÕES METROPOLITANAS, 6., 1985, São Paulo, *Anais...*, São Paulo, v. 1, p. 419-432.
- CECO (Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica). 1999. **Projeto Sedimentação do Complexo Guaíba**. Convênio CECO/IG/UFRGS – DVP/DMAE. Porto Alegre. 17p. (relatório final, inédito).
- Cunha, R. 1971. **O estuário do Guaíba**: características texturais, mineralógicas e morfológicas. Porto Alegre. 51p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgotos). 1978. Modelo matemático de qualidade de água aplicado ao Guaíba. *Relatório Técnico*, v. 23, 120 p.
- DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgotos). 1986. O rio Guaíba, suas características físico-químicas e biológicas. *Relatório Técnico*, v. 43, 361 p.
- Esteves, F. A. 1998. Fundamentos de Limnologia. Rio de Janeiro, Interciência, 602p.
- Ferreira, L. C. H. & Dewes, R. 1984. Mecânica de Correntes do Guaíba. In: SEMINÁRIO SOBRE PESQUISA DA LAGOA DOS PATOS, 1., 1984, Porto Alegre, *Anais...* Porto Alegre, p. 73-78.
- Förstner, U. 1989. Environmental Impact. In: Bhattacharji, S.; Friedman, G. M.; Neugebauer, H. J. & Seilacher, A. (eds.). *Contaminated Sediments*. Berlin, Springer-Verlag. p. 105-128. (Lecture Notes in Earth Sciences, v. 21).
- Förstner, U.; Ahlf, W.; Calmano, W. & Kersten, M. 1990. Sediment Criteria Development: Contributions from Environmental Geochemistry to Water Quality Management. In: Heling, D.; Rothe, P.; Förstner, U. & Stoffers, P. (eds.). *Sediments and Environmental Geochemistry: Selected Aspects and Case Histories*. Berlin, Springer-Verlag. p. 311-338.
- Förstner, U. & Wittmann, G. T. W. 1981. **Metal Pollution in the Aquatic Environment**. Berlin, Springer-Verlag, 486p.
- Gross, M. G. 1971. Carbon Determination. In: Carver, R. E. (ed.). **Procedures in Sedimentary Petrology**. New York, John Wiley & Sons. p. 573-596.
- Herr, C & Gray, N. F. 1997. Sampling riverine sediments impacted by acid mine drainage: problems and solutions. *Environmental Geology*, 29(1/2):37-45.
- Herz, R. 1977. **Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos**: contribuição metodológica ao estudo de processos lagunares e costeiros do Rio Grande do Sul através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. São Paulo. 250p. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.
- IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 1986. Levantamento de Recursos Naturais: Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SH.22 Lagoa Mirim: **geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, IBGE, 796p.
- Irion, G. & Zöllmer V. 1990. Pathways of Fine-Grained Clastic Sediments – Examples from the Amazon, the Weser Estuary, and the North Sea. In: Heling, D.; Rothe, P.; Förstner, U. & Stoffers, P. (eds.), *Sediments and Environmental Geochemistry: Selected Aspects and Case Histories*. Berlin: Springer-Verlag, p. 351-366.
- Köppen, H. D. 1948. **Climatologia**. México, Fundo de Cultura e Economia, 380 p.
- Laybauer, L. 1998. Importância da caracterização do sedimento de fundo em diagnósticos ambientais de ecossistemas aquáticos: uma proposta metodológica. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2., 1998, Porto Alegre. *Artigos Técnicos...* Porto Alegre. p. 510-515.
- Livi, F. P. 1998. Elementos do clima: o contraste de tempos frios e quentes. In: Menegat, R.; Porto, M.L.; Carraro, C. C. & Fernandes, L. A. D. (coords.). **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS. p. 73-78.
- Luoma, S. N. & Bryan, G. W. 1981. Statistical assessment of the form of trace metals in oxidized estuarine sediments employing chemical extractants. *Science of the Total Environment*, 17:165-196.
- Malle, K. G. 1990. The Pollution of the River Rhine with Heavy Metals. In: Heling, D.; Rothe, P.; Förstner, U. & Stoffers, P. (eds.). *Sediments and Environmental Geochemistry: Selected Aspects and Case Histories*. Berlin, Springer-Verlag. p. 279-290.
- Martins, I. R.; Martins, L. R., Toldo Jr., E. E. & Gruber, N. L. S. 1987. Processos sedimentares na Lagoa dos Patos. In: CONGRESSO ABEQUA, 1., 1987, Porto Alegre, *Anais...* Porto Alegre, ABEQUA. p. 191-213.
- Menegat, R. & Kirchheim, R. E. 1998. Lagos, rios e arroios: as docas águas da superfície. In: Menegat, R.; Porto, M. L.; Carraro, C. C. & Fernandes, L. A. D. (coords.). **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS. p. 35-40.
- Mudroch, A. 1983. Distribution of major elements and metals in sediments cores from the western basin of Lake Ontario. *Journal of Great Lakes Research*, 9:15-133.
- Oliveira, C. A. A. 1979. A Designação do Guaíba. *Pesquisas*, 12:25-50.

- Pejrup, M. 1988. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach. In: Boer, P. L.; van Gelder, A. & Nio, S.D. (eds.). **Tide-influenced Sedimentary Environments and Facies**. D. Reidel. p. 289-300.
- Rapin, F.; Membrini, G. T.; Förstner, U. & Garcia, J. I. 1983. Heavy metals in marine sediments phases determined by sequential chemical extraction and their interaction with interstitial water. **Environmental Technology Letters**, 4:387-396.
- Salomons, W. & Förstner, U. 1984. **Metals in the Hydrocycle**. Berlin, Springer-Verlag, 349p.
- Salomons, W.; Rooij, N.M.; Kerdijk & Bril, J. 1987. Sediments as a source for contaminants? **Hydrobiologia**, 149:13-30.
- Schorer, M. & Eisele, M. 1997. Accumulation of inorganic and organic pollutants by biofilms in the aquatic environment. **Water, Air and Soil Pollution**, 99:651-659.
- Shepard, F. P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. **Journal of Sedimentary Petrology**, 24:151-158.
- Silveira, A. L. L. 1986. **Modelo hidrodinâmico bidimensional com aplicação ao Rio Guaíba**. Porto Alegre. 237p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Silveira, A. L. L. & Tucci, C. E. M. 1988. Simulação do escoamento bidimensional no Guaíba. **Revista Brasileira de Engenharia**, 6(2):79-104.
- Sly, P. G. 1989. Sediment dispersion: part 1, fine sediments and significance of the silt/clay ratio. **Hydrobiologia**, 176/177:99-110.
- Tessier, A. & Campbell, P. G. C. 1987. Partitioning of trace metals in sediments: relationships with bioavailability. **Hydrobiologia**, 149:43-52.
- Thomas, R. L. & Frank, R. 1987. Introduction to ecological effects of in situ sediments contaminants. **Hydrobiologia**, 149:1-4.
- Toldo Jr., E. E. 1991. Morfodinâmica da Laguna dos Patos, Rio Grande do Sul. **Pesquisas**, 18(1): 58-63.
- Vestergaard, P. 1979. A study of indication of the trace metal pollution of marine areas by analysis of salt marsh soils. **Marine Environmental Research**, 2:19-31.
- Walling, D. E. & Moorehead, P. W. 1989. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment: an overview. **Hydrobiologia**, 176/177:125-149.