



LACUNAS DA ACUMULAÇÃO SECULAR DE MATÉRIA ORGÂNICA NOS ECOSISTEMAS AQUÁTICOS: SUB-REPRESENTAÇÃO DAS ÁREAS MENOS ALTERADAS EM ESCALA GLOBAL

Leonardo Amora-Nogueira^{1,2}, Roberta Peixoto², Thairiny Fonseca², Allana Faustino², Anderson Castro¹, Felipe Gomes², Maria Eduarda Jacinto de Miranda², Luiza Pereira¹, Rodrigo Coutinho Abuchacra^{2,3} & Humberto Marotta^{1,2}*

¹ Universidade Federal Fluminense, Departamento de Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Laboratório de Geografia Física, Centro de Gerenciamento de Água e Biomassa, Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº, CEP: 24210-346, Niterói, RJ, Brasil

² Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-graduação em Geoquímica, Laboratório de Ecossistemas e Mudanças Globais, Laboratório Internacional de Mudanças Globais (LINCGlobal), Rede Brasileira de Pesquisa em Acidificação dos Oceanos Outeiro São João Baptista s/n - Centro - Niterói, RJ - Tel:(21) 2629-2218 - Fax:(21) 2629-2234

³ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Rua Francisco Portela, 1470, CEP: 24432-005, São Gonçalo, RJ, Brasil.

E-mails: leonardoamora@id.uff.br; bbpeixoto34@hotmail.com; thairiny_fonseca@hotmail.com; allanafaustino@id.uff.br; andersoncastro@id.uff.br; mfelipel Luiz@outlook.com; eduarda_miranda@id.uff.br; rodrigo.abuchacra@uerj.br; humbertomarotta@id.uff.br (*autor correspondente)

Resumo: Ecossistemas aquáticos como lagos, baías e lagoas costeiras são bem distribuídos entre as zonas climáticas do planeta, constituindo destinos preferenciais aos aportes de biomassa e nutrientes provenientes da bacia de drenagem. Grandes quantidades de matéria orgânica (MO) terrestre e aquática, as quais podem ser remineralizadas a gases de efeito estufa ou preservadas, lhe conferem um importante papel à ciclagem global de carbono (C) e subsequentemente ao clima da biosfera. Além disso, estes ambientes deposicionais têm sido considerados “*ecossistemas sentinelas*”, pois mudanças globais frequentes na rede de drenagem (*e.g.*, desmatamento, eutrofização e intervenções físicas) têm alterado substancialmente as taxas de acumulação de sedimentos e MO. No entanto, a distribuição latitudinal dos dados publicados das taxas de ciclagem de C nos ecossistemas aquáticos, considerando os diferentes usos e coberturas da terra, ainda carece de melhor entendimento. Nesse contexto, o objetivo do presente estudo é avaliar a distribuição global do esforço amostral sobre as taxas de acumulação de MO em lagos, lagoas costeiras e baías, relacionando-os com a distribuição entre as latitudes e ecorregiões com diferentes graus de uso e cobertura da terra. As ecorregiões tropicais e subtropicais, boreais, outras latitudes médias e polar/subpolar representaram 76% da área relativa global de lagos em regiões menos alteradas, e, no entanto, concebem apenas ~18% dos dados publicados. Por outro lado, a classe de florestas temperadas em áreas menos alteradas de latitudes médias foi a única a apresentar uma representação de dados adequada em relação à sua distribuição em escala global. Esses resultados indicam que ecossistemas aquáticos tanto tropicais ou subtropicais, os quais apresentam taxas de ciclagem de C mais intensas e com maior variabilidade devido às condições mais quentes, quanto os de altas latitudes frias (*i.e.*, boreais, subpolares e polares), ainda são altamente negligenciados nas compilações globais das taxas de acumulação de MO. Como conclusão, o presente estudo revelou a necessidade de maior esforço amostral para avaliar o papel

dos sedimentos de fundo dos ecossistemas aquáticos como sumidouros de C (sob a forma de biomassa) nas áreas menos alteradas pela ação humana, o qual subsidie a identificação de áreas prioritárias à conservação nas áreas mais florestadas de baixas e altas latitudes.

Palavras-Chave: ambientes deposicionais, carbono, matéria orgânica, taxas de acumulação, uso e cobertura da terra.

DESBALANCED CENTENARY ORGANIC MATTER BURIAL DATA DISTRIBUTION WORLDWIDE:

Aquatic ecosystems such as lakes, bays, and coastal lagoons are well distributed among global climate zones, constituting preferred destinations for biomass and nutrient inputs from the drainage basin. Large amounts of terrestrial and aquatic organic matter (OM), which could be remineralized to greenhouse gases or preserved, give them an important role in global carbon (C) cycling and subsequently in the climate-biosphere. Furthermore, these depositional environments have been considered “sentinel ecosystems” because frequent global changes in the drainage basin (*e.g.*, deforestation, eutrophication, and physical interventions) have substantially altered sediment, nutrient, and OM rates. However, the latitudinal distribution of published data on C cycling rates in aquatic ecosystems, which considers different land uses and land covers, still lacks a better understanding. In this regard, the present study aims to evaluate the global distribution of the sampling effort on OM accumulation rates in lakes, coastal lagoons, and bays across different latitudes and ecoregions with contrasting degrees of land use. Despite accounting for ~84 and 92% at low and high latitudes, ecosystems less impacted by humans showed only ~8 and 7% of the published OM burial rates, respectively. On the other hand, the temperate forest class in less altered mid-latitudes areas was the only one to show adequate data representation relative to its global distribution. These results indicate that both tropical or subtropical depositional aquatic ecosystems, which have more intense and variable C cycling rates due to year-round warmer conditions, and those at high cold latitudes (*i.e.*, boreal, subpolar, and polar), are still highly neglected in global compilations of OM burial rates. In conclusion, the present study revealed the need for an increased sampling effort to assess the role of depositional aquatic ecosystems as C sinks (in the form of biomass) in areas less impacted by anthropogenic activities, which could subsidize the identification of conservation priority areas in the most forested regions of low and high latitudes.

Keywords: depositional environments, carbon, organic matter, burial rates, land use and land cover.

INTRODUÇÃO

Os lagos, lagoas costeiras e baías são ecossistemas sensíveis às mudanças globais (Albuquerque de Assis Costa *et al.* 2018, Woolway *et al.* 2020, Heino *et al.* 2021), em especial aquelas causadas pelas transformações de uso e cobertura da terra que intensificam o assoreamento e a eutrofização (Sala 2000, Smith & Osterman 2014, DelSontro *et al.* 2018, Anderson *et al.* 2020). Neste sentido, os lagos são “*ecossistemas sentinelas*” para as mudanças climáticas porque são sensíveis ao clima, respondendo rapidamente à estas mudanças e integrando informações sobre as mudanças ocorridas na bacia de drenagem (Adrian *et al.* 2009). Na medida que são ambientes deposicionais preferenciais a aportes de sedimentos, matéria orgânica

(MO) e nutrientes desde vastas áreas da bacia de drenagem, são considerados “*ecossistemas sentinelas*” das alterações climáticas (Adrian *et al.* 2009, Hayes *et al.* 2017) e atividades antrópicas (Sharma *et al.* 2007, Zhang *et al.* 2017, Beaulieu *et al.* 2019). Estimativas indicam que existem mais de 100 milhões destes ecossistemas no planeta (Verpoorter *et al.* 2014), compondo 87% da superfície líquida continental (Gleick 1993). Estão distribuídos em todas as latitudes (Downing *et al.* 2006) e cobrem aproximadamente ~2.67 milhões de km² (Messenger *et al.* 2016). Apesar de representarem somente ~1.8% da superfície terrestre, apresentam intensas taxas de acumulação (Mendonça *et al.* 2017, Anderson *et al.* 2020) e degradação da MO (Raymond *et al.* 2013, Beaulieu *et al.* 2019), sendo amplamente estudados na literatura (Raymond *et al.* 2013, Hess

et al. 2015, Mendonça *et al.* 2017, Sanders *et al.* 2017, Feng *et al.* 2021). Estes estudos utilizam modelos globais de distribuição e área das águas interiores e costeiras para extrapolar medidas regionais (NASA/NGA 2003, Lehner & Döll 2004, Downing *et al.* 2006, Raymond *et al.* 2013, Verpoorter *et al.* 2014, Messenger *et al.* 2016, Mendonça *et al.* 2017, Anderson *et al.* 2020), mas apesar da informação de distribuição destes ecossistemas, ainda existe escassez de dados sobre a ciclagem de C nesses ambientes, principalmente nos localizados em áreas menos alteradas.

Frações significativas de toda a biomassa presente na bacia de drenagem é transportada pelo fluxo de água para os ecossistemas aquáticos (Mulholland & Elwood 1982, Dean & Gorham 1998, Stallard 1998, Mendonça *et al.* 2017, Tranvik *et al.* 2018, Anderson *et al.* 2020), que representam estoques de MO sensíveis à temperatura, vulneráveis à conversão em gases do efeito estufa (Cardoso *et al.* 2014, Marotta *et al.* 2014). No gradiente latitudinal, ecossistemas aquáticos naturais presentes em áreas menos alteradas, podem apresentar relações positivas entre temperatura e as taxas de acumulação de MO (Ferland *et al.* 2014, Clow *et al.* 2015, Heathcote *et al.* 2015, Lundin *et al.* 2015). Esta relação ocorre porque nas temperaturas mais baixas a produtividade primária na floresta da bacia de drenagem e no próprio ecossistema aquático são menores (Pan *et al.* 2011, Engel *et al.* 2020), mesmo apresentando favorecimento em função da preservação da matéria orgânica (Razum *et al.* 2021). Já nas regiões mais quentes, apesar das elevadas temperaturas favorecerem a degradação da matéria orgânica (Cardoso *et al.* 2014, Marotta *et al.* 2014), a produtividade da floresta (Pan *et al.* 2011) e dos ambientes aquáticos (Engel *et al.* 2020) são maiores, tornando as taxas nestes ambientes maiores neste balanço (Sanders *et al.* 2017). Em relação às mudanças de uso e cobertura da terra, estudos indicaram que nas regiões mais frias existe uma tendência de aumento da capacidade de armazenamento de MO no sedimento (Heathcote *et al.* 2015) devido a maior entrada de sedimento e eutrofização, além de sua maior capacidade de preservação da MO (Razum *et al.* 2021). Nas temperaturas mais quentes, evidências recentes indicam que estas alterações de uso e cobertura da terra podem apresentar um efeito

contrastante, onde picos iniciais de acúmulo de MO no sedimento após o desmatamento são seguidas por diminuições de longo prazo das taxas (Leithold *et al.* 2005, Ruiz-Fernández *et al.* 2006, Sanders *et al.* 2018). Esta dinâmica nas temperaturas mais elevadas é apoiada pela perda de matéria orgânica (Durigan *et al.* 2017) disponível para ser acumulada, principalmente em relação à remoção de vegetação e consequente aumento da exposição do solo à remineralização biológica (Kukla *et al.* 2019). Sendo assim, a sub-representação de extensos ecossistemas aquáticos, situados em contrastantes latitudes ou uso e coberturas da terra, podem aumentar substancialmente as incertezas das estimativas globais das taxas de acumulação de MO, além de reduzir a previsibilidade dos efeitos das mudanças globais sobre grandes estoques de C nos sedimentos de fundo.

Esta interação entre fatores naturais e antropogênicos evidenciam a importância das taxas globais de acumulação de MO no sedimento de fundo dos ecossistemas aquáticos (Palmer *et al.* 2015). Nesse contexto, o objetivo do presente estudo é avaliar a distribuição global do esforço amostral de estudos sobre as taxas de acumulação de MO em lagos, lagoas costeiras e baías, relacionando-os com a distribuição entre as latitudes e as mudanças antrópicas no uso e cobertura da terra. A representação amostral destes ecossistemas nas estimativas globais das taxas de acumulação de MO considerou a distribuição por área (Messenger *et al.* 2016) entre ecorregiões mais e menos alteradas e agrupadas por classes de latitude (Olson *et al.* 2001) e uso e cobertura da terra (Tateishi *et al.* 2014), as quais não foram analisadas em conjunto nos estudos prévios (Mendonça *et al.* 2017, Anderson *et al.* 2020).

MATERIAL E MÉTODOS

Delineamento

No sentido de identificar como estão distribuídos os estudos sobre as taxas de acumulação de MO nos ecossistemas aquáticos globais, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica de referências cruzadas nas bases de dados “*Web of Science*”, “*Science Direct*”, “*Google Scholar*” e em plataformas universitárias de teses nacionais até

dezembro de 2020. Foram utilizadas as palavras-chave em português e inglês: lagoas costeiras (“*coastal lagoons*”), baía (“*bay*”), lago (“*lake*”), ^{210}Pb , taxa de acreção sedimentar (“*sediment accretion rates*”) e acumulação (“*burial*”). A busca foi restrita à metodologia de datação de sedimentos por ^{210}Pb (~100 anos) em ecossistemas aquáticos, excluindo estudos em reservatórios e outros métodos tais como datação por ^{14}C e armadilhas de sedimento. O ^{210}Pb foi utilizado para a geocronologia uma vez que o estudo foca nas diferenças entre publicações em áreas mais e menos alteradas pela ação antrópica, e este indicador de ~100-150 anos apresenta a resolução mais utilizada no cálculo das taxas de acumulação sedimentar recente em ambientes lacustres. Na medida em que o conjunto de dados de área dos ecossistemas estudados (lagos, lagoas costeiras e baías) apresentou ampla distribuição latitudinal e de usos e coberturas da terra; foi subdividido em ecorregiões menos ou mais alteradas pela atividade antrópica e de distintas zonas climáticas (detalhes dos bancos de dados globais utilizados encontram-se na seção Conjunto de dados de Sistema de Informação Geográfica - SIG).

Conjunto de dados GIS

O banco de dados HydroLAKES foi utilizado para determinar as áreas globais dos ecossistemas aquáticos abordados no estudo (lagos, lagoas costeiras e baías). Este modelo possui uma área total de superfície de ecossistemas aquáticos de $2,67 \times 10^6 \text{ km}^2$, que foi criada compilando, corrigindo e unificando conjuntos de dados globais e regionais (Messenger *et al.* 2016). A escala do mapa resultante foi estimada entre 1:100.000 e 1:250.000 para a maioria dos lagos globalmente, com alguns chegando a 1:1 milhão.

Como a ciclagem e o estoque de C em ecossistemas aquáticos são altamente influenciados pelas características da paisagem no entorno, foram classificados segundo agrupamento de ecorregiões (informação detalhada sobre o agrupamento das ecoregiões no Apêndice 1) terrestres onde estão situados (Olson *et al.* 2001). Além disso, como a atividade antrópica também está altamente relacionada a mudanças na paisagem que determinam a ciclagem da MO nos ambientes aquáticos, foi realizada outra

classificação baseada na base de dados *Land Cover (GLCNMO) - Versão global* (Tateishi *et al.* 2014). A partir da base de dados *GLCNMO*, assumiu-se que a porção das ecorregiões que foram mais alteradas pelas atividades antrópicas foram “campos de arroz”, “terras de cultivo”, e “urbano”, enquanto as demais classes foram consideradas menos alteradas (Figura 1). Sendo assim, seis classes foram analisadas na presente abordagem: dentre as quais cinco menos alteradas pelas atividades antrópicas: 1. Latitudes Tropicais e Subtropicais; 2. Floresta temperada; 3. Floresta boreal; 4. Outras latitudes médias e 5. Latitudes subpolares e polares, bem como três mais alteradas: 6. Antrópico Tropical e Subtropical, 7. Antrópico Temperado e 8. Antrópico Boreal, Subpolar e Polar.

RESULTADOS

A presente compilação das taxas de acumulação secular de MO (a partir de datação por ^{210}Pb) abrangeu 499 ecossistemas aquáticos distribuídos entre as oito classes analisadas (Figura 1 e Tabela 1). Apesar da área desses ambientes em ecorregiões menos alteradas ter sido estimada ~7 vezes maior em comparação aqueles em áreas urbanas ou campos agrícolas, o número de ecossistemas com taxas de acumulação de MO descrita na literatura foi similar aos circundados pelos demais usos e coberturas da terra (Tabela 1). Nas áreas menos alteradas, enquanto a floresta temperada corresponde a 12% da área relativa global de lagos, ~35% dos dados compilados se encontram nessas regiões. Em relação as áreas mais alteradas, estas representam apenas 13% da área relativa global, enquanto são responsáveis por 47% dos dados publicados.

Na escala global, os ecossistemas aquáticos situados em ecorregiões mais alteradas em (1) latitudes tropicais e subtropicais, (2) temperadas, e (3) boreais, subpolares e polares representaram ~16, 14 e 8% da área de lagos, lagoas costeiras e baías, respectivamente (Tabela 2), enquanto a parcela dentre todos os dados compilados de taxas de acumulação secular de MO alcançou ~70, 18 e 74%, respectivamente.

Por sua vez, dentre as ecorregiões menos alteradas, os ecossistemas aquáticos circundados por florestas temperadas apresentam dados

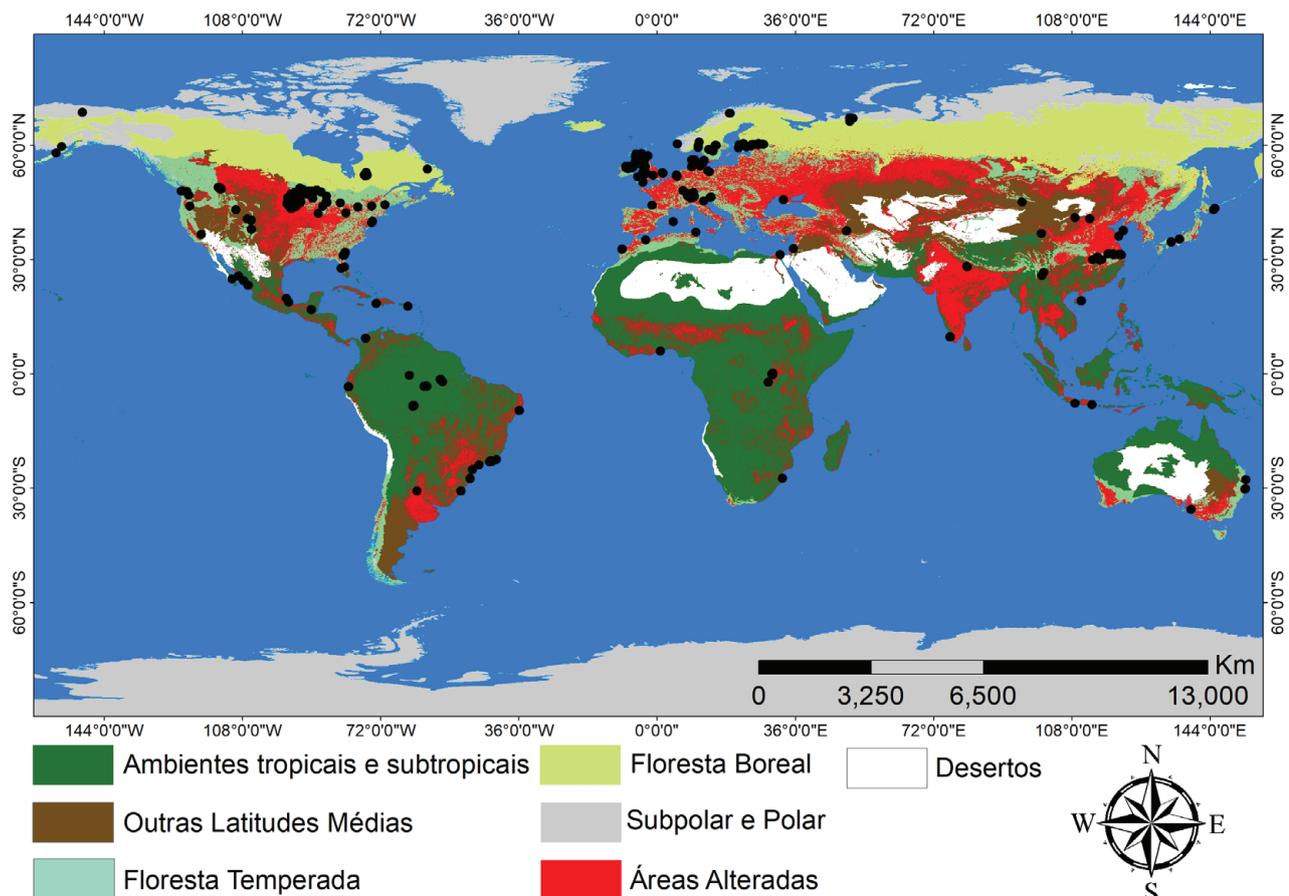


Figura 1. Figura de localização dos lagos compilados das publicações e ecorregiões do presente estudo. Os pontos pretos representam a distribuição de dados disponíveis na literatura para taxas de acumulação de MO em sedimento de lagos, lagoas costeiras e baías. A classificação das ecorregiões foi baseada em Olson *et al.* (2001), acrescentando as áreas modificadas pela ação humana a partir do banco de dados de uso e cobertura da terra (GLCNMO). Detalhes dos bancos de dados globais utilizados encontram-se na seção Conjunto de dados GIS.

Figure 1. Location of lakes compiled from the literature among the world ecoregions. Black dots represent the available data distribution for MO accumulation rates in lake, coastal lagoon, and bay sediments. The classification of ecoregions was based on Olson *et al.* (2001), adding human-altered areas from the land use and land cover database (GLCNMO). Details in the GIS Data Set section.

de taxas de acumulação secular de MO super-representados em relação a sua área (Figura 2).

DISCUSSÃO

Os esforços representados por revisões globais de acumulação secular de MO em lagos, lagoas costeiras e baías existem desde a década de 1980, indicando que a estimativa de contribuição desses ambientes deposicionais para o estoque global de C aumentou desde $0,06 \text{ Pg C yr}^{-1}$ (Mulholland & Elwood 1982), alcançando valores entre $0,12$ (Anderson *et al.* 2020) e $0,15 \text{ Pg C yr}^{-1}$ (Mendonça *et al.* 2017). Este aumento ~2 vezes pode ser atribuído ao incremento da amostragem

nos mais variados sítios com uso das técnicas de datação pelo radionuclídeo ^{210}Pb , que possibilita a determinação das taxas de sedimentação na escala de tempo secular (100-150 anos). Outro importante motivo para a maior detecção dos estoques de C bentônico ao redor do planeta é relacionado às estimativas mais acuradas da área dos ecossistemas aquáticos a partir de técnicas de sensoriamento remoto, apresentando nos últimos anos uma melhor resolução espacial para identificar sua extensão (Lehner & Döll 2004, Messenger *et al.* 2016).

A ampla compilação do presente estudo evidenciou que a maioria dos dados de taxas de acumulação secular de MO em lagos, lagoas

Tabela 1. Área absoluta e relativa de ecossistemas aquáticos (lagos, lagoas costeiras e baías) (extraída da base de dados de Messenger *et al.* 2016), número de ecossistemas e distribuição de dados publicados entre ecorregiões menos e mais alteradas pelas atividades antrópicas.

Table 1. Abundance and distribution of ecosystems published data in ecoregions less and more altered by anthropogenic activities. The areas of lakes, coastal lagoons, and bays were extracted from Messenger *et al.* (2016).

	Localização geográfica	Área absoluta global (km ² x 10 ⁴)	Área relativa global (%)	Nº de ecossistemas estudados (n)	Distribuição amostral dos dados publicados (%)
Ecorregiões Menos Alteradas	Latitudes Tropicais e Subtropicais	36,9	14	38	7,6
	Floresta Temperada	32	12	173	34,7
	Floresta Boreal	71,9	27	25	5
	Outras Latitudes Médias	57,3	21	19	3,8
	Subpolar e Polar	37,2	14	9	1,8
Ecorregiões Mais Alteradas (Antrópicas)	Tropical e Subtropical	9,7	4	100	20
	Temperado	14,8	6	43	8,6
	Boreal, Subpolar e Polar	7,2	3	92	18,4
Total		267	100	499	100

e baías concentram-se em ecorregiões menos alteradas de floresta temperada (~35% dos ecossistemas estudados), os quais abrangem somente ~12% da área global. Apesar da maior área relativa global totalizando ~88% de lagos, lagoas costeiras e baías, as ecorregiões menos alteradas representaram somente ~53% dos

dados disponíveis na literatura. Esse resultado aparentemente contraditório pode ser explicado pelo histórico científico mais longo em latitudes médias mais impactadas, permeado de mais investimentos por constituírem o berço da ciência limnológica e das instituições de pesquisa mais antigas ainda em atividade

Tabela 2. Área absoluta e participação relativa de ecossistemas aquáticos em ecorregiões mais alteradas (ambos extraídos de Messenger *et al.* 2016).

Table 2. Absolute area and relative participation of aquatic ecosystems in more altered ecoregions (Data extracted from Messenger *et al.* 2016 and GLCNMO).

	Localização geográfica	Área absoluta dos ecossistemas em ecorregiões mais alteradas (km ² x 10 ⁴)	Área absoluta total (km ² x 10 ⁴)	Participação global de ecossistemas em ecorregiões mais alteradas (%)
Ecoregiões Alteradas	Tropical e Subtropical	7,2	44,1	16
	Temperado	14,8	104,1	14
	Boreal, Polar e Subpolar	9,7	118,8	8

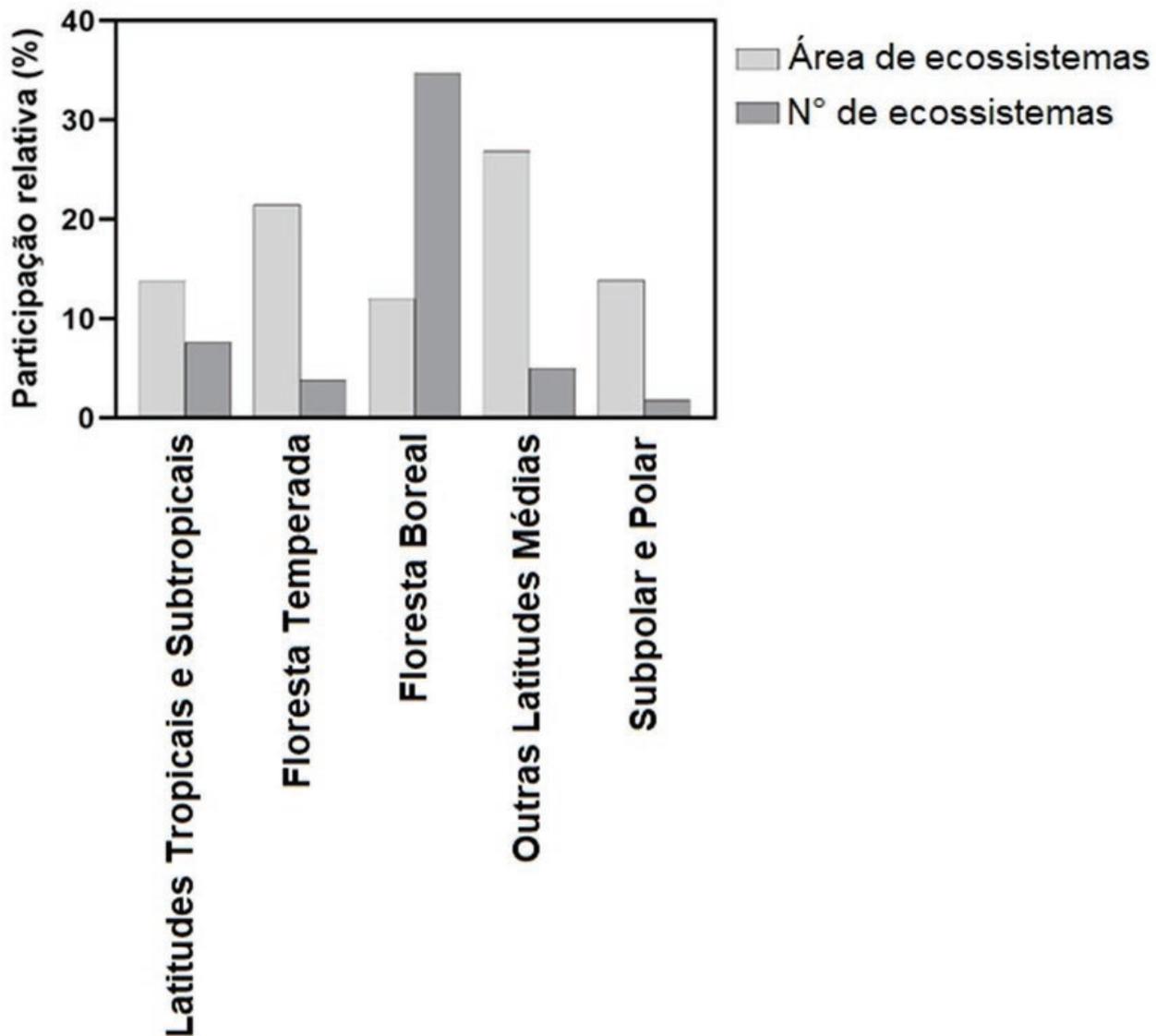


Figura 2. Participação relativa (%) em área absoluta e número de ecossistemas compilados em cada ecorregião. Os dados da figura são referentes às ecorregiões menos alteradas.

Figure 2. Relative area and number of ecosystems by each ecoregion. The dataset here refers to the less altered ecoregions.

(Forbes & SA 1887, Naumann & Lundqvist 1932). A sub-representação ora descrita dos ecossistemas menos alterados de altas e baixas latitudes pode ser considerada crítica para melhorar nossa previsibilidade sobre os efeitos na ciclagem e no estoque de C frente às mudanças globais. Por conseguinte, essa carência de representatividade amostral também evidencia a necessidade de ampliar a amostragem em ecossistemas menos alterados mais raros nas ecorregiões temperadas, visando diminuir incertezas das taxas médias de acumulação de MO global, bem como de suas reconhecidas implicações ao balanço de C que influencia o clima da biosfera.

As atividades antrópicas na bacia de drenagem ainda podem causar substanciais alterações contrastantes sobre as taxas de acumulação de MO nos sedimentos aquáticos, especialmente devido aos aportes aumentados pela eutrofização (Anderson *et al.* 2020) ou reduzidos pela perda de florestas (Leithold *et al.* 2005, Ruiz-Fernández *et al.* 2006). Os efluentes antropogênicos não tratados na bacia de drenagem são comumente enriquecidos de nutrientes, em especial provenientes das descargas urbano-industriais, fertilizantes agrícolas e resíduos da pecuária (Keatley *et al.* 2011), os quais sustentam elevadas taxas de produção de biomassa (Kakade *et al.*

2021). Embora a MO autóctone proveniente do enriquecimento antropogênico de nutrientes (*i.e.*, algas e plantas aquáticas) apresente qualidade mais lábil à remineralização biológica do que a de plantas terrestres (Guillemette *et al.* 2017, Beaulieu *et al.* 2019), seus aportes intensificados pela eutrofização tendem a subsidiar imensas taxas de acumulação nos ecossistemas aquáticos.

Nesse contexto, os efeitos das mudanças de uso e cobertura que ocorrem nas florestas em relação à sua condição natural de estocagem de C terrestre são frequentemente descritos na literatura (Pan *et al.* 2011, Tagesson *et al.* 2020). No entanto, ainda são escassos os estudos que avaliam os efeitos do declínio de longo prazo dos aportes da MO nos ecossistemas aquáticos continentais ou costeiros provenientes da redução de florestas, tais como em resposta à exploração madeireira (Leithold *et al.* 2005, Sanders *et al.* 2018) ou às restrições fisiológicas da produtividade (*e.g.*, “*savanização*”) associadas às mudanças climáticas (Nobre *et al.* 2016). A crescente possibilidade do uso de técnicas de geoprocessamento para entender como mudanças no uso e cobertura da terra alteram a capacidade de estocar C em sedimentos (Leithold *et al.* 2005, Anderson *et al.* 2013, 2014, Smith & Osterman 2014, Sanders *et al.* 2018) aumentam a capacidade de prever as consequências das intervenções antrópicas na paisagem.

Além do uso e cobertura da terra na bacia de drenagem (Kastowski *et al.* 2011, Ferland *et al.* 2014, Mendonça *et al.* 2017), diferenças de temperatura podem atuar como importantes controladores da ciclagem do C (Clow *et al.* 2015, Heathcote *et al.* 2015). Evidências prévias reforçam a importância das relações positivas entre as taxas de acumulação de MO e o aumento da temperatura nos ecossistemas aquáticos de latitudes de polares a boreais (Lundin *et al.* 2015), de boreais a temperadas (Heathcote *et al.* 2015) e de temperadas a subtropicais (Clow *et al.* 2015). As regiões tropicais ainda são uma lacuna científica, uma vez que as mais altas temperaturas podem favorecer o incremento das taxas de remineralização da MO (Marotta *et al.* 2014, Beaulieu *et al.* 2019), mas também estimulam a produção de biomassa de origem autóctone (Engel *et al.* 2020), como algas e plantas aquáticas, ou terrestres (Pan *et al.* 2011), como vegetação

lenhosa que é particularmente mais refratária (Guillemette *et al.* 2017, Beaulieu *et al.* 2019) e consequentemente suscetível à acumulação bentônica.

Na comparação entre ecorregiões globais, análises prévias indicam que a apreensão de biomassa nos lagos de planície de inundação da Floresta Amazônica pode alcançar, em média, $266 \pm 57 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, sendo entre 8 e 45 vezes maiores do que em latitudes árticas, boreais, temperadas ou mesmo de outras tropicais menos úmidas (Sanders *et al.* 2017). Por conseguinte, as taxas globais de acumulação da MO podem estar subestimadas a partir de base de dados com sub-representatividade de ecorregiões menos alteradas mais quentes (Mendonça *et al.* 2017, Anderson *et al.* 2020), uma vez que ecossistemas aquáticos tropicais podem apresentar respostas tanto da acumulação (Sanders *et al.* 2017) quanto da remineralização (Cardoso *et al.* 2014, Marotta *et al.* 2014) de MO potencialmente intensas frente às mudanças de temperatura. Além disso, uma lacuna científica adicional que emerge da presente abordagem é a escassez de dados de ecorregiões de altas latitudes mais conservadas, onde menores taxas de produtividade aquática podem ser compensadas por condições mais frias que favorecem a preservação de biomassa bentônica (Razum *et al.* 2021).

A sub-representação ora descrita de dados de ecorregiões menos alteradas tanto em baixas quanto altas latitudes, as quais apresentam maior distribuição em área, também se torna um relevante componente para reduzir a acurácia das estimativas globais da capacidade de apreensão de C nas águas continentais e costeiras. Uma causa potencial dessa discrepância entre maior número de amostras e menor extensão espacial pode ser a maior facilidade de acesso de ambientes mais impactados (Shaver 2018), uma vez que, apesar de representarem apenas ~13% em área, representam ~47% dos ecossistemas estudados. Estes estudos em áreas modificadas pela atividade humana também se tornam muito relevantes, indicando forte correlação entre as taxas de acumulação de C orgânico no sedimento de fundo e as alterações antrópicas na bacia de drenagem das ecorregiões mais frias (Anderson *et al.* 2013, 2020).

Como conclusão, o presente estudo desvela a necessidade de melhorar o esforço amostral sobre

a capacidade de apreensão de C nos ecossistemas aquáticos em ecorregiões menos alteradas pelo uso humano, tanto em baixas quanto em altas latitudes. A lacuna de dados ora observada acerca das taxas de acumulação de MO pode ser considerada essencial para subsidiar previsões mais acuradas do papel da conservação dos lagos, lagoas costeiras e baías para mitigação das mudanças climáticas. Aliando a premente identificação de áreas prioritárias à conservação desses ecossistemas na bacia de drenagem, tratamento de resíduos e proteção da segurança hídrica ou saúde pública, destaca-se a potencial construção de alternativas à tomada de decisão pública ou privada a partir da incorporação secular de C com implicações ao clima. Sendo assim, os resultados obtidos indicam a potencial relevância não somente da variação latitudinal ou de diferentes usos e coberturas da terra, mas também da heterogeneidade intra-ecossistêmica em vastos e ainda negligenciados estoques de C no sedimento de fundo de águas continentais e costeiras. No âmbito de aplicação ao planejamento e à gestão, a integração científica do papel de sentinela biogeoquímico dos ecossistemas aquáticos às ações de conservação e de mitigação das mudanças globais emerge como relevante fronteira do conhecimento ambiental.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado com auxílios financeiros da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ; E-26/210.441/2021 e E-26/211.329/2021), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - Código 001), do projeto Paleo-LINGLOBAL (INCGLO0029), além dos projetos de internacionalização PRINTCAPES/ Universidade Federal Fluminense (UFF) FEEDBACKS (99997.310301/2018-00) e CLIMATE (88887.310301/2018-00). Durante o período de realização do presente artigo, HM (Pesquisador Responsável) recebeu bolsas de Produtividade em Pesquisa do Conselho de Pesquisa e Desenvolvimento Científico do Brasil (CNPq, 31015220178), bem como Jovem Cientista do Estado do Rio de Janeiro (E-26/203.304/2017) e Cientista do Nosso Estado (E-26/201.118/2022), ambas da FAPERJ. LAN foi agraciado com as bolsas de

doutorado Nota 10 da FAPERJ e, posteriormente, de pós-doutorado PELD/CNPq (151237/2021-2). RBP recebeu bolsas de pós-doutorado PNPd/ CAPES (código 0001). Este estudo também foi apoiado pela Unidade Multiusuário de Gases de Efeito de Estufa e Combustíveis Voláteis da Universidade Federal Fluminense (GAS-UFF). HM e seu grupo de pesquisa agradecem ao professor Francisco de Assis Esteves (Chico) pelas valiosas lições na trajetória acadêmica, servindo de inspiração para aplicação social da ciência.

REFERÊNCIAS

- Adrian, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., Baines, S. B., Hessen, D. O., Keller, W., Livingstone, D. M., Sommaruga, R., Straile, D., Van Donk, E., Weyhenmeyer, G. A., & Winder, M. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6), 2283–2297. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283
- Albuquerque de Assis Costa, L., Mano Pessoa, D. M., & da Silva Carreira, R. 2018. Chemical and biological indicators of sewage river input to an urban tropical estuary (Guanabara Bay, Brazil). *Ecological Indicators*, 90, 513–518. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.03.046
- Anderson, N. J., Bennion, H., & Lotter, A. F. 2014. Lake eutrophication and its implications for organic carbon sequestration in Europe. *Global Change Biology*, 20(9), 2741–2751. DOI: 10.1111/gcb.12584
- Anderson, N. J., Dietz, R. D., & Engstrom, D. R. 2013. Land-use change, not climate, controls organic carbon burial in lakes. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society*, 280(1769), 20131278. DOI: 10.1098/rspb.2013.1278
- Anderson, N. J., Heathcote, A. J., & Engstrom, D. R. 2020. Anthropogenic alteration of nutrient supply increases the global freshwater carbon sink. *Science Advances*, 6(16), eaaw2145. DOI: 10.1126/sciadv.aaw2145
- Beaulieu, J. J., DelSontro, T., & Downing, J. A. 2019. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature Communications*, 10(1). DOI: 10.1038/s41467-019-09100-5
- Cardoso, S. J. B., Enrich-Prast, A. C., Pace, M. L., & Rol, F. B. 2014. Do models of organic carbon

- mineralization extrapolate to warmer tropical sediments? *Limnology and Oceanography*, 59(1), 48–54. DOI: 10.4319/lo.2014.59.1.0048
- Clow, D. W., Stackpoole, S. M., Verdin, K. L., Butman, D. E., Zhu, Z., Krabbenhoft, D. P., & Striegl, R. G. 2015. Organic Carbon Burial in Lakes and Reservoirs of the Conterminous United States. *Environmental Science & Technology*, 49(13), 7614–7622. DOI: 10.1021/acs.est.5b00373
- Dean, W. E., & Gorham, E. 1998. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. *Geology*, 26(6), 535–538. DOI: <https://doi.org/c2nxzs>
- DelSontro, T., Beaulieu, J. J., & Downing, J. A. 2018. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change. *Limnology and Oceanography Letters*, 3(3), 64–75. DOI: 10.1002/lo.2.10073
- Downing, J. a., Prairie, Y. T., Cole, J. J., Duarte, C. M., Tranvik, L. J., Striegl, R. G., McDowell, W. H., Kortelainen, P., Caraco, N. F., Melack, J. M., & Middelburg, J. J. 2006. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 51(5), 2388–2397. DOI: 10.4319/lo.2006.51.5.2388
- Durigan, M. R., Cherubin, M. R., de Camargo, P. B., Ferreira, J. N., Berenguer, E., Gardner, T. A., Barlow, J., Dias, C. T. dos S., Signor, D., de Oliveira, R. C., & Cerri, C. E. P. 2017. Soil organic matter responses to anthropogenic forest disturbance and land use change in the eastern Brazilian Amazon. *Sustainability (Switzerland)*, 9(3), 379. DOI: 10.3390/su9030379
- Engel, F., Attermeyer, K., & Weyhenmeyer, G. A. 2020. A simplified approach to detect a significant carbon dioxide reduction by phytoplankton in lakes and rivers on a regional and global scale. *Science of Nature*, 107(4), 29. DOI: 10.1007/s00114-020-01685-y
- Feng, L., Dai, Y., Hou, X., Xu, Y., Liu, J., & Zheng, C. 2021. Concerns about phytoplankton bloom trends in global lakes. *Nature*, 590(7846), E35–E47.
- Ferland, M. E., Prairie, Y. T., Teodoru, C., & Del Giorgio, P. A. 2014. Linking organic carbon sedimentation, burial efficiency, and long-term accumulation in boreal lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(5), 836–847. DOI: 10.1002/2013JG002345
- Forbes, & SA. 1887. The lake as a microcosm. *Illinois Natural History Survey Bulletin*, 1925, 15, 537–550(24).
- Gleick, P. H. 1993. Water and Conflict: Fresh Water Resources and International Security. *International Security*, 18(1), 79–112. DOI: 10.2307/2539033
- Guillemette, F., von Wachenfeldt, E., Kothawala, D. N., Bastviken, D., & Tranvik, L. J. 2017. Preferential sequestration of terrestrial organic matter in boreal lake sediments. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(4), 863–874.
- Hayes, N. M., Deemer, B. R., Corman, J. R., Razavi, N. R., & Strock, K. E. 2017. Key differences between lakes and reservoirs modify climate signals: A case for a new conceptual model. *Limnology and Oceanography Letters*, 2(2), 47–62. DOI: 10.1002/lo.2.10036
- Heathcote, A. J., Anderson, N. J., Prairie, Y. T., Engstrom, D. R., & del Giorgio, P. A. 2015. Large increases in carbon burial in northern lakes during the Anthropocene. *Nature Communications*, 6, 10016. DOI: 10.1038/ncomms10016
- Heino, J., Alahuhta, J., Bini, L. M., Cai, Y., Heiskanen, A. S., Hellsten, S., Kortelainen, P., Kotamäki, N., Tolonen, K. T., Vihervaara, P., Vilmi, A., & Angeler, D. G. 2021. Lakes in the era of global change: moving beyond single-lake thinking in maintaining biodiversity and ecosystem services. *Biological Reviews*, 96(1), brv.12647. DOI: 10.1111/brv.12647
- Hess, L. L., Melack, J. M., Affonso, A. G., Barbosa, C., Gastil-Buhl, M., & Novo, E. M. L. M. 2015. Wetlands of the Lowland Amazon Basin: Extent, Vegetative Cover, and Dual-season Inundated Area as Mapped with JERS-1 Synthetic Aperture Radar. *Wetlands*, 35(4), 745–756. DOI: 10.1007/s13157-015-0666-y
- Kakade, A., Salama, E. S., Han, H., Zheng, Y., Kulshrestha, S., Jalalah, M., Harrazeg, F., Alsareieih, S., & Li, X. 2021. World eutrophic pollution of lake and river: Biotreatment potential and future perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101604. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101604
- Kastowski, M., Hinderer, M., & Vecsei, A. 2011.

- Long-term carbon burial in European lakes: Analysis and estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 25(3). DOI: 10.1029/2010GB003874
- Keatley, B. E., Bennett, E. M., MacDonald, G. K., Taranu, Z. E., & Gregory-Eaves, I. (2011). Land-use legacies are important determinants of lake eutrophication in the anthropocene. *PloS one*, 6(1), e15913.
- Kukla, J., Whitfeld, T., Cajthaml, T., Baldrian, P., Veselá-Šimáčková, H., Novotný, V., & Frouz, J. 2019. The effect of traditional slash-and-burn agriculture on soil organic matter, nutrient content, and microbiota in tropical ecosystems of Papua New Guinea. *Land Degradation and Development*, 30(2), 166–177. DOI: 10.1002/ldr.3203
- Lehner, B., & Döll, P. 2004. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 296(1–4), 1–22. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.028
- Leithold, E. L., Perkey, D. W., Blair, N. E., & Creamer, T. N. 2005. Sedimentation and carbon burial on the northern California continental shelf: The signatures of land-use change. *Continental Shelf Research*, 25(3), 349–371. DOI: 10.1016/j.csr.2004.09.015
- Lundin, E. J., Klaminder, J., Bastviken, D., Olid, C., Hansson, S. V., & Karlsson, J. 2015. Large difference in carbon emission – burial balances between boreal and arctic lakes. *Scientific Reports*, 5, 14248. DOI: 10.1038/srep14248
- Marotta, H., Duarte, C. M., Sobek, S., & Enrich-Prast, A. 2009. Large CO₂ disequilibria in tropical lakes. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(4). DOI: 10.1029/2008GB003434
- Marotta, H., Pinho, L., & Gudasz, C. 2014. Greenhouse gas production in low-latitude lake sediments responds strongly to warming. *Nature Climate Change*, 4, 11–14. DOI: 10.1038/NCLIMATE2222
- Mendonça, R., Müller, R. A., Clow, D., Verpoorter, C., Raymond, P., Tranvik, L. J., & Sobek, S. 2017. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs. *Nature Communications*, 8(1), 1694. DOI: 10.1038/s41467-017-01789-6
- Messenger, M. L., Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I., & Schmitt, O. 2016. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*, 7, 13603. DOI: 10.1038/ncomms13603
- Mulholland, P. J., & Elwood, J. W. 1982. The role of lake and reservoir sediments as sinks in the perturbed global carbon cycle. *Tellus*, 34(5), 490–499. DOI: 10.3402/tellusa.v34i5.10834
- Naumann, E., & Lundqvist, G. 1932. *Limnologische Terminologie*. Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar, 54(2), 247–248. DOI: 10.1080/11035893209447117
- National Aeronautics and Space Administration/ National Geospatial-Intelligence Agency - NASA/NGA. 2003. SRTM Water Body Data Product Specific Guidance, version 2.0. 4p. Washington: NASA/NGA
- Nobre, C. A., Sampaio, G., Borma, L. S., Castilla-Rubio, J. C., Silva, J. S., & Cardoso, M. 2016. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(39), 10759–10768. DOI: 10.1073/pnas.1605516113
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., & Kassem, K. R. 2001. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *Bioscience*, 51(11), 933. DOI: <https://doi.org/c635xt>
- Palmer, S. C. J., Kutser, T., & Hunter, P. D. 2015. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 157, 1–8. DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.021
- Pan, Y., Birdsey, R. a, Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. a, Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, a D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. DOI: 10.1126/science.1201609
- Raymond, P., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C. P., Hoover, M., Butman, D., Striegl, R., Mayorga, E., Humborg, C., Kortelainen, P., Durr, H., Meybeck, M., Ciais, P.,

- & Guth, P. 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 503(7476), 355–359. DOI: 10.1038/nature12760
- Razum, I., Bajo, P., Brunović, D., Ilijanić, N., Hasan, O., Röhl, U., Miko, M. Š., & Miko, S. 2021. Past climate variations recorded in needle-like aragonites correlate with organic carbon burial efficiency as revealed by lake sediments in Croatia. *Scientific Reports*, 11(1), 7568. DOI: 10.1038/s41598-021-87166-2
- Ruiz-Fernández, A. C., Hillaire-Marcel, C., Páez-Osuna, F., Ghaleb, B., & Caballero-Miranda, M. 2006. 210Pb chronology and trace metal geochemistry at Los Tuxtlas, Mexico, as evidenced by a sedimentary record from the Lago Verde crater lake. *Quaternary Research*, 67, 181–192. DOI: 10.1016/j.yqres.2006.11.003
- Sala, O. E. 2000. Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science*, 287(5459), 1770–1774. DOI: 10.1126/science.287.5459.1770
- Sanders, L. M., Taffs, K. H., Stokes, D. J., Sanders, C. J., Smoak, J. M., Enrich-Prast, A., Macklin, P. A., Santos, I. R., & Marotta, H. 2017. Carbon accumulation in Amazonian floodplain lakes: A significant component of Amazon budgets? *Limnology and Oceanography Letters*, 2(1), 29–35. DOI: 10.1002/lol2.10034
- Sanders, L. M., Taffs, K., Stokes, D., Sanders, C. J., Enrich-Prast, A., Amora, L. N., & Marotta, H. 2018. Historic carbon burial spike in an Amazon floodplain lake linked to riparian deforestation near Santarém, Brazil. *Biogeosciences*, 15(2), 447–455. DOI: 10.5194/bg-15-447-2018
- Sharma, S., Jackson, D. A., Minns, C. K., & Shuter, B. J. 2007. Will northern fish populations be in hot water because of climate change? *Global Change Biology*, 13(10), 2052–2064. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01426.x
- Shaver, P. 2018. *The rise of science: from prehistory to the far future*. Berlin: Springer. p. 279.
- Smith, C. G., & Osterman, L. E. 2014. An Evaluation of Temporal Changes in Sediment Accumulation and Impacts on Carbon Burial in Mobile Bay, Alabama, USA. *Estuaries and Coasts*, 37(5), 1092–1106. DOI: 10.1007/s12237-013-9731-z
- Stallard, R. F. 1998. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(2), 231–257. DOI: 10.1029/98GB00741
- Tagesson, T., Schurgers, G., Horion, S., Ciais, P., Tian, F., Brandt, M., Ahlström, A., Wigneron, J. P., Ardö, J., Olin, S., Fan, L., Wu, Z., & Fensholt, R. 2020. Recent divergence in the contributions of tropical and boreal forests to the terrestrial carbon sink. *Nature Ecology and Evolution*, 4(2), 202–209. DOI: 10.1038/s41559-019-1090-0
- Tateishi, R., Hoan, N. T., Kobayashi, T., Alsaadeh, B., Tana, G., & Phong, D. X. 2014. Production of Global Land Cover Data – GLCNMO2008. *Journal of Geography and Geology*, 6(3). DOI: 10.5539/jgg.v6n3p99
- Tranvik, L. J., Cole, J. J., & Prairie, Y. T. 2018. The study of carbon in inland waters—from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle. *Limnology and Oceanography Letters*, 3(3), 41–48. DOI: 10.1002/lol2.10068
- Verpoorter, C., Kutser, T., Seekell, D. A., & Tranvik, L. J. 2014. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, 41(18), 6396–6402. DOI: 10.1002/2014GL060641
- Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Lenters, J. D., Merchant, C. J., O'Reilly, C. M., & Sharma, S. 2020. Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(8), 388–403. DOI: 10.1038/s43017-020-0067-5
- Zhang, Y., Jeppesen, E., Liu, X., Qin, B., Shi, K., Zhou, Y., Thomaz, S. M., & Deng, J. 2017. Global loss of aquatic vegetation in lakes. *Earth-Science Reviews*, 173, 259–265. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.08.013

Submitted: 18 May 2021

Accepted: 7 April 2022

*Invited Associate Editors: Rayanne Setubal,
Reinaldo Bozelli and Vinícius Farjalla*