

Artigo

O Paradoxo Ártico: Impacto das Mudanças Climáticas Sobre Rios Árticos e do Semiárido Aumentam a Exportação de Mercúrio para o Oceano

Lacerda, L. D.;* Marins, R. V.; Dias, F. J. S.; Soares, T. M.

Rev. Virtual Quim., 2012, 4 (XX), no prelo. Data de publicação na Web: 5 de julho de 2012

<http://www.uff.br/rvq>

The Arctic Paradox: Impacts of Climate Changes on Rivers from the Arctic and the Semiarid Increase Mercury Export to the Ocean

Abstract: The semi-arid coast of Brazil is being strongly affected by regional land use and global climate changes, resulting in decreasing continental runoff to the ocean, increasing the water residence time in estuaries and expanding mangrove areas; these in turn may induce an augment of particulate Hg accumulation within the estuaries and increase the export of dissolved Hg to the ocean. This is, paradoxically, what is presently happening in Arctic rivers due to increasing, not decreasing, continental runoff associated with global climate changes.

Keywords: Mercury; estuaries; bioavailability; regional and global changes.

Resumo

O litoral semiárido do nordeste brasileiro vem sendo afetado fortemente por alterações regionais nos usos do solo e pelas mudanças climáticas globais, resultando em diminuição do aporte continental ao mar, aumentando o tempo de residência da massa de água fluvial nas regiões estuarinas e provocando uma expansão nas áreas de manguezais. Isto por sua vez, vem aumentando a acumulação de Hg particulado nos estuários e a exportação de Hg dissolvido para o mar. Paradoxalmente, este processo é similar ao que atualmente ocorre nos rios que deságuam no Oceano Ártico, porém devido ao aumento e não à diminuição do aporte continental.

Palavras-chave: Mercúrio; estuários; biodisponibilidade; mudanças regionais e globais.

* Universidade Federal do Ceará, INCT de Transferência de Materiais Continente-Oceano (INCT_TMCOcean), Laboratório de Biogeoquímica Costeira, Instituto de Ciências do Mar, Av. Abolição 3207, CEP 61165-081, Fortaleza, CE, Brasil.

✉ ldrude@pq.cnpq.br

O Paradoxo Ártico: Impacto das Mudanças Climáticas Sobre Rios Árticos e do Semiárido Aumentam a Exportação de Mercúrio para o Oceano

Luiz D. Lacerda,^{a,*} Rozane V. Marins, Francisco J. S. Dias, Talita M. Soares

^aUniversidade Federal do Ceará, INCT de Transferência de Materiais Continente-Oceano (INCT_TMCOcean), Laboratório de Biogeoquímica Costeira, Instituto de Ciências do Mar, Av. Abolição 3207, CEP 61165-081, Fortaleza, CE, Brasil.

* ldrude@pq.cnpq.br

Recebido em 11 de junho de 2012. Aceito para publicação em 4 de julho de 2012

1. Introdução
2. Hidrodinâmica e aporte continental em rios árticos e do semiárido
3. Cenário das alterações regionais e das mudanças climáticas globais
4. Conclusões

1. Introdução

A região Ártica e o Semiárido do nordeste brasileiro estão entre as áreas mais afetadas pelas mudanças climáticas globais. Vários trabalhos recentes têm demonstrado um aumento generalizado da temperatura na região Ártica, alterando o padrão espaço-temporal do degelo de verão e, conseqüentemente, resultando em um aumento do aporte continental de materiais para o oceano, incluindo poluentes.¹ Aumentos na descarga continental de Hg para o Oceano Ártico, por exemplo, são diretamente proporcionais aos aumentos dos fluxos fluviais² resultando em aumento de sua mobilização e incorporação biológica,³⁻⁵ o que pode também ser facilitado pelo aumento do aporte de matéria orgânica pouco refratária.⁶ No litoral semiárido do nordeste brasileiro, modelos climáticos e dados históricos têm sugerido que as mudanças climáticas provocam aumentos de temperatura e decréscimo na pluviosidade, resultando na diminuição do aporte fluvial ao oceano.⁷ Além disto, a construção de barragens reduz ainda mais o aporte fluvial para o mar.⁸⁻¹⁰ Entretanto, de forma similar ao que ocorre no Ártico, concentrações elevadas de Hg, por exemplo, também vem sendo medidas na biota marinha

local,^{11,12} sugerindo aumentos da contribuição continental do metal apesar de ocorrer a diminuição progressiva do aporte fluvial total. Neste trabalho, este paradoxo é discutido com base em dados plurianuais dos fluxos de Hg e da hidrodinâmica do rio Jaguaribe (CE), o principal rio do semiárido do nordeste brasileiro.

2. Hidrodinâmica e aporte continental em rios árticos e do semiárido

A hidrodinâmica de rios árticos e do semiárido (Figura 1) apresenta um padrão sazonal similar, com período de elevado deflúvio restrito a poucos meses do ano, seja devido ao congelamento (Ártico) seja devido à escassez de chuva na estação seca (Semiárido).

Na região boreal, os rios que fluem para o norte em direção ao Oceano Ártico, são barrados por um longo período pelo congelamento das áreas estuarinas e costeiras. Durante a primavera, o degelo anual nas cabeceiras gera um grande fluxo fluvial que atinge as zonas ainda congeladas no delta e estuário. Ao encontrar as áreas ainda congeladas este fluxo é

parcialmente barrado resultando em um refluxo da água que aumenta o volume dos canais e inunda lagos e planícies marginais. No verão, após a ocorrência do pico de inundação e o degelo das águas da região costeira, o nível dos canais fluviais diminui e a água retida nos lagos e planícies inundadas nos deltas e nos estuários reflui para a calha do rio e é descarregada no Oceano Ártico. Dependendo da altitude dos lagos em relação ao rio e da magnitude dos fluxos em relação à dinâmica anual do congelamento, o tempo de residência da massa de

água (TR) na região dos deltas e dos estuários varia. Áreas afastadas do rio podem permanecer alagadas por períodos mais longos que aquelas próximas, que drenam mais rapidamente quando da liberação do fluxo fluvial para o mar.¹³ Um aumento no aporte continental, como por exemplo, devido à maior intensidade do degelo causado pelo aquecimento global, resulta em um menor tempo de residência da massa de água na interface continente-oceano e na transferência mais direta dos materiais continentais para o oceano.

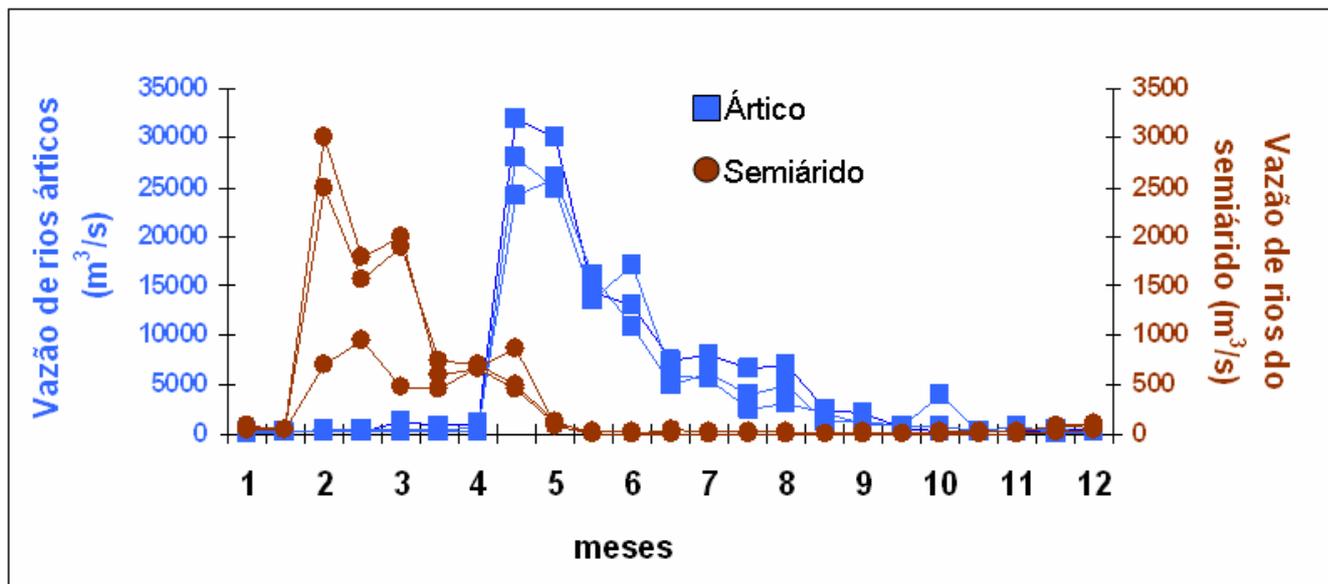


Figura 1. Variação sazonal da hidrodinâmica de rios árticos e do semiárido. Esquematizado a partir de Graydon *et al.* (Ártico)¹³ e do Semiárido¹⁴

Este padrão hidrodinâmico afeta o transporte e a reatividade do Hg na interface continente-oceano na região Ártica o que resulta em grandes variações sazonais. No início do período de inundação, as concentrações de Hg total e de metil-Hg (forma mais tóxica do metal) são semelhantes em áreas alagadas marginais e na calha principal dos rios.¹³ Ao longo do verão, as áreas alagadas que permaneceram conectadas ao rio não alteraram suas concentrações, porém aquelas mais isoladas ou com ligações mais restritas com a calha principal dos rios, mostram maiores concentrações de metil-Hg, sugerindo uma metilação mais intensa. A eficiência da metilação depende de diversos fatores ambientais, tais como temperatura, atividade bacteriana, disponibilidade de carbono orgânico dissolvido, entre outros fatores.¹⁵ Todos são afetados pelo tempo de residência das águas nas áreas inundadas. Quanto maior o tempo de residência maior a temperatura, a produção de carbono orgânico dissolvido e a produtividade e conseqüentemente maior será a intensidade de

metilação.¹⁶ Portanto, não é surpresa que esta espécie química apresente maiores concentrações em áreas com ligação mais restrita aos rios e que apresentam um maior tempo de residência das águas.

Estudos sobre a biogeoquímica do Hg no Oceano Ártico têm mostrado que as concentrações observadas em sedimentos e compartimentos biológicos não se correlacionam com as emissões antrópicas deste metal.⁵ Isto sugere que há um controle mais complexo das concentrações finais, provavelmente associado aos processos ocorrentes na interface continente-oceano. As emissões antrópicas de Hg para as bacias de drenagem e até mesmo a deposição atmosférica permaneceram estáveis ou mesmo diminuíram em toda a região do Oceano Ártico, entretanto, concentrações de Hg em sedimentos e na biota marinha têm aumentado, particularmente nos últimos 20 anos. Por exemplo, desde 1982 ocorreu um aumento de até 4 vezes na concentração de Hg em fígado de baleias beluga no Mar de Beaufort; concentrações de até 200 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

foram medidas em focas aneladas na mesma região. Concentrações desta magnitude põem também em risco as populações humanas que exploram estes recursos.² Assim, os impactos resultantes das alterações regionais dos usos dos solos e/ou por meio de mudanças climáticas globais, sobre a hidrodinâmica da interface continente-oceano na região ártica, são os principais vetores atuais que resultam no aumento da contaminação por Hg.

Nos rios do semiárido, o fluxo fluvial transportado ao mar depende sobremaneira da climatologia anual. Em anos normais, a pluviosidade na estação chuvosa sobre a bacia semiárida do rio Jaguaribe, CE, por exemplo, é baixa (c.a. 60-100 mm/mês) diminuindo para menos de 20 mm/mês na estação seca. Em anos com eventos ENSO (*El Niño*) extremos (frequência de 2-3 por década) a pluviosidade na estação chuvosa pode atingir até 200 mm/mês e zero mm/mês na estação seca. Balanços de água realizados no estuário do Rio Jaguaribe em dois anos climatológicos (extremo e normal) caracterizam estes dois momentos do ciclo hidrológico do semiárido. Durante o ano extremo, o Rio Jaguaribe se comporta como um rio de zona úmida com um fluxo líquido (fluxo de maré enchente menos fluxo de maré vazante) positivo do rio para o estuário de até $1.270 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, na estação chuvosa; e de $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, na estação seca. No estuário o aporte fluvial é acrescido pelo volume da maré, resultando em um fluxo líquido médio do estuário para o mar de até $2.030 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na estação

chuvosa. Entretanto, mesmo em um ano extremo, na estação seca o balanço é negativo, isto é do mar para o continente, de $-94 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ resultando em uma acumulação de água na região estuarina.^{9, 14} Nos anos normais, na interface do rio para o estuário, ocorre um fluxo positivo de até $220 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e de $66 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do estuário para o mar, na estação chuvosa. Do estuário para o mar, o fluxo é negativo ($-160 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, na estação chuvosa e $-70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, na estação seca). A intensidade dos eventos ENSO irá em princípio controlar a intensidade dos fluxos e estes por sua vez irão dimensionar o tempo de residência da massa de água nos estuários.

No Rio Jaguaribe, o tempo de residência (TR) da água na região estuarina varia de acordo com a intensidade do fluxo fluvial. Assim, no período seco, o TR é longo, atingindo em média 3,1 dias, enquanto que na estação chuvosa o TR médio é de 0,8 dias. Quanto mais seco o ano, maior o tempo de residência da água. Como resultado deste desequilíbrio hidrodinâmico, e análogo ao que acontece nas regiões marginais de rios que desembocam no Oceano Ártico, extensas áreas adjacentes ao estuário podem permanecer inundadas durante períodos variáveis de tempo. Esta situação favorece o desenvolvimento de condições biogeoquímicas particulares e, da mesma forma que na região Ártica, o Hg é largamente afetado por estas condições e sua especiação nas águas pode ser um excelente indicador da dinâmica destes processos.

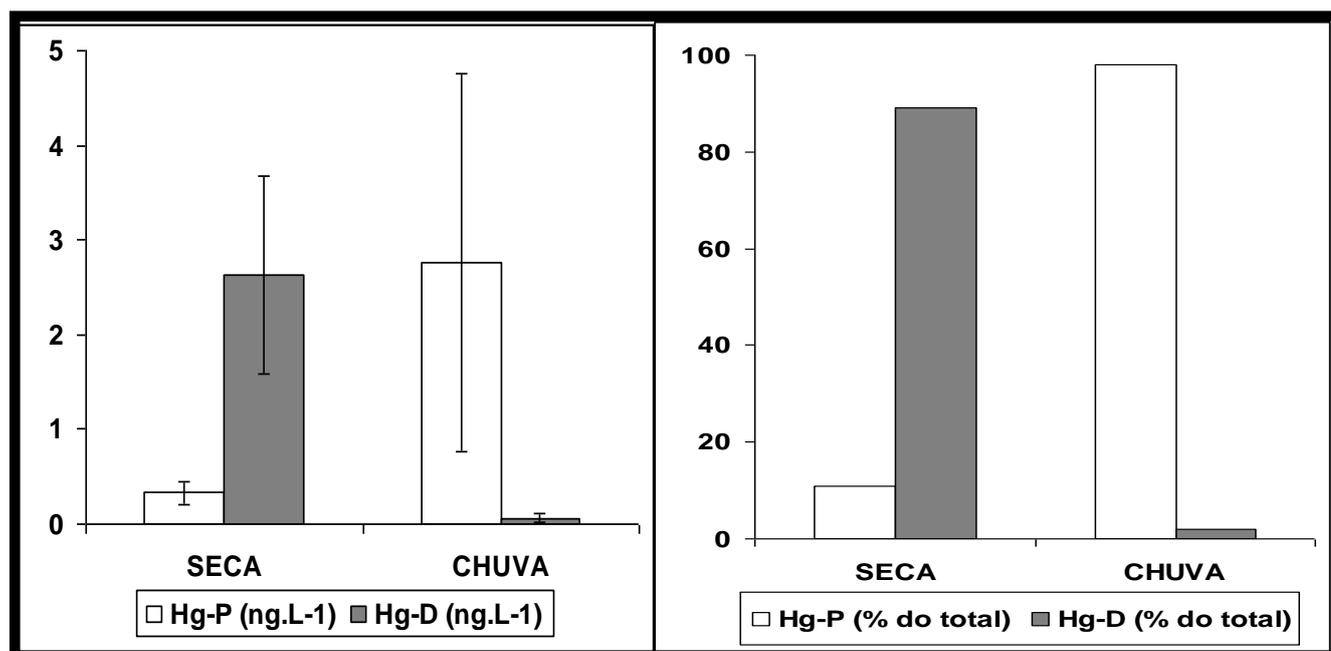


Figura 2. Partição de Hg (dissolvido e particulado) em águas do estuário do Rio Jaguaribe na estação seca (n = 18) e chuvosa (n= 30)

A figura 2 apresenta a partição do Hg no estuário do Rio Jaguaribe na estação seca e na estação chuvosa. A fração particulada é quantitativamente dominante (84%) na estação chuvosa, enquanto que a fração dissolvida é dominante (96%) na estação seca. Assim, na estação seca, o Hg transportado está bastante biodisponível; enquanto que na estação chuvosa a maior parte do Hg particulado é pouco reativa e possivelmente deverá ser sedimentada na área adjacente a foz do rio na plataforma continental. Este resultado é explicado pelas condições de inundação das áreas marginais durante o período seco, e TRs muito longos das águas em canais de maré de manguezais que drenam para o rio Jaguaribe (gamboas) e rios afluentes, sob condições de subanoxia e mesmo anoxia. Nestas condições domina a redução de sulfato como principal mecanismo de oxidação da matéria orgânica, e que libera carbono orgânico dissolvido (COD) previamente acumulado em

grande quantidade nesses ambientes.^{17, 18} Sob estas condições, Hg inorgânico (Hg^{2+} reativo) e Hg complexado ao COD são liberados dos sedimentos para águas intersticiais e se difundem para as águas de superfície,¹⁹ como pode ser claramente verificado na especiação do Hg em águas intersticiais destas áreas apresentada na figura 3. Nota-se um aumento significativo das espécies organomercuriais em profundidades logo abaixo da superfície dos sedimentos de onde são exportadas para águas superficiais pelo comportamento hidrodinâmico destas áreas alagadas.¹⁷ Além disso, a metilação do Hg^{2+} é facilitada pela elevada atividade de bactérias redutoras de sulfato presentes nos sedimentos e favorecida pelas condições do alagamento. Os complexos organomercuriais, incluindo o metil-Hg, formados podem ser rapidamente incorporados à cadeia biológica, o que tem sido verificado na região Ártica.²

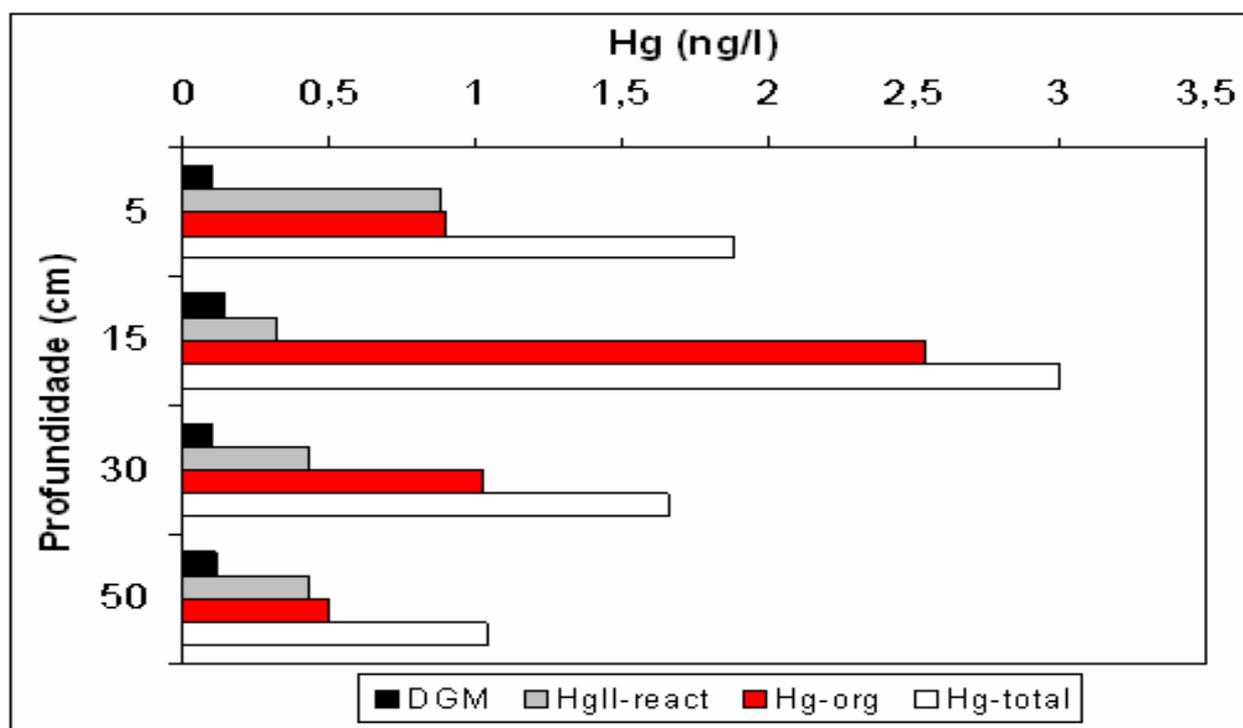


Figura 3. Especiação de Hg em águas intersticiais de sedimentos de planícies de maré em área de manguezal

A figura 4 apresenta a movimentação da massa de Hg transportada no gradiente continente-oceano calculada partir de medidas das concentrações dissolvida e particulada de Hg ao longo de 10 ciclos de maré completos obtidos ao longo de 4 anos (2005-2009) nas estações seca e chuvosa no estuário do rio Jaguaribe.^{7,14} A exportação de Hg particulado do rio ao estuário e do estuário ao mar ocorre apenas em altas vazões, embora pelo menos em um ciclo, ocorreu exportação de Hg particulado do rio para o estuário em um período de vazão média. As maiores

quantidades exportadas ocorreram no ano de chuvas mais intensas, quando a pluviosidade atingiu até 330 mm na estação chuvosa, resultou em vazões extremas da ordem de $1.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Nota-se, entretanto, que na maior parte do tempo, ocorre uma retenção do Hg particulado na região estuarina. A exportação líquida de Hg dissolvido, ao contrário, ocorre apenas em vazões próximas à zero, típicas da estação seca.

Estes resultados sugerem que, com deflúvios baixos, e consequente tempo de residência mais

longo da água na região estuarina, ocorre um aumento da reatividade e, portanto da

biodisponibilidade do Hg na região estuarina antes de sua exportação ao mar.

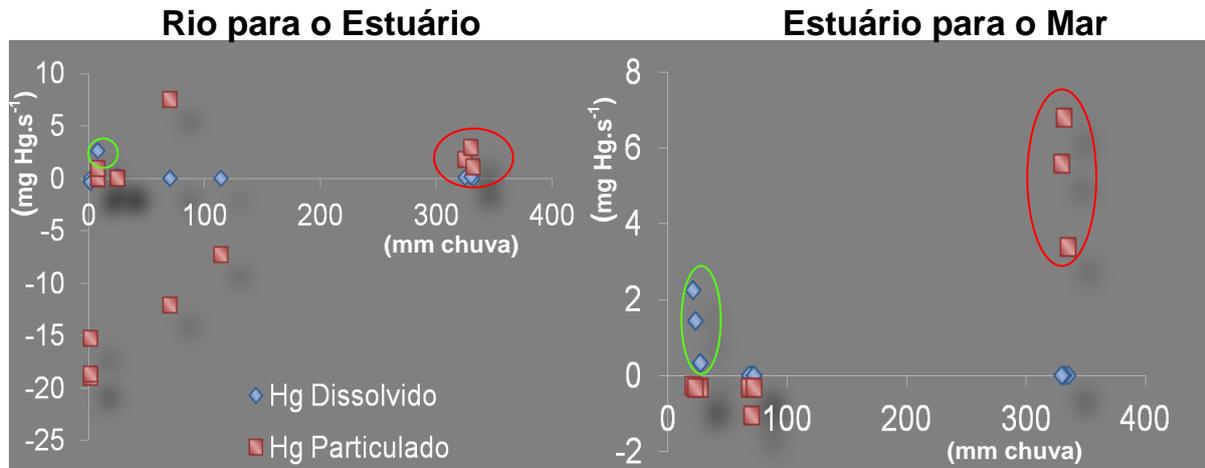


Figura 4. Transporte de Hg ao longo do continente-oceano no rio Jaguaribe, NE do Brasil. A exportação de Hg particulado (círculos vermelhos) do rio ao estuário e do estuário ao mar ocorre apenas em altas vazões. A exportação líquida de Hg dissolvido, ao contrário, ocorre apenas em vazões próximas a zero (círculo verde)

3. Cenário das alterações regionais e das mudanças climáticas globais

Como mostrado, nos rios do semiárido, a maior mobilização de formas biodisponíveis de Hg, e talvez de outros contaminantes, é diretamente relacionada ao aumento do tempo de residência da massa de água na região estuarina, permitindo a aceleração dos processos biogeoquímicos de transformação do Hg, particularmente a metilação e a complexação orgânica. A série histórica de vazões para as bacias localizadas na região semiárida, disponibilizada pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2008), mostra uma redução na contribuição fluvial para a plataforma continental adjacente. Esta diminuição foi inicialmente provocada pela intensa açudagem dos rios para aumentar a disponibilidade de água para a região. Na bacia do Rio Jaguaribe, por exemplo, as descargas fluviais médias nas décadas de 1960 a 1990 eram em torno de $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, podendo atingir máximas de até $3.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Após a construção e entrada em operação dos grandes reservatórios nesta bacia, as descargas foram regularizadas para cerca de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.²⁰

A diminuição do aporte continental na região do semiárido para o oceano também vem sendo intensificada pelas mudanças climáticas globais devido à redução das chuvas na região apontada nos modelos que simulam os efeitos das mudanças

climáticas globais sobre climas regionais em todos os relatórios do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Estes modelos sugerem redução de até 20% por década do volume anual de chuvas na região. Para o Ceará, por exemplo, foi calculada uma redução de 5,3% por década, com base na pluviosidade anual entre 1965 e 2003.⁷ Além da queda suave, mas consistente, do volume anual, os registros revelam ainda uma redução praticamente total das chuvas no auge da estação seca, e a eliminação dos grandes picos de vazão durante a estação chuvosa como resultado da regularização dos fluxos fluviais.

O aumento do nível do mar devido às mudanças globais do clima, associada à diminuição e regularização dos fluxos fluviais, torna mais extrema a forçante marinha sobre a água da plataforma continental e das regiões deltaica e estuarina. Por exemplo, Dias *et al.*,¹⁴ mostraram que na estação seca, a massa de água sobre a plataforma continental é "imprensada" pela água oceânica que se aproxima do litoral e, em face ao pequeno volume fluvial impede o livre transporte do continente para o mar. Isto resulta em um aumento do TR da massa de água nas regiões estuarinas. Esta forçante marinha parece estar ainda sendo mais intensificada devido aos impactos do aquecimento global sobre a intensidade de correntes no Oceano Atlântico Sul, particularmente da Corrente das Agulhas que traz volumes cada vez maiores de água do Oceano Índico

para o Oceano Atlântico e flui em direção ao continente Sul Americano.²¹⁻²³

A alteração na hidrodinâmica fluvial resulta em profunda modificação da biogeoquímica estuarina,⁹ particularmente na mobilização e aumento da biodisponibilidade de poluentes, como mostrado para o Hg. Em um cenário onde mudanças regionais e globais serão exacerbadas, as alterações biogeoquímicas discutidas acima deverão ser maximizadas podendo resultar em aumentos significativos da mobilização de formas reativas e biodisponíveis de Hg.

4. Conclusões

Apresentamos aqui a teoria que denominamos de “Paradoxo Ártico”. Esta sugere que mecanismos análogos aos ocorrentes na Região Polar Ártica atuam no litoral semiárido do nordeste brasileiro. A

hipótese, resumizada na Figura 5, sugere que o reduzido fluxo fluvial, atualmente em diminuição, alimentado por períodos de chuvas cada vez menos intensas e por secas mais prolongadas, resulta em bloqueio mais eficiente dos fluxos fluviais pela maré, aumenta o tempo de residência das águas na região estuarina e a mobilidade e reatividade de substâncias químicas. Os cenários futuros baseados na intensificação dos efeitos das mudanças climáticas globais e das alterações nos usos da terra sobre a região do litoral semiárido brasileiro sugerem fortemente um aumento da mobilização de contaminantes, como mostrado para o Hg, com impactos significativos sobre os recursos biológicos marinhos da região. Desta forma, esta teoria prevê um aumento das concentrações de Hg na biota local, um aumento da incorporação do Hg nas cadeias alimentares costeiras e consequente associação ao carbono orgânico, e um aumento na exportação de Hg dissolvido pelos rios, particularmente na forma de complexos orgânicos.

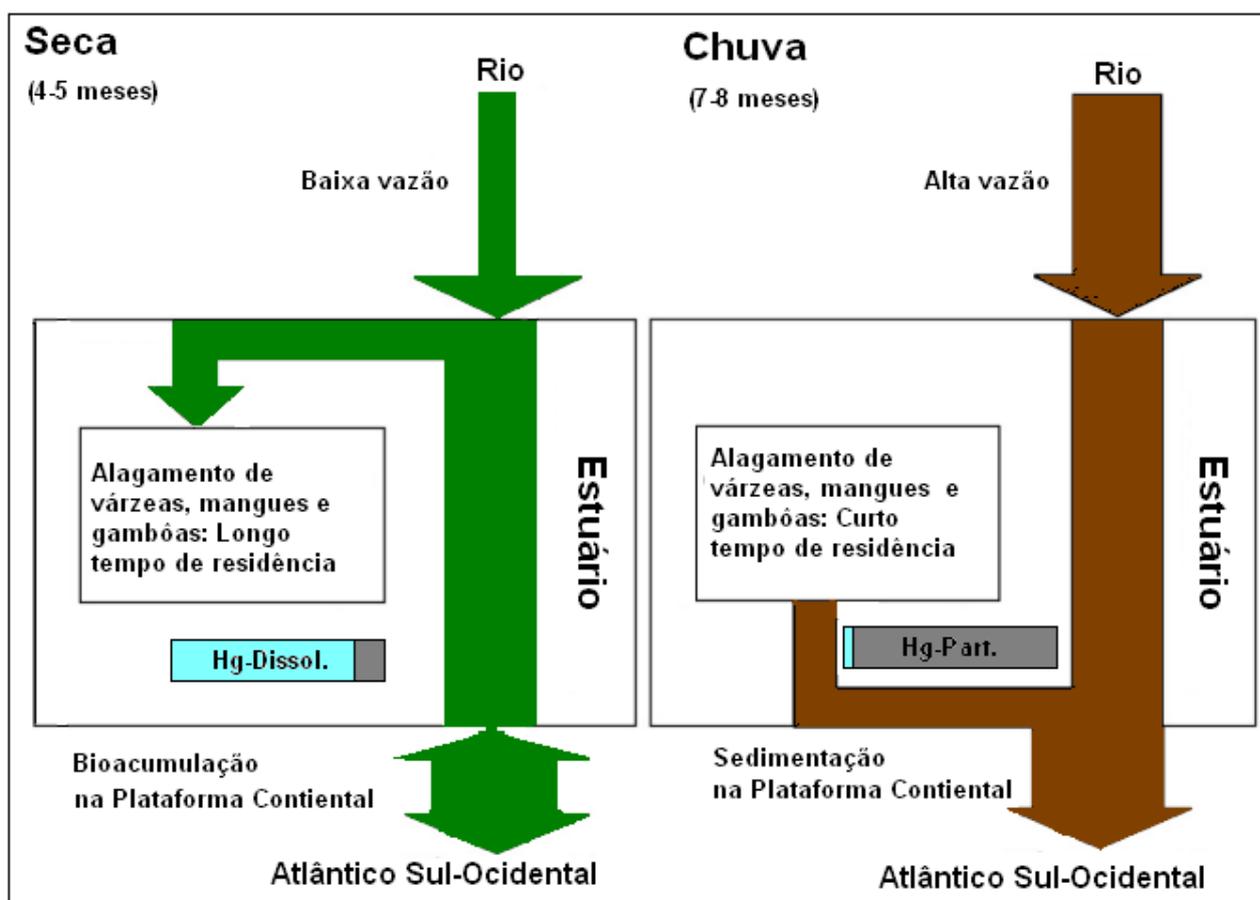


Figura 5. Representação esquemática da hidrodinâmica dos rios do semiárido em sua porção costeira. Na estação seca, ocorre um maior TR da água nas áreas estuarinas e consequente exportação de formas biodisponíveis de Hg. A intensificação das secas e a diminuição média da pluviosidade, associadas ao aumento da açudagem nas bacias do semiárido, deverá potencializar o processo

Agradecimentos

O “Paradoxo Ártico” não surgiu de estalo. Antes, resultou de discussões entre os autores e outros colegas envolvidos no estudo da transferência de materiais na interface continente-oceano no âmbito dos projetos CNPq - Instituto do Milênio (www.institutomilenioestuarios.com.br) e CNPq – INCT-TMCOcean (www.inct-tmcocean.com.br).

Referências Bibliográficas

- ¹ Macdonald, R. W.; Harnr, T. T.; Fyfe, J. *Sci. Total Environ.* **2005**, *342*, 5. [[CrossRef](#)]
- ² Leitch, D. R.; Carrie, J.; Lean, D.; Macdonald, R. W.; Stern, G. A.; Wang, F. *Sci. Total Environ.* **2007**, *373*, 178. [[CrossRef](#)]
- ³ Braune, B.M.; Outridge P. M.; Fisk, A. T.; Muir, D. C. G.; Helm, P. A.; Hobbs, K.; Hoekstra, P. F.; Kuzyk, Z. A.; Kwan, M.; Letcher, R. J.; Lockhart, W. L.; Norstrom, R. J.; Stern, G. A.; Stirling, I. *Sci. Total Environ.* **2005**, *351*, 4. [[CrossRef](#)]
- ⁴ Outridge P. M.; Macdonald, R. W.; Wang, F.; Stern, G. A.; Daastor, A. P. *Environ. Chem.* **2008**, *5*, 89. [[CrossRef](#)]
- ⁵ Carrie, J.; Wang, F.; Sanei, H.; Macdonald, R. W.; Outridge, P. M.; Stern, G. A. *Environ. Sci. Technol.* **2010**, *44*, 316. [[CrossRef](#)]
- ⁶ Carrie, J.; Stern, G. A.; Sanei, H.; Macdonald, R. W.; Wang, F. *Appl. Geochem.* **2012**, *27*, 815. [[CrossRef](#)]
- ⁷ Lacerda, L. D.; Godoy, M. D.; Maia, L. P. *Ciênc. Hoje* **2010**, *46*, 32. [[Link](#)]
- ⁸ Sabadini-Santos, E.; Knoppers, B. A.; Oliveira, E. P.; Leipe, T.; Santelli, R. E. *Mar. Pollut. Bull.* **2009**, *58*, 601. [[CrossRef](#)]
- ⁹ Dias, F. J. S.; Marins, R. V.; Maia, L. P. *Acta Limnol. Bras.* **2009**, *21*, 377. [[Link](#)]
- ¹⁰ Souza, W. F. L.; Medeiros, P. R. P.; Brandini, N.; Knoppers, B. A. *Rev. Virtual. Quim.* **2011**, *3*, 116. [[Link](#)]
- ¹¹ Lacerda, L. D.; Santos, J. A.; Campos, R. C.; Gonçalves, R. A.; Salles, R. *Braz. J. Biol.* **2007**, *67*, 493. [[CrossRef](#)]
- ¹² Vaisman, A. G.; Marins, R. V.; Lacerda, L. D. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **2005**, *74*, 582. [[CrossRef](#)]
- ¹³ Graydon, J. A., Emmerton, C. A., Lesack, L. F. W.; Kelly, E. N. *Sci. Total Environ.* **2009**, *407*, 2980. [[CrossRef](#)]
- ¹⁴ Dias, F. J. S.; Lacerda, L. D.; Marins, R. V.; de Paula, F. C. F. *Hydrol. Proc.* **2011**, *25*, 2188. [[CrossRef](#)]
- ¹⁵ Kainz, M., Lucotte, M., Parrish, C. C. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **2003**, *60*, 888. [[CrossRef](#)]
- ¹⁶ Kirk, J. I.; St. Louis, V. L. *Environ. Sci. Technol.* **2009**, *43*, 2254. [[CrossRef](#)]
- ¹⁷ Rezende, C. E.; Lacerda, L. D.; Ovalle, A. R. C.; Silva, L. F. F. *Braz. J. Biol.* **2007**, *67*, 673. [[CrossRef](#)]
- ¹⁸ Lacerda, L. D.; Silva, L. F. F.; Marins, R. V.; Mounier, S.; Paraquetti, H. H. M.; Benaim, J. *Wetlands Ecol. Manag.* **2001**, *9*, 323. [[CrossRef](#)]
- ¹⁹ Mounier, S.; Lacerda, L. D.; Marins, R. V.; Benaim, J. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **2001**, *67*, 519. [[CrossRef](#)]
- ²⁰ Marins, R. V.; Lacerda, L. D.; Abreu, I. M.; Dias, F. J. S. *Ciência Hoje* **2003**, *33*, 66. [[Link](#)]
- ²¹ Beal, L. M.; de Ruijter, W. P. M.; Biastoch, A.; Zahn, R. *Nature* **2011**, *472*, 429. [[CrossRef](#)]
- ²² Haarsma, R. J.; Campos, E. J. D.; Drijfhout, S.; Hazeleger, W.; Severijns, C. *Clim. Dyn.* **2011**, *36*, 989. [[CrossRef](#)]
- ²³ Lee, S. -K.; Park, W.; Seville, E.; Baringer, M. O.; Wang, C.; Enfield, D. B.; Yeager, S. G.; Kirtman, B. P. *Geophys. Res. Lett.* **2011**, *38*, L17607. [[CrossRef](#)]