

A Ação do Vento como Gestor da Hidrodinâmica na Lagoa Itapeva (Litoral Norte do Rio Grande do Sul-Brasil)

Luciana de Souza Cardoso, André Luiz Lopes da Silveira, David M.L. da Motta Marques
Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH – UFRGS, Av. Bento Gonçalves 9500, caixa postal 15029, cep 91501-970, Porto Alegre – RS
lu.scardoso@ig.com.br; silveira@if.ufrgs.br, dmm@iph.ufrgs.br

Recebido: 16/07/02 – revisão: 15/03/03 – aceito: 19/09/03

RESUMO

A hipótese básica de que o vento age como fator principal determinante da hidrodinâmica da Lagoa Itapeva foi testada neste trabalho. Para tanto, uma caracterização temporal (diária e sazonal) foi efetuada para as variáveis meteorológicas e hidrológicas. A direção predominante dos ventos na região foi entre os quadrantes NNE-ENE e SW-W. O fetch efetivo calculado em função das direções predominantes de ventos sazonalmente possibilitou a compreensão dos padrões hidrodinâmicos espaciais e temporais na Lagoa Itapeva. O nível d'água respondeu à ação do vento de forma bastante direta, ocorrendo um deslocamento da massa d'água no sentido deste. A velocidade do deslocamento d'água foi a variável hidrológica mais dependente das combinações entre velocidade e direção do vento, agindo de forma distinta entre os pontos na lagoa sazonalmente. Padrões entre velocidade do vento e velocidade d'água puderam ser constatados. A análise de variância (ANOVA) evidenciou que, numa escala temporal, o efeito do dia foi muito mais significativo no comportamento hidrodinâmico do que o efeito da hora. Em escala espacial, existiu uma variância significativa horizontalmente. O comportamento hidrodinâmico da Lagoa Itapeva ficou bem retratado, onde o ponto Centro realmente foi delimitado por um espaço físico de transição entre os extremos, com comportamentos ora semelhantes ao ponto Sul e ora, ao ponto Norte.

Palavras-chave: hidrodinâmica, lagoa costeira, vento, fetch, Lagoa Itapeva.

INTRODUÇÃO

Estudos retratando o comportamento físico, incluindo o impacto de fatores físicos externos, os quais funcionam diferentemente em escala temporal, são pré-requisitos para compreender as interações entre processos físicos e biogeoquímicos, e como ecossistemas aquáticos funcionam. Descrições físicas de lagoas costeiras são abundantes, mas são usualmente incompletas e não permitem estabelecer ligações funcionais entre processos químicos e biológicos (Kjerfve & Knoppers, 1999). A dependência da qualidade da água e eutrofização na descarga, movimento hidrodinâmico e dinâmica física são de fundamental importância para o planejamento e implementação de estratégias na gestão em lagoas costeiras (Kjerfve & Magill, 1989).

O tamanho e a forma de um sistema aquático influenciam muitas de suas características físicas, químicas e biológicas. Assim, os processos hidrodinâmicos são afetados pela morfometria de um corpo d'água (Wetzel, 1993), especialmente pelo tamanho da lagoa e sua orientação com relação à direção dos ventos predominantes, pela topografia do fundo e pela profundidade média. Os efeitos do vento tendem a ser mais pronunciados em lagoas maiores, especialmente quando o eixo longitudinal é paralelo à direção dos ventos predominantes. Ainda entre as condi-

ções geomorfológicas que favorecem a ação do vento sobre a lâmina d'água estão os elevados valores de comprimento e largura máximos efetivos, bem como os valores reduzidos de profundidade relativa (Panosso et al., 1998). Assim, estas características se aplicam muito bem ao caso da Lagoa Itapeva.

As oscilações e correntes que derivam da transferência de energia eólica para água podem estar em fase ou em oposição, mas acabam por degradarem-se em movimentos arrítmicos de turbulência. É importante compreender as propriedades básicas dos fluxos de turbulência e da difusão para poder apreciar a magnitude das alterações por elas provocadas na distribuição das variáveis físico-químicas e biológicas em lagos (Wetzel, 1993). Stress do vento também induz mistura em lagoas costeiras através da formação de células de circulação de *Langmuir*, ondas de vento e correntes variáveis (Kjerfve & Magill, 1989).

A ação dos ventos na região litorânea do Rio Grande do Sul é muito importante, pois seus efeitos são sentidos em toda a planície (Schwarzbold & Schäfer, 1984). O sistema eólico mostrou-se ser de enorme importância no contexto ambiental, e é controlado por um regime de ventos de alta energia e baixa variabilidade direcional (Medeiros, 1992). A direção predominante deste na região costeira do RS é do quadrante NE (Schwarzbold & Schäfer, 1984; Medeiros, 1992) e SW (Würdig, 1987). Dados sobre velocidade e frequência de atuação de ventos na

região costeira do Estado foram apresentados no passado por Jost & Soliani Jr. (1976) e Godolphim (1976).

Em face de todos estes argumentos apresentados, a hipótese básica deste trabalho é a de que o vento age como fator principal determinante da hidrodinâmica da Lagoa Itapeva. Assim, o objetivo de caracterizar o comportamento temporal (diário e sazonal) do vento e das variáveis hidrológicas, bem como estabelecer as relações entre os mesmos, tornou-se imprescindível para testar esta hipótese. Com isso, o conhecimento gerado sobre a limnologia física deste sistema aquático foi de grande aplicabilidade para os padrões de distribuição espacial e temporal de variáveis físico-químicas e biológicas investigadas (Cardoso, 2001).

MATERIAL E MÉTODOS

A Lagoa Itapeva, objeto deste estudo, é a primeira (N→S) de um sistema de lagoas costeiras de água doce interligadas no Litoral Norte do Rio Grande do Sul (Fig. 1). Tem formato alongado (30,8 x 7,6 km), uma superfície de $\cong 125 \text{ km}^2$ e profundidade máxima de 2,5 m, sendo portanto caracterizada como uma lagoa rasa e com o eixo principal orientado paralelamente à direção predominante dos ventos.

As amostragens dos dados hidrometeorológicos foram efetuadas nas seguintes campanhas de longa-duração: 14 a 20/dezembro/1998 (primavera), 01 a 07/março/1999 (verão), 20 a 26/maio/1999 (outono), 13 a 19/agosto/1999 (inverno).

A torre do ponto Centro (Fig. 1) foi escolhida como o local apropriado para monitorar as condições meteorológicas, onde foi instalada uma estação para tomada destes dados (DAVIS, Weather Wizard III, Weather Link). As variáveis monitoradas foram: temperaturas máxima e mínima, precipitação, velocidades média e máxima do vento, e direção do vento. Os resultados de direção do vento foram transformados para valores em graus, onde: N= 0°, NE= 45°, E= 90°, SE= 135°, S= 180°, SW= 225°, W= 270°, NW= 315°. Demais valores intermediários foram obtidos a partir de médias entre estes ângulos. A frequência de registro das leituras foi feita a cada 30 minutos durante os 7 dias de campanha sazonal.

A partir dos resultados de direção do vento predominante em cada estação do ano foi calculado o *fetch* efetivo (L_f em km) (Håkanson, 1981) para cada ponto de amostragem utilizando mapa da região em escala 1:250 000 (Brasil, 1994). Também foi feita uma estimativa da altura de onda produzida e a dinâmica de fundo em relação à velocidade do vento, profundidade e *fetch* (Håkanson, 1981). Outros parâmetros morfométricos (Håkanson, 1981) também foram calculados, tais como: comprimento máximo (L_{max} em km), comprimento máximo efetivo (L_e em km), comprimento efetivo (L_s em km), largura máxima (B_{max} em km), largura máxima efetiva (B_e em km) e largura média (B em km).

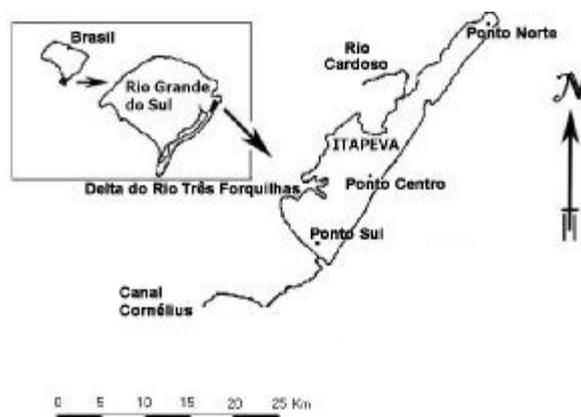


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo com os pontos de amostragem na Lagoa Itapeva (RS – Brasil).

Para o monitoramento do movimento da água, três linígrafos (A. OTT, datalogger IPH) foram instalados na lagoa, nos pontos Norte, Centro e Sul (Fig. 1). O linígrafo apenas forneceu dados de nível d'água e, através de modelo matemático (IPH-A), foi possível obter dados de velocidade e direção do deslocamento d'água na lagoa (Lopardo, 2002). Os resultados de direção do movimento da água seguiram as mesmas transformações para graus adotadas com relação à direção do vento. O nivelamento das réguas foi feito a partir da construção de RNs (referência de nível) específicos para cada um dos pontos de amostragem, tomando como base o RN situado no entroncamento de Curumim-Terra de Areia na interpraia (RS-389).

A frequência de registro das leituras do linígrafo foi feita a cada 15 minutos durante os 7 dias de campanha sazonal ($n= 672$), enquanto que na estação meteorológica, a cada 30 minutos ($n= 336$). Entretanto, os dados foram apresentados a partir de médias em turnos de 4 horas, pelos seguintes motivos: a) as diferenças entre as médias (30 min e 4h) não foram significativas ($p < 0,05$); b) a apresentação dos dados na forma gráfica torna-se mais clara (n menor); c) facilitar a interação com os outros dados abióticos e bióticos, pois foram também amostrados em turnos de 4h (Cardoso, 2001).

Estes resultados do movimento da água foram estatisticamente analisados através de ANOVA entre os pontos e entre as campanhas de amostragem (datas e turnos) a fim de verificar a existência ou não de variabilidade destes fatores físicos no tempo e espaço. Uma análise de agrupamento (técnica de ligação simples e distância euclidiana) também foi efetuada com o propósito de determinar o grau de similaridade existente entre os pontos (somente com dados do linígrafo). A amplitude de resposta para cada variável foi determinada através de análise descritiva, por ponto e campanha de amostragem. Correlações (r -Pearson) entre as variáveis meteorológicas com as hidroló-

gicas foram estabelecidas. Esta análise de correlação serviu para quantificar o grau de associação entre estas variáveis. O programa estatístico utilizado para estas análises foi o STATISTICA® Versão 4.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estação Meteorológica

Os valores de temperatura atmosférica (Fig. 2) exibiram um padrão unimodal sendo maiores no verão (mar/99) e menores no inverno (ago/99). Entretanto, os maiores desvios geralmente foram encontrados no inverno e os menores no verão, evidenciando uma maior constância nesta estação.

Quanto à velocidade do vento (Fig. 3), os valores médios mais elevados, estiveram bastante próximos na primavera (dez/98) e no inverno (ago/99). É bastante característica na região litorânea do RS a presença constante de ventos, especialmente durante a primavera, sendo que no inverno estes valores estiveram relacionados com a chegada de uma frente fria do quadrante sul. Entretanto, os valores máximos mais elevados, assim como os maiores desvios foram obtidos no outono (mai/99), estando este fato relacionado com a chegada de uma forte frente fria dos quadrantes SW-W no início da campanha (20/mar/99). A maior amplitude de variação, registrada tanto no outono quanto no inverno, certamente esteve relacionada com a chegada destas frentes frias na região e com o registro de períodos de calmaria total, ou seja, sem vento. O verão foi caracterizado como a estação do ano mais estável, devido aos valores mais baixos, assim como os menores desvios.

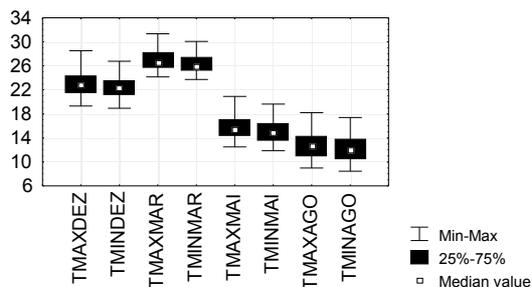


Figura 2 - Distribuições dos valores de temperatura atmosférica (°C), máxima (TMAX) e mínima (TMIN) nas campanhas de amostragem na Lagoa Itapeva, onde: DEZ= dezembro/98, MAR= março/99, MAI= maio/99, AGO= agosto/99.

A precipitação média foi mais marcante no período de outono (Fig. 4). Ao analisar a precipitação acumulada durante a semana de campanha, o outono (29,03 mm) e o inverno (17,4 mm) foram definitivamente apontados como as estações mais chuvosas em detrimento a primavera (7,4 mm) e verão (7,6 mm).

Quanto à direção dos ventos (Fig. 5), nota-se que a primavera (dez/98) foi a estação na qual ocorreu a maior amplitude de variação, sendo mais frequentes ventos dos quadrantes NNE e W (Fig. 6).

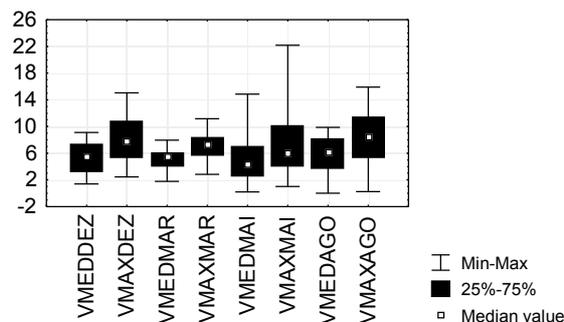


Figura 3 - Distribuições dos valores de velocidade do vento (m.s⁻¹), máxima (VMAX) e média (VMED), nas campanhas de amostragem na Lagoa Itapeva, onde: DEZ= dezembro/98, MAR= março/99, MAI= maio/99, AGO= agosto/99.

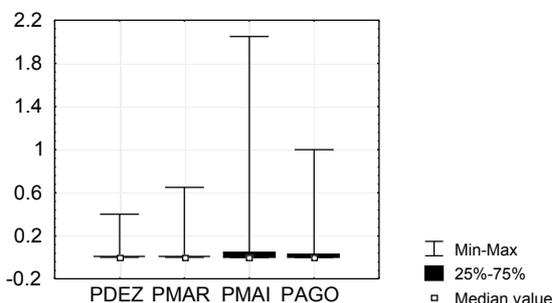


Figura 4 - Distribuições dos valores de precipitação (P em mm) nas campanhas de amostragem na Lagoa Itapeva, onde: DEZ= dezembro/98, MAR= março/99, MAI= maio/99, AGO= agosto/99.

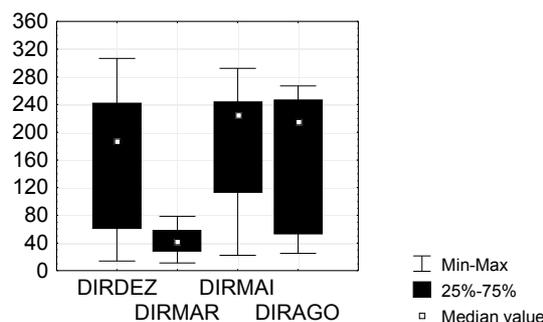


Figura 5 - Distribuições dos valores de direção (DIR em °) nas campanhas de amostragem na Lagoa Itapeva, onde: DEZ= dezembro/98, MAR= março/99, MAI= maio/99, AGO= agosto/99.

Entretanto, no verão (mar/99) os ventos foram característicos do litoral, oscilando somente entre os qua-

drantes N e E (Fig. 6), sendo a menor amplitude de variação observada entre as campanhas. Assim como na primavera, no outono (mai/99) também foram registrados ventos de diversas direções, contudo, estes foram mais frequentes entre os quadrantes SW e W evidenciando a chegada de uma forte frente fria na região (Fig. 6). O inverno (ago/99) foi a estação que mais se aproximou da primavera quanto a frequência na direção dos ventos, pois também ficou evidente predomínio destes de quadrantes opostos (NE e WSW) (Fig. 6). Com isso, constatou-se que durante as campanhas sazonais ventos de duas direções foram dominantes na Lagoa Itapeva: a) quadrantes NNE-ENE ocorrendo em todas as estações do ano, com predomínio durante o verão; e b) quadrantes SW-W excetuando o

verão, com predomínio durante o outono e inverno. Assim, a baixa variabilidade direcional dos ventos mencionada por Medeiros (1992) para o litoral norte do RS foi também aplicada para este período de estudo, excetuando a primavera (dez/98).

Também no Rio de Janeiro, a passagem de frentes frias com fortes ventos foi mais frequente no outono e inverno, e ventos NE dominaram no verão. Estas frentes frias elucidaram a importância de passagens frontais em regular mudanças sazonais no balanço hidrológico, pois causaram vigorosa mistura induzida pelo vento e ressuspensão de sedimentos (Kjerfve & Knoppers, 1999).

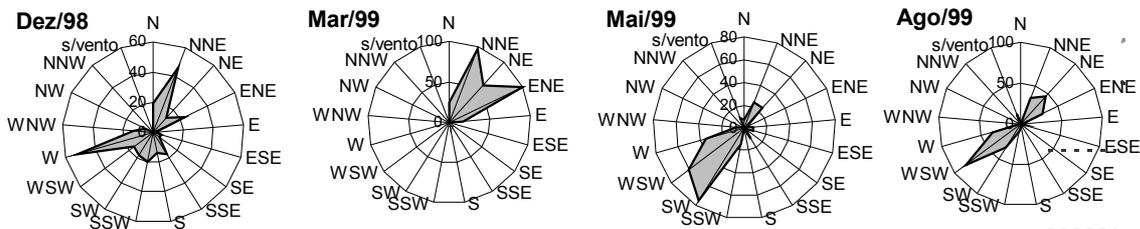


Figura 6 - Frequência da distribuição da direção de ventos durante as campanhas sazonais na Lagoa Itapeva.

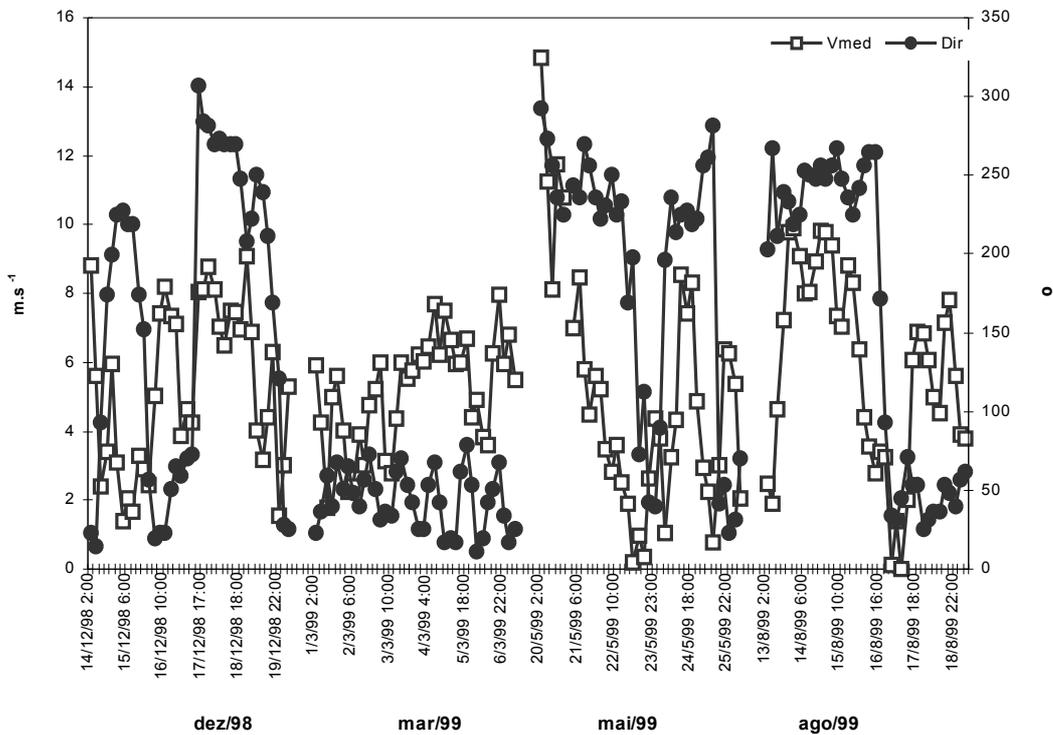


Figura 7 - Distribuição da velocidade, média (Vmed) e máxima (Vmax), e direção (Dir) dos ventos em cada campanha de amostragem na Lagoa Itapeva.

O comportamento do vento durante as campanhas (Fig. 7) revelou que no outono (mai/99) e no inverno (ago/99) as oscilações ocorridas nas velocidades médias e máximas foram bastantes similares. Ou seja, estas velocidades foram mais intensas no início do período de amostragem, diminuindo em direção ao meio da campanha até atingir dois períodos sucessivos de calmaria. Por outro lado, a primavera (dez/98) e o verão (mar/99) também exibiram um padrão semelhante, porém as velocidades na primavera quase sempre excederam as do verão. O maior pico foi registrado no outono.

Confrontando os dados de velocidade com direção dos ventos (Fig. 7), tanto na primavera (dez/98) quanto no inverno (ago/99) o pico mais intenso ocorreu em direções de vento de SW-W, enquanto que o segundo pico, em direções dos quadrantes E-NE. No verão (mar/99), as oscilações praticamente a intervalos constantes de velocidades do vento foram acompanhadas por pequenas oscilações na direção, sendo que os picos coincidiram com o quadrante ENE. Já no outono (mai/99), os dois picos de velocidades ocorreram em direções do vento de SW-W.

Aspectos morfométricos

Parâmetros morfométricos da Lagoa Itapeva para uma caracterização descritiva do ambiente, bem como para compreensão das dimensões que o efeito hidrodinâmico apresenta foram calculados (Tabela 1).

O *fetch* efetivo (Lf) foi calculado para cada ponto de amostragem na Lagoa Itapeva, bem como para as dimensões máximas, em função da direção de vento predominante em cada estação do ano. Utilizando os dados de velocidades do vento (média e máxima) juntamente com os valores do *fetch* efetivo (Lf) foi possível estabelecer a altura da onda produzida no sistema, bem como a dinâmica com o fundo em termos de ressuspensão de partículas. Com isso, pode-se constatar que *fetch* de direção SW (8,6km do ponto Centro a 19,8 km do ponto Sul) e WSW (5,7 do ponto Centro a 14,0 km do ponto Sul) produziram um efeito de maior extensão e intensidade na Lagoa Itapeva. Estes ventos foram predominantes durante o outono (mai/99) e inverno (ago/99), justamente quando foram obtidos os registros máximos de velocidade destes (Fig. 3). Por isso, a relação entre o *fetch* efetivo e a altura de onda produzida teve uma maior intensidade nestas épocas do ano, chegando a gerar ondas maiores que a própria profundidade dos pontos de amostragem (até 2,2m em mai/99 e até 1,5m em ago/99). Particularmente os pontos Centro e Norte é que foram os mais atingidos nestas épocas do ano, devido a maior extensão de exposição ao vento.

Uma outra situação crítica ocorreu durante a primavera (dez/98), quando ventos predominantes de direção W tiveram o seu maior efeito diretamente no ponto Centro. Assim, foi calculado o *fetch* efetivo da margem W oposta ao ponto Centro e obtido um valor de 14,7 km, ou seja,

muito maior que a própria distância existente (5,5 km). Além disso, a altura de onda máxima produzida (0,7 a 1,2m) foi maior que a própria profundidade local (0,9m).

Tabela 1 - Parâmetros morfométricos da Lagoa Itapeva, calculados a partir de mapa com escala 1:250000 (Brasil, 1994).

PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS		km
Comprimento máximo	Lmax	30,8
Comprimento máximo efetivo	Le	30,8
Comprimento efetivo do N	Ls	28,8
Comprimento efetivo do C	Ls	19,3
Comprimento efetivo do S	Ls	28,5
Largura máxima	Bmax	7,6
Largura máxima efetiva	Be	7,6
Largura Média (área 95,16 km ²)	B	3,1
Largura Média (área 124,75 km ²)*	B	4,05
Distância entre pontos (em linha reta)	N-C	20,1
	N-S	28,4
	C-S	8,4

N = ponto Norte, C = ponto Centro, S = ponto Sul.

* dados obtidos por Lopardo (2002)

Ventos de quadrante NE (NNE a ENE) foram predominantes durante o verão (mar/99) e inverno (ago/99) na Lagoa Itapeva. Porém, o efeito do *fetch* efetivo foi de menor extensão devido principalmente à menor largura existente na porção Norte da lagoa. Assim, ventos desta direção produziram um efeito mais intenso do ponto Centro em direção ao ponto Sul (10,6 a 15,6 km) do que em termos de comprimento máximo (N→S 12,4 km), chegando a valores maiores que a própria distância entre estes pontos (Tab. 1). Com isso, durante o verão e no final do inverno foi esperado a encontrar maior perturbação no ponto Sul que nos demais. Contudo, como a velocidade dos ventos foi menor durante o verão (Fig. 3), o efeito da onda gerado foi de menor intensidade (até 0,85m) que o evidenciado no inverno (até 1,2m).

O efeito desta onda produzida tornou-se mais visível quando relacionado à dinâmica de fundo. Assim, a menor onda produzida (0,3 m) já era capaz de ressuspender até areia grossa (segundo escala granulométrica de Wentworth, 1922) e inclusive seres vivos bentônicos pertencentes a estas classes de tamanho. Isto justificou a presença destes organismos na coluna d'água nestas situações, apontando as espécies indicadoras de hidrodinâmica (Cardoso, 2001).

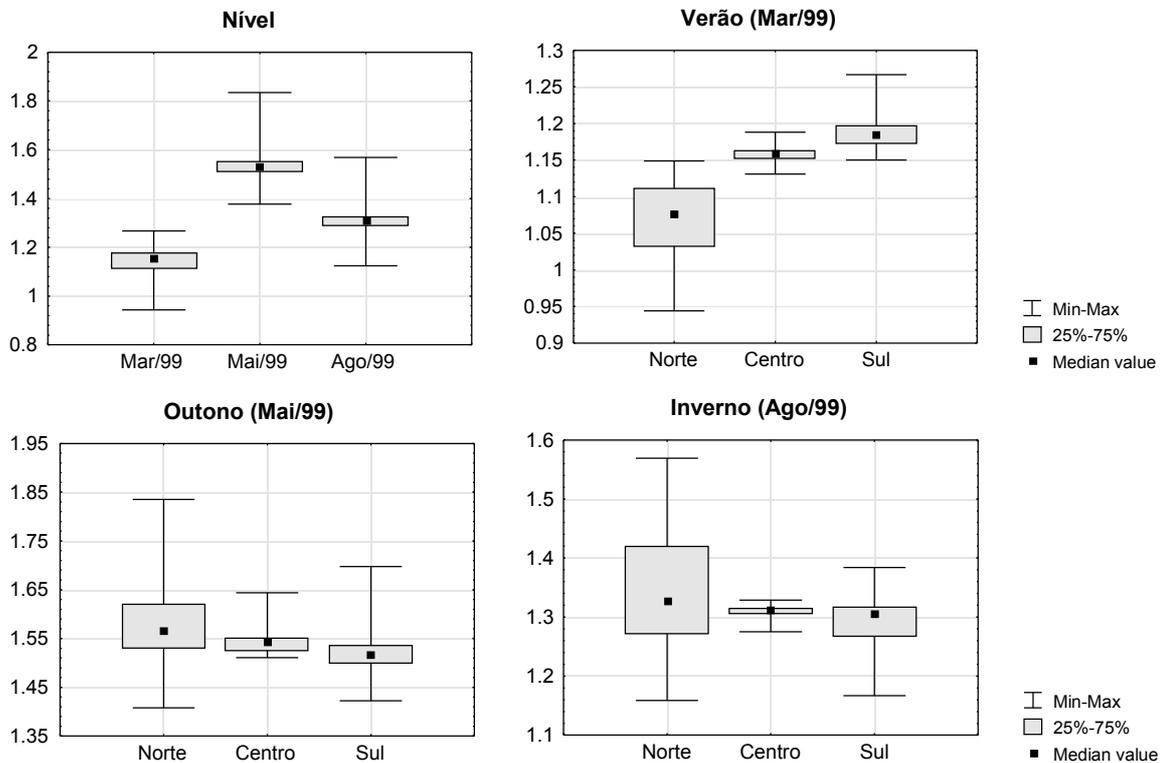


Figura 8 - Variação do nível d'água (m) durante as campanhas e entre os pontos de amostragem na Lagoa Itapeva.

Linígrafo

Dados de movimento d'água não puderam ser obtidos durante a primavera (dez/98), devido a problemas ocorridos no "datalogger" dos linígrafos. Contudo, os valores de leitura instantânea da régua, durante os turnos e dias de amostragem das variáveis físico-químicas e biológicas, mostrou que o nível d'água mais elevado (período de cheia) predominantemente ocorreu durante o outono (mai/99), nos três pontos de amostragem. O oposto, ou seja, nível d'água mais baixo (período de seca) foi registrado para o verão (mar/99).

Analisando os dados obtidos pelos linígrafos (excetuando a primavera) novamente ficou constatado que o outono (mai/99) foi a estação onde o nível d'água foi mais elevado e, no verão (mar/99), o mais baixo (Fig. 8). Quanto aos pontos de amostragem (Fig. 8), na análise geral das estações do ano o valor médio obtido foi praticamente o mesmo nas estações frias do ano (mai/99 e ago/99), porém maiores no Sul durante o verão (mar/99). Este efeito de gradiente crescente de Norte para Sul durante o verão esteve associado à direção do vento, predominantemente entre os quadrantes N e E, gerando um *fetch* constante no

sentido N→S. Porém, durante o outono e inverno nota-se um leve gradiente em sentido oposto, agora provocado por ventos mais frequentes de SW-WSW. No Norte foi registrada a maior amplitude de oscilação do nível d'água. O Centro e o Sul exibiram um comportamento bastante semelhante. Durante o verão (mar/99), este no Sul foi maior durante toda a campanha, mostrando melhor o forte gradiente evidenciado (Fig. 8). Já no outono (mai/99) e inverno (ago/99), o ponto Norte foi o que exibiu os maiores valores (Fig. 8), porém não de forma constante. Nestas épocas do ano também ocorreram as maiores diferenças de nível entre os pontos Norte e Sul num único dia (1º dia de campanha), com 0,42m no outono (14h) e 0,40m no inverno (22h). Os momentos onde o nível baixou no Norte, durante estas estações, coincidiram ou com a inversão na direção do movimento da água ou com mudança na direção do quadrante predominante do vento (quadrante NE), fazendo com que no Sul este tivesse se elevado. Assim, ficou nítido o efeito do *fetch* na hidrodinâmica da Lagoa Itapeva.

Quanto à velocidade do movimento d'água, os valores médios obtidos nas campanhas e nos pontos de amostragem praticamente não apresentaram diferenças entre si (Fig. 9). O máximo de velocidade ocorreu durante

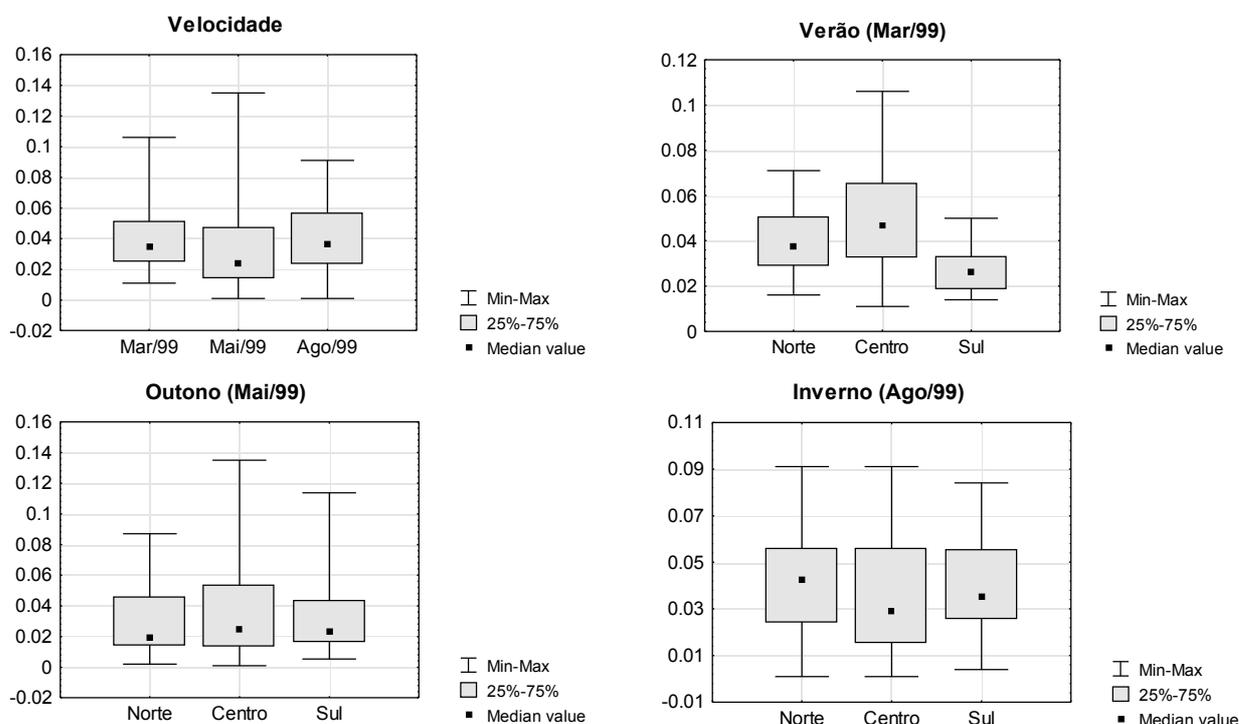


Figura 9 - Variação da velocidade d'água (m.s⁻¹) durante as campanhas e entre os pontos de amostragem na Lagoa Itapeva.

o outono (mai/99) no ponto Centro. A velocidade do movimento evidenciou valores levemente superiores no ponto Centro, com exceção do inverno (ago/99), onde os pontos foram bastante semelhantes entre si (Fig. 9). O outono (mai/99) foi a estação onde se obteve os valores máximos mais elevados, assim como a maior amplitude de variação dos mesmos (Fig. 9).

Quanto a direção do movimento d'água, no verão (mar/99) permaneceu distribuída entre os quadrantes SW-WNW, sendo mais freqüente no primeiro. No outono (mai/99) e no inverno (ago/99) ocorreu uma maior oscilação nesta direção, porém a maior freqüência foi registrada para o quadrante NE, seguido pelo SW. Esta presença constante de fluxo na direção SW em todas as estações do ano provavelmente esteja relacionada diretamente com o deságüe do Rio Três Forquilhas, situado na margem SW da Lagoa Itapeva.

Embora os pontos Centro e Sul tenham exibido comportamentos semelhantes quanto ao nível d'água sazonalmente, o mesmo não foi evidenciado em termos de movimento d'água (velocidade e direção). Assim, Norte e Centro exibiram uma direção de fluxo bastante semelhante e constante. Ou seja, durante o verão (mar/99) a direção do movimento foi predominantemente de SW nestes. Já no outono (mai/99) e inverno (ago/99) a direção do movimento ocorreu em dois sentidos, NE com maior freqüência e SW com menor. Contudo, no Sul ocorreu uma

maior amplitude de variação no sentido do fluxo, com exceção do verão (W-WNW).

Existiu uma estreita relação entre a direção do movimento d'água e do vento no efeito causado em cada ponto na Lagoa Itapeva. Tanto no Norte quanto no Centro a direção do movimento d'água foi exatamente a oposta da exibida pelo vento. Assim, o deslocamento superficial de água ocorreu no sentido da direção do vento, porém, quando esta atingiu a margem oposta, fez com que o seu movimento se perpetuasse no sentido oposto. Entretanto no Sul este efeito direto do vento não pode ser sentido exclusivamente. Isto porque o Sul está situado muito próximo da foz do Rio Três Forquilhas, fazendo com que este deságüe também interfira no fluxo de movimento d'água, perturbando-o neste sentido.

Análise dos Dados

A região sul do Brasil é caracterizada por um clima subtropical, com as quatro estações do ano bastante definidas. Assim, como era de se esperar a ANOVA comprovou a existência de variância altamente significativa ($p < 0,01$) entre as campanhas sazonais com relação aos dados meteorológicos, tanto utilizando o dia ou a hora como fatores. Exceção ocorreu somente para a variável precipitação quando foi testado o efeito da hora.

Com relação aos dados hidrológicos, ao verificar a variância dos pontos em cada campanha sazonal a ANOVA (“two-way”, $n=38$) demonstrou que esta variância espacial foi significativa para o nível d’água em todas as campanhas sazonais, testando o efeito do dia e/ou pontos ($p<0,01$). Porém, quando o efeito da hora foi testado, somente ocorreu variância significativa ($p<0,001$) no ponto durante o verão (mar/99) e outono (mai/99). Isto parece indicar que a hora não exerceu uma variação nítida no nível da lagoa entre os pontos, mas sim a sucessão de dias dentro de cada campanha sazonal como um efeito de maior magnitude. De fato, para a oscilação do nível ter sido percebida em termos de horas, a declividade da lagoa teria que ser bastante acentuada ou durante um evento climático adverso intenso e de longa duração (Cardoso, 2001).

A velocidade do movimento d’água foi significativamente diferente entre os pontos em todas as campanhas sazonais quando o efeito do dia foi testado ($p<0,001$). Novamente o efeito da hora não apresentou resultados significativos, somente durante o verão quando em interação desta com o ponto ($p<0,001$). Isto porque oscilações na velocidade ocorreram dentro do mesmo dia especialmente entre os pontos Centro e Sul (Fig. 9).

A ANOVA apontou variância significativa espacialmente ($p<0,001$), em todas as estações do ano, para a direção do movimento d’água tanto para dia quanto hora como fatores testados. Embora os pontos Norte e Centro tivessem exibidos direções semelhantes entre si, estas diferiram enormemente da registrada para o Sul.

Quando a ANOVA foi testada com relação a três fatores (“three-way”, $n=126$) todas as variáveis hidrológicas (nível, velocidade e direção) apresentaram variância significativa sazonalmente ($p<0,001$), tanto para os pontos ($p<0,05$) e dias de amostragem ($p<0,001$) quanto na interação dia com mês de amostragem ($p\leq 0,01$). Contudo, quando os efeitos testados foram ponto e hora ou dia e hora, para as estações do ano como medidas repetidas, o fator hora foi significativamente diferente somente com relação à velocidade ($p<0,05$). Assim, ficou mais uma vez enfatizado que tanto para o nível quanto para a direção do movimento d’água o efeito da hora na variação destes não obteve valor significativo.

A análise de agrupamento (“cluster”) dos dados hidrológicos evidenciou similaridades distintas entre os pontos de amostragem para cada variável.

Quanto ao nível d’água, os pontos Centro e Sul sempre estiveram mais proximamente ligados em todas as campanhas sazonais (Figs. 8 e 10). Já com relação à direção do movimento d’água, os pontos Centro e Norte foram os que estiveram mais proximamente ligados em todas as campanhas (Fig. 10).

Entretanto, combinações distintas de agrupamentos entre os pontos ocorreram em função da velocidade do deslocamento da água para cada campanha sazonal (Fig. 10). Assim, durante o verão (mar/99) o Norte e Centro estiveram mais próximos, sendo o efeito do vento, predominantemente de NNE-ENE, no fluxo d’água já discutido

anteriormente e, certamente, decisivo neste sentido. Da mesma forma para o outono (mai/99), quando os ventos do quadrante SW-W foram os grandes impulsionadores do fluxo nos pontos Sul e Centro. Já durante o inverno (ago/99), onde os ventos dominantes foram de quadrantes opostos (WSW e NE) fez com que o fluxo dos pontos extremos da lagoa, Norte e Sul, exibissem comportamentos similares.

Os dois grandes agrupamentos formados, para todas as variáveis hidrológicas, separaram a campanha do outono (mai/99) das demais. De fato, a grande variação ocorrida no primeiro dia, seguida por um período de três dias de estabilidade no comportamento hidrológico certamente foi decisiva para separar o outono das demais estações do ano.

Todos estes agrupamentos retrataram bem o comportamento hidrodinâmico da Lagoa Itapeva, onde o ponto Centro realmente foi delimitado por um espaço físico de transição entre os extremos, com comportamentos ora semelhantes ao ponto Sul e ora, ao ponto Norte, dependendo do efeito do *fetch*.

A análise de correlação (r -Pearson, $p<0,05$, $n=38$) serviu para quantificar estas relações entre as variáveis meteorológicas e hidrológicas na Lagoa Itapeva, onde o vento (velocidade e direção) teve forte relação com as variáveis hidrológicas em todas as campanhas sazonais.

Durante o verão, a velocidade do vento apresentou alta correlação negativa com o nível no Norte (-0,82) e positiva no Sul (0,60). Isto também já foi discutido anteriormente, onde o aumento da velocidade de ventos entre os quadrantes N e E fez com que ocorresse o deslocamento de água de N→S, diminuindo o nível no Norte e aumentando no Sul. A velocidade do vento teve uma relação direta com a velocidade do movimento d’água em todos os pontos na lagoa (Norte=0,77; Centro=0,48; Sul=0,63), fortalecendo a hipótese do vento como um fator decisivo na hidrodinâmica da Lagoa Itapeva. A direção do vento apresentou relações tanto com o nível quanto com a velocidade do fluxo d’água em todos os pontos de amostragem, de forma bastante peculiar. A variação da direção do vento de N para E teve uma relação direta com o nível no Norte (0,56) e inversa no Centro (-0,48) e Sul (-0,66). Isto é totalmente plausível em termos da posição geográfica dos pontos na lagoa. Em compensação, a velocidade d’água aumentou no Sul (0,35) favorecida por esta direção de vento e diminuiu no Centro (-0,78) e Norte (-0,53). Relação entre a direção do vento e direção do movimento d’água somente foi significativa no Sul (0,43), pois quanto mais em direção ENE o vento soprava, mais em direção WNW a água se deslocava. A não significância entre estas variáveis, nos pontos Centro e Norte, talvez estivesse vinculada a maior constância de direção do fluxo d’água, não respondendo às oscilações experimentadas pelo vento. Neste caso, parece que o deságüe ascendente do rio Três Forquilhas interferiu diretamente no deslocamento da água na lagoa.

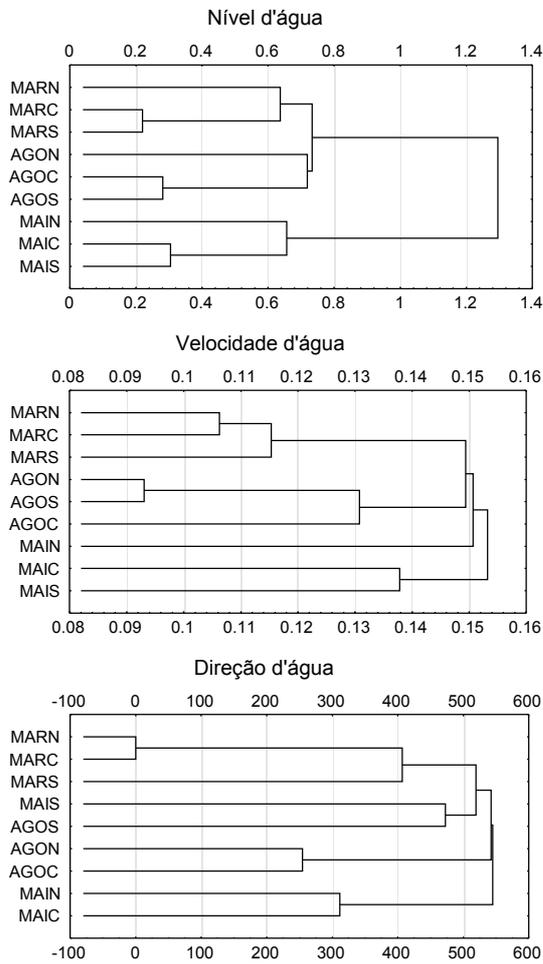


Figura 10 - Análise de agrupamento dos dados hidrológicos por ligação simples e distância euclidiana entre os pontos e as campanhas sazonais na Lagoa Itapeva. MAR= março/99 (verão), MAI= maio/99 (outono), AGO= agosto/99 (inverno), N=Norte, C= Centro, S= Sul.

Durante o outono (mai/99), a velocidade do vento apresentou relação positiva com nível no Norte (0,51) e Centro (0,50). Justamente nesta estação do ano a velocidade do vento teve o registro máximo entre todas as campanhas sazonais (Fig. 3). Esta velocidade vindo principalmente dos quadrantes SW-W teve uma relação significativa nestes pontos. Contudo, esta relação foi muito mais forte com velocidade do movimento d'água em todos os pontos de amostragem (Norte=0,61; Centro=0,85; Sul=0,84). Isto porque as curvas de distribuição de ambas velocidades durante o período exibiram comportamento bastante semelhante. A direção do vento também exibiu correlações positivas com o nível no Norte (0,56) e Centro (0,37), porém com a velocidade do fluxo d'água, somente foi significativa no Sul (0,52). Entretanto, a direção do vento apresentou correlações negativas com a direção do movi-

mento d'água nos três pontos de amostragem (Norte= -0,73; Centro= -0,53; Sul= -0,60). Isto porque as direções do vento e do fluxo d'água normalmente foram opostas, especialmente no Norte e Centro, e levemente deslocadas no Sul.

No inverno (ago/99), correlação entre velocidade do vento e nível d'água exibiu um comportamento oposto ao verificado durante o verão. Ou seja, a correlação foi positiva no Norte (0,54) e negativa no Sul (-0,52), onde as curvas de distribuição destas variáveis demonstraram esta nítida relação (Cardoso, 2001). Em termos da relação com a velocidade d'água, embora a correlação tenha sido mais forte nos pontos extremos da lagoa (Norte=0,91 e Sul=0,89), no Centro esta também foi significativa (0,36). Esta diminuição da correlação no Centro em relação aos outros pontos provavelmente esteve relacionada com a divergência no deslocamento d'água ocorrida, principalmente entre o segundo e terceiro dia. O único momento entre as campanhas onde ocorreu uma relação entre velocidade de vento e direção no movimento d'água foi no inverno para o ponto Sul (-0,38). Esta correlação foi negativa e em termos de velocidade máxima, assim, os picos na velocidade do vento coincidiram com movimentos d'água na direção SE. A direção do vento também exibiu o mesmo comportamento constatado entre velocidade e nível d'água, porém mais forte. Deste modo, ventos do quadrante WSW foram responsáveis por forte elevação do nível no Norte (0,76) e diminuição no Sul (-0,65). A direção do vento também foi positivamente correlacionada com a velocidade no Sul (0,63) e negativamente no Centro (-0,36). Ou seja, o fluxo d'água no Sul foi crescente quando a direção do vento foi de WSW e decrescente no Centro. Entretanto, quando relacionada direção do vento com a do fluxo d'água, esta correlação foi mais alta e negativa em todos os pontos de amostragem (Norte= -0,78; Centro= -0,64; Sul= -0,92) do que havia sido registrada para o outono. Novamente os mesmos motivos discutidos são aplicados aqui, pois os padrões comportamentais foram bastante semelhantes entre outono e inverno para estas variáveis.

A análise de agrupamento (Fig. 10) já havia demonstrado a ação do vento no nível d'água na lagoa atuando com respostas bastante similares no Centro e Sul. A análise de correlação também comprovou esta relação. Correlações elevadas e positivas entre os níveis no Centro e Sul ocorreram em todas as campanhas sazonais (mar/99= 0,74; mai/99= 0,67; ago/99= 0,60). Por outro lado, sempre ocorreram correlações elevadas e negativas entre Norte e Sul (mar/99= -0,82; mai/99= -0,69; ago/99= -0,97).

Já com relação à direção do movimento, o Norte e Centro tiveram comportamentos praticamente idênticos na maioria das estações do ano (mai/99= 0,83; ago/99= 0,89). Isto ficou mais bem retratado na análise de agrupamento do que na de correlação (Fig. 10).

A velocidade do deslocamento d'água foi a variável hidrológica mais dependente das combinações entre velocidade e direção do vento, agindo de forma distinta

entre os pontos na lagoa sazonalmente. Os agrupamentos entre os pontos em cada estação do ano (Fig. 10) coincidiram com as maiores correlações entre os mesmos (mar/99= 0,88; mai/99= 0,69; ago/99= 0,77).

Um padrão entre velocidade do vento e velocidade do movimento d'água na Lagoa Itapeva pode ser observado. Em velocidades médias de vento entre 5 e 10 m.s⁻¹ uma maior relação com a velocidade do movimento d'água ocorreu nos pontos extremos da lagoa, ou seja, Norte e Sul. Por outro lado, quando esta velocidade média do vento foi inferior a 5 m.s⁻¹, como ocorreu no outono, uma maior relação com o movimento ficou evidenciada no Centro e Sul. Em termos de velocidade máxima de vento, a relação desta com o movimento d'água no Sul sempre foi superior ao observado com a velocidade média, enquanto que para os outros pontos isto nunca foi constatado. Assim, em velocidades entre 7 e 8 m.s⁻¹ favoreceram um maior fluxo d'água no Sul.

Em geral, a velocidade das correntes propagadas pelo vento é cerca de 5% da velocidade do vento que as impulsiona, sendo em grande parte independente da altura das ondas. A velocidade da água nas camadas superficiais aumenta com a velocidade do vento até este atingir uma velocidade crítica. Acima dessa velocidade crítica diminui a velocidade das correntes superficiais e o fator vento deixa de ser linear (Wetzel, 1993). Assim, para a Lagoa Itapeva esta velocidade crítica não foi homogênea para todos os pontos. Velocidades acima de 5 m.s⁻¹ no ponto Centro demonstraram ser críticas em muitos casos, aumentando a turbidez e interferindo nos processos biológicos (Cardoso, 2001). Contudo, no ponto Sul o aumento de velocidade, especialmente a máxima do vento, não demonstrou ser crítica para a velocidade do fluxo d'água. Isto mesmo em velocidades acima de 10 ou 15 m.s⁻¹. Tudo isto demonstra que o fator direção do vento é um importante co-fator aliado ao efeito que sua velocidade causa no comportamento hidrodinâmico, conforme apresentado neste trabalho.

É importante enfatizar que toda a variação espaço-temporal aqui caracterizada foi baseada, exclusivamente, no período amostral efetuado. Embora o tamanho da amostra nas análises estatísticas aqui apresentadas tenha sido muito inferior ao amostrado, relações da hidrodinâmica com dados físicos, químicos e biológicos puderam ser bem estabelecidas (Cardoso, 2001). Oscilação no padrão aqui apresentado poderá vir a ocorrer em função de alterações climáticas ou do uso da bacia.

CONCLUSÕES

A hipótese testada de que o vento age como fator principal determinante da Lagoa Itapeva foi confirmada, pois as variáveis hidrológicas exibiram uma variação espacial e temporal intimamente relacionada com o efeito do vento. O comportamento hidrodinâmico foi caracterizado espacial e sazonalmente. Nível d'água apresentou oscila-

ções espaciais em função da direção do vento, contudo, foi bastante semelhante entre os pontos Centro e Sul sazonalmente. Direção do movimento d'água apontou para o Sul como o ambiente de maior perturbação, enquanto que, Centro e Norte exibiram uma maior constância sazonal entre os mesmos. A velocidade do deslocamento d'água foi a variável hidrológica com maior dependência da velocidade do vento, apresentando ampla variação espaço-temporal como resposta direta à ação deste. *Fetch* de direção SW e WSW produziram um efeito de maior extensão e intensidade na Lagoa Itapeva comparado ao de direção NE. Assim, nas estações frias do ano (outono e inverno), quando ventos de SW e WSW são característicos das frentes frias na região, a lagoa torna-se mais perturbada hidrodinamicamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERGS e ao CNPq pelos recursos alocados ao projeto. Agradecimentos também são devidos à comunidade local e, principalmente à equipe de técnicos, bolsistas e estagiários que atuaram nos trabalhos de campo e nas análises laboratoriais.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. (1994). Ministério do Exército. Diretoria de serviço Geográfico. *Gravataí*. 2. ed. [Brasília]. f. SH22-X-C e D MIR 536 e 536A. Esc. 1:250000.
- CARDOSO, L. de S. (2001). *Variações da estrutura planctônica da Lagoa Itapeva (Sistema Lagunar Costeiro do Rio Grande do Sul) em função da hidrodinâmica*. Porto Alegre - RS. p. 466. (Tese de doutorado) – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- GODOLPHIM, M.F. (1976). *Geologia do holoceno costeiro da área de Rio Grande, RS*. Porto Alegre - RS. p. 146 (Dissertação de mestrado). Curso de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- HÅKANSON, L. (1981). *A Manual of Lake Morphometry*. Berlin, Springer-Verlag. p. 78.
- JOST, H. & SOLIANI, Jr. E. (1976). Mapeamento geológico e geomorfológico. In: *Plano Integrado para o Desenvolvimento do Litoral Norte do Rio Grande do Sul*. Adequação do uso do solo. Porto Alegre, Fundação de Economia e Estatística. p. 121.
- KJERFVE, B. & MAGILL, K.E. (1989). Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*, v. 88, p. 187-199.
- KJERFVE, B. & KNOPPERS B.A. (1999). Physical characteristics of lagoons of the East Fluminense Coast, State of Rio de Janeiro, Brazil. In: *Environmental geochemistry of coastal lagoon systems of Rio de Janeiro, Brazil*. KNOPPERS B.A.; BIDONE, E.D. & ABRÃO, J.J. (eds.). Niterói, UFF/Programa de Geoquímica Ambiental; Rio de Janeiro, FINEP (série geoquímica ambiental, n.6). p. 57-67.
- LOPARDO, N. (2002). *Estudo hidrodinâmico e correlação com sólidos suspensos e turbidez na Lagoa Itapeva no Litoral Norte do Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre - RS. p. 160 (Dissertação de mestrado) – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídri-

- cos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MEDEIROS, P.R.P. (1992). *Estudo do Sistema Lagunar-Estuarino de Tramandaí-Imbé: Física e Química da Água*. Porto Alegre - RS. p. 112 (Dissertação de mestrado). Curso de Pós-graduação em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- PANOSSO, R. de F.; ATTAYDE, J.L. & MUEHE, D. (1998). Morfometria das Lagoas Imboassica, Cabiúnas, Comprida e Carapebus: implicações para seu funcionamento e manejo. In: *Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)*. F. de A. Esteves (ed.), NUPEM, UFRJ. p. 91-108.
- SCHWARZBOLD, A. & SCHÄFER, A. (1984). Gênese e morfologia das lagoas costeiras do Rio Grande do Sul - Brasil. *Amazoniana*, v. 9, n. 1, p. 87-104.
- WENTWORTH, C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, v. 30, p. 377-392.
- WETZEL, R.G. (1993). *Limnologia*. Trad. M. J. Boavida. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian. p. 1017.
- WÜRDIG, N.L. (1987). Alguns dados físicos e químicos do sistema lagunar de Tramandaí, RGS. *Pesquisas*, v. 20, p. 49-74.

The wind effect as manager of the Itapeva Lake's hydrodynamic (North Coast of Rio Grande do Sul–Brazil)

ABSTRACT

The basic hypothesis that wind acts as main determinant factor in the hydrodynamics of Itapeva Lake was tested in this study. For this purpose, temporal characterization (daily and seasonal scale) of meteorological and hydrological variables was performed. The predominant wind direction in the area was between quadrants NNE-ENE and SW-W. Effective fetch calculated as a function of the predominant direction of winds made possible to understand spatial and temporal hydrodynamic patterns in Itapeva Lake. Water level responded rather directly to wind action with a displacement of the water mass in the same direction. Water displacement velocity was the hydrologic variable that depended most on combinations between wind speed and direction, acting differently among the sampling points according to season. Patterns could be found between wind speed and water velocity. Analysis of variance (ANOVA) showed that, on a temporal scale, the effect of a day was much more significant in hydrodynamic behavior than that of an hour. On a spatial scale, there was significant horizontal variance. The hydrodynamic behavior of Itapeva Lake was clearly shown, with the Center sampling point well defined by a physical transition space between the ends, with behaviors sometimes similar to those at the South sampling point and others at the North

Key-words: hydrodynamics, coastal lake, wind, fetch, Itapeva Lake.