



EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO EM LAGOAS COSTEIRAS TROPICAIS: UMA ABORDAGEM DE LONGA DURAÇÃO

C.M.A. Torres

V.F. Farjalla

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia, Departamento de Ecologia, CCS, Ilha do Fundão, Cidade Universitária, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
cmat@globo.com

INTRODUÇÃO

Mudanças climáticas podem ocorrer como resultado da liberação excessiva de gases de efeito estufa (GEEs), sobretudo o dióxido de carbono (CO_2), na atmosfera, ou seja, pelo desequilíbrio no balanço entre o potencial de emissão e absorção desses gases. Estes por sua vez formam uma espécie de cobertor atmosférico que torna o planeta cada vez mais quente por não permitir a saída de radiação solar (WWF, 2008).

Os ecossistemas de água doce e áreas úmidas cobrem apenas uma pequena fração da superfície da Terra e, por conta disso, têm sido muitas vezes negligenciados como componentes potencialmente importantes em ciclos de elementos como carbono, nitrogênio e fósforo. No entanto, trabalhos empíricos realizados sobre a bacia Amazônica (Richey *et al.*, 002), bem como nos lagos Wisconsin (Hanson *et al.*, 004) sugerem que os ecossistemas de água doce contribuem significativamente para o equilíbrio regional de carbono e que, em geral, ecossistemas aquáticos são importantes emissores de CO_2 para a atmosfera.

O transporte de carbono orgânico dissolvido (COD) do ambiente terrestre para o meio aquático é uma importante fonte de carbono orgânico em ecossistemas de água doce e, em última instância, o principal responsável pela emissão de CO_2 para a atmosfera (Kling *et al.*, 991; Hope *et al.*, 996; del Giorgio *et al.*, 997; Striegl *et al.*, 001; Algesten *et al.*, 003; Sobek *et al.*, 003; Ramtakari & Kortelainen, 2005). Esta entrada de carbono tende a favorecer o metabolismo heterotrófico, responsável, em aerobiose, pelo consumo de O_2 e a produção de CO_2 . Neste caso, a baixa razão entre a produção primária e a respiração observada em muitos lagos é sugerida como causa da supersaturação de CO_2 nestes ambientes, (Kling *et al.*, 992; Cole *et al.*, 994; Duarte & Augusti, 1998). Outro fato importante para a dinâmica do CO_2 em ecossistemas aquáticos é a disponibilidade de nutrientes inorgânicos com o nitrogênio (N) e o fósforo (P). Geralmente, lagos com altas concentrações de P e baixas concentrações de COD tendem a ser autotróficos, isto é ten-

dem a absorver CO_2 da atmosfera, enquanto que lagos com baixas concentrações de P e altas concentrações de COD tendem a ser heterotróficos, isto é, tendem a emitir CO_2 para a atmosfera (Cole *et al.*, 2000).

As comunidades aquáticas liberam ou assimilam CO_2 do meio, alterando, conseqüentemente, o balanço entre as formas de carbono inorgânico dissolvido (dióxido de carbono, carbonatos e bicarbonatos) da água e afetando seu pH. Na água, o CO_2 geralmente está combinado com outros compostos, até mesmo com a própria molécula de água, que reage facilmente com este composto logo que ele se difunde no meio aquoso, formando o ácido carbônico (H_2CO_3). Por ser um ácido fraco, logo após sua formação, este sofre uma primeira dissociação formando íons de hidrogênio e bicarbonato (HCO_3^-) e em seguida uma segunda dissociação formando os íons de hidrogênio e carbonato (CO_3^{2-}). Estas formas estão fundamentalmente relacionadas com o pH do meio (Gloterman *et al.*, 978). Os valores de pH das lagoas costeiras geralmente são maiores que 7, sendo decorrente do aporte de carbonatos e bicarbonatos oriundos do mar e também do balanço hídrico negativo (onde a precipitação é menor do que a evaporação) observado em algumas das lagoas.

Kjerfve (1994) define lagoas costeiras como corpos aquáticos rasos, separadas do oceano por uma barreira de areia. Segundo Smith (1994), quanto mais rasa a lagoa costeira, mais este ecossistema está sujeito a variações em seu balanço hídrico, térmico e salino. São ecossistemas de acúmulo de matéria orgânica, isto é, estes ambientes são capazes de reter matéria orgânica e inorgânica oriundas do continente, além de diversos íons e outras substâncias, atuando como verdadeiros filtros. Particularmente na zona costeira norte fluminense do Estado do Rio de Janeiro, são encontradas dezenas de lagoas costeiras que variam muito em relação às concentrações de sais, nutrientes e matéria orgânica dissolvida. Pela sua abundância e grande variação espacial das condições limnológicas, as lagoas costeiras do Estado do Rio de Janeiro podem ser consideradas como ecossistemas - modelo para estudos do ciclo do carbono em ecossistemas

aquáticos.

OBJETIVOS

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de lagoas costeiras como emissores de gás carbônico para a atmosfera ao longo de nove anos de amostragens mensais.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

Amostragens mensais, entre os anos de 2000 e 2008, foram realizadas em quatro lagoas do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba (22° 20'S, 41° 49'W) - Lagoa Cabiúnas, Carapebus, Comprida e Piripiri, que abrange os municípios de Macaé, Carapebus e Quissamã e uma lagoa no centro urbano de Macaé (Lagoa Imboassica), todas localizadas na região norte fluminense do Estado do Rio de Janeiro. As lagoas Cabiúnas, Carapebus e Imboassica obtiveram mais de um ponto amostral devido a maior área ocupada quando comparadas com as demais: (a) Cabiúnas-um ponto no centro da lagoa e outro em um de seus braços; (b) Carapebus-um ponto próximo a barra de areia, um outro ponto na área central e um terceiro ponto próximo à desembocadura de um canal de esgoto doméstico in natura; (c) Imboassica: um ponto próximo a barra de areia, um ponto próximo à desembocadura de um canal de esgoto doméstico in natura, um ponto na parte mais continental próximo a um banco de macrófitas e um outro situado na área central da lagoa. Nas lagoas Comprida e Piripiri foi definida apenas uma estação amostral em sua área central.

Coleta

As variáveis penetração de luz e profundidade (disco de Secchi), temperatura da água (termistor digital) e do ar (termômetro de bulbo), oxigênio dissolvido (oxímetro digital), condutividade elétrica (condutivímetro) e salinidade (salinômetro) foram obtidas diretamente nos locais de coleta. Para determinação das concentrações do pigmento clorofila a, alíquotas de água de cada estação amostral foram filtradas e os filtros encaminhados para o laboratório onde também foram determinados os teores das formas nitrogenadas, fosfatadas, carbonadas e silicatos da água de cada estação amostral. As análises no laboratório foram efetuadas segundo os métodos propostos por Golterman *et al.*, (1978) e Mackereth *et al.*, (1978).

A capacidade do ambiente em emitir CO₂ se traduz na forma da pressão parcial de CO₂ (pCO₂), sendo calculada levando em consideração os dados de temperatura da água, salinidade e concentração de CO₂ dissolvido. Este último por sua vez foi estimado com base em medidas de pH e alcalinidade total da coluna d'água (método Gran).

Análises Estatísticas

Através de uma análise de variância (RM ANOVA) testamos, ao longo dos anos: (i) a variação espacial dentro das lagoas e (ii) a variação espacial entre lagoas na emissão de CO₂.

Para analisar a variação intralagunar, testamos - se mês a mês os valores da pCO₂ de cada estação amostral ao longo dos nove anos. Para a variação interlagunar, foi calculada

a média anual de cada estação a fim de utilizá-las como réplicas dos valores de pCO₂ para cada lagoa e então estes valores foram testados ao longo dos nove anos.

RESULTADOS

As análises estatísticas demonstraram que: (1) os pontos amostrais da Lagoa Imboassica são diferentes quanto aos valores de pCO₂ (p = 0,0433) e que esta diferença ocorre ao longo dos anos (p = 0,0076). Além disso, a interação destes fatores foi bastante significativa (p < 0,0001); (2) a Lagoa Cabiúnas apresentou diferenças apenas ao longo dos anos (p < 0,0001), enquanto que a relação entre seus pontos amostrais (p = 0,6349) e a interação entre o tempo e o espaço não foi significativa (p = 0,1838); (3) a Lagoa Carapebus diferiu entre seus pontos amostrais (p = 0,0003) e ao longo dos anos (p = 0,0005), mas não apresentou diferença significativa na interação destes (p = 0,5054); (4) Houve variação espacial nos valores de pCO₂ entre as lagoas (p < 0,0001) e esta variação também existe ao longo dos anos (p < 0,0001), obtendo ainda uma diferença significativa na interação destes dois fatores (p < 0,0001). Assim, os resultados encontrados indicam que existem diferenças intralagunares e interlagunares na saturação de CO₂ e que houve grande variação temporal em todas as lagoas estudadas.

As diferenças espaciais intralagunares foram observadas nas lagoas Imboassica e Carapebus e parecem ser resultantes da heterogeneidade espacial gerada por eventos de abertura de barra onde a barra de areia que antes impedia o contato do mar com a lagoa é rompida e lançamento de efluentes, respectivamente. Na Lagoa Imboassica, apenas a estação 4 diferiu das demais, justamente em um ano em que houveram diversas aberturas de barra. Esta estação amostral é a mais distante da barra de areia e, quando esta é rompida este ponto seria o último a receber o aumento da salinidade proveniente da entrada da água do mar, apesar de possivelmente ser o primeiro ponto a secar. O efeito geral do aumento da salinidade em um ambiente aquático é reduzir a troca gasosa com a atmosfera (Hoover and Berkshire 1969; Wanninkhof and Knox 1996), uma vez que lagos salinos possuem valores de pH mais alto e, portanto a maior parte do carbono inorgânico dissolvido está na forma de HCO₃⁻ e CO₃²⁻, ocorre a diminuição da emissão de CO₂. Na Lagoa Carapebus, apenas a estação 3 diferiu das demais. Esta estação amostral se localiza em um ponto que recebe efluentes domésticos, com altas concentrações de fósforo total e nitrogênio total. O enriquecimento com nutrientes, em geral, estimula a produtividade primária no lago e favorece um estado menos heterotrófico seguido de menor emissão de CO₂.

Entre os sistemas analisados, a lagoa Comprida foi a única que diferiu significativamente das demais, provavelmente como resultado da magnitude da concentração de carbono orgânico dissolvido observado nesse ambiente com relação aos outros. A matéria orgânica húmica alóctone, característica desta lagoa consiste principalmente em uma mistura de moléculas orgânicas complexas produzidas a partir da decomposição de tecidos vegetais dos solos terrestres adjacentes. A substância húmica serve como um substrato para bactérias aquáticas, e impede a produção primária,

devido à sua efetiva absorção luminosa. Conseqüentemente, mesmo quando a entrada de substâncias húmicas ocorre de forma moderada, o lago se mantém em um estado heterotrófico com a respiração bacteriana superando a produção primária do ecossistema.

CONCLUSÃO

Nossos resultados demonstram que existem grandes variações pontuais no espaço e forte variação temporal da capacidade de emissão de CO₂ dos lagos ao longo dos anos estudados. Assim, podemos concluir que neste contexto estudos mais amplos, tanto espacialmente quanto temporalmente são de grande importância, já que estudos pontuais no tempo ou no espaço podem gerar estimativas equivocadas do estado de saturação de CO₂ de ecossistemas aquáticos.

Agradecemos à Petrobras e ao CENPES/Petrobras pelo financiamento deste trabalho através dos Projetos ECO-Lagoas, e Impacto das Mudanças Climáticas Globais em Ecossistemas Aquáticos Continentais.

REFERÊNCIAS

- Cole, J.J., Caraco, N.F., Kling, G.W., Kratz, T.K. Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes. *Science* 265: 1568 - 1570, 1994.
- Cole, J.J., Pace, M.L. Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations. *Limnol. Oceanogr.* 45(8): 1718 - 1730, 2000.
- Cole, J.J., Caraco, N.F. Carbon in catchments: connecting terrestrial carbon losses with aquatic metabolism. *Mar. Freshwater Res.* 52: 101 - 109, 2001.
- Duarte, C.M., Prairie, Y.T. Prevalence of heterotrophy and atmospheric CO₂ emissions from aquatic ecosystems. *Ecosystems* 8: 862 - 870, 2005.
- Hanson, P.C., Pollard, A.I., Bade, D.L., Predick, K., Carpenter, S.R., Foley, J.A. A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes. *Global Change Biology* 10: 1285 - 1298, 2004.
- Jonsson, A., Karlsson, J., Jansson, M. Sources of carbon dioxide supersaturation in clearwater and humic lakes in northern Sweden. *Ecosystems* 6: 224 - 235, 2003.
- Jonsson, A., Aberg, J., Jansson, M. Variations in pCO₂ during summer in the surface water of an unproductive lake in northern Sweden. *Tellus* 59B: 797 - 803, 2007.
- Kling, G. W., G. W. Kipphut, And M. C. Miller. Arctic lakes and streams as gas conduits to the atmosphere: Implications for tundra carbon budgets. *Science* 251: 298 - 301, 1991.
- Kortelainen, P., Rantakari, M., Huttunen, J.T., Mattsson, T., Alm, J., Juutinen, S., Larmola, T., Silvola, J., Martikainen, P.J. Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO₂ evasion from small boreal lakes. *Global Change Biology* 12: 1554 - 1567, 2006.
- Kuss, J., Schneider, B. Chemical enhancement of the CO₂ gas exchange at a smooth seawater surface. *Marine Chemistry* 91: 165 - 174, 2004.
- Lennon, J.T. Experimental evidence that terrestrial carbon subsidies increase CO₂ flux from lake ecosystems. *Oecologia* 138: 584 - 591, 2003.
- Nürnberg, G.K., Shaw, M. Productivity of clear and humic lakes: nutrients, phytoplankton, bacteria. *Hydrobiologia* 382: 97 - 112, 1999.
- Rantakari, M., Kortelainen, P. Interannual variation and climatic regulation of the CO₂ emission from large boreal lakes. *Global Change Biology* 11: 1368 - 1380, 2005.
- Richey, J.E., Melack, J.M., Aufdenkampe, A.K., Ballester, V.M., HESS, L.L. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. *Nature* 416: 617 - 620, 2002.
- Sobek, S., Algesten, G., Bergstrom, A., Jansson, M., Tranvik, L.J. The catchment and climate regulation of pCO₂ in boreal lakes. *Global Change Biology* 9: 630 - 641, 2003.
- Wanninkhof, R., Knox, M. Chemical enhancement of CO₂ exchange in natural waters. *Limnol. Oceanogr.* 41(4): 689 - 697, 1996.
- Wiedermann, M.M., Gunnarsson, U., Nilsson, M.B., Nordin, A., Ericson, L. Can small - scale experiments predict ecosystem responses? An example from peatlands. *Oikos* 118: 449 - 456, 2009.