



A Evolução do Ciclo do Fósforo

Palavras-Chave: Ciclo do Fósforo, Mudanças Climáticas, Neoproterozóico, Evolução Eucariótica.

Aluna: Julia Satelos de Godoy

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Tavares de Freitas

Instituição: Unicamp

INTRODUÇÃO:

O fósforo (P) é essencial aos seres vivos e seu ciclo envolve plantas, animais e microorganismos. Encontrado na forma de íon fosfato na natureza, este nutriente tem como principal reservatório as rochas e pode ser obtido pelos seres vivos a partir do solo e da água ou através da cadeia alimentar. O fósforo é essencial na composição dos ácidos nucleicos e em reações bioquímicas envolvendo material genético, na transferência de energia (na forma de ATP) e também na estrutura dos organismos, presente nos fosfolipídeos das membranas e na hidroxiapatita, principal constituinte mineral na composição dos ossos e dentes (RUTTENBERG, 2003).

Na agricultura também é possível destacar a importância do elemento, visto que é usado como fertilizante e 90% de todo o fósforo extraído é empregado em práticas agrícolas, ou seja, tem uma relação direta com a produção de alimentos. Assim, uma possível escassez do nutriente poderia levar à escassez de alimentos, dada a necessidade de se fertilizar o solo para que seja possível a produção agrícola (PANTANO *et al*, 2016).

Além disso, a disponibilidade natural do elemento é capaz de definir a quantidade de produção primária, realizada principalmente por organismos fotoautótrofos nos oceanos e continentes ao longo da história da Terra. Sendo assim, o fósforo também é um elemento crucial para o entendimento da dinâmica da biosfera e da evolução de ciclos biogeoquímicos ao longo da história terrestre (KIPP & STÜEKEN, 2017).

METODOLOGIA:

Essa pesquisa foi baseada na revisão da literatura sobre a evolução do ciclo do fósforo no planeta e sua relação com as mudanças climáticas e biosféricas que ocorreram na história da Terra, com ênfase nas mudanças ambientais extremas que ocorreram na Era Neoproterozóica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Reservatórios de Fósforo

Na natureza, o principal reservatório de fósforo são as rochas, mas este também pode ser encontrado no solo, nos oceanos, rios, lagos e nos organismos vivos. O ciclo terrestre do fósforo se inicia com o intemperismo das rochas. Para isso, é preciso que o mineral seja exposto a ácidos naturais, que são normalmente associados à água das chuvas e também produzidos por atividade microbiana (RUTTENBERG, 2003). O elemento é liberado das rochas pela dissolução de fosfatos, como a apatita. Após a dissolução das rochas durante o intemperismo, o íon fosfato pode ser levado aos solos e aos rios, onde então poderá ser absorvido pelos organismos vivos. O fósforo que é dissolvido das rochas durante o intemperismo e vai para o solo é essencial para a manutenção da vegetação continental, pois assim o nutriente fica disponível para ser absorvido por plantas terrestres.

Nos reservatórios oceânicos, o elemento chega principalmente através do fluxo dos rios. A quantidade de fósforo aproveitada por organismos vivos no oceano, advém principalmente do fluxo fluvial, atualmente pobre em fósforo. Dessa forma, a disponibilidade do elemento no oceano também é baixa, principalmente se comparado com outros elementos químicos que têm seus níveis equilibrados por fontes atmosféricas como ocorre com o nitrogênio, o oxigênio e o carbono (KIPP & STÜEKEN, 2017).

Os ciclos dos nutrientes no oceano sofrem alteração pela atividade biológica pois o transporte de material orgânico para o fundo dos oceanos acentuam as concentrações de nutrientes abaixo da superfície, onde há maior penetração da luz solar. Esse material orgânico também sofre remineralização feita por microrganismos autótrofos e responsáveis pela produção primária, como os fitoplânctons (MOORE *et al.* 2013).

No ciclo marinho, o fósforo em sua forma mais simples, de ortofosfato dissolvido, é absorvido por organismos fotossintéticos juntamente com carbono e hidrogênio. Além de ser aproveitado pelos organismos marinhos, o fósforo pode ser incorporado às rochas que estão se formando através da sedimentação e, quando estas sofrem intemperismo, o ciclo recomeça.

Fosforitos são rochas sedimentares, comumente de origem marinha, que possuem altos teores de fosfatos, em especial o pentóxido de fósforo (P_2O_5), presente em proporções de massa de 18% a 40%. Em comparação com outras rochas sedimentares e sedimentos oceânicos, que possuem menos de 0,3% de P_2O_5 , os fosforitos são considerados economicamente valiosos e são usados para extração do P utilizado em fertilizantes. Além disso, fosforitos também constituem o reservatório natural de P que possui o maior tempo de residência (DRUMMOND, 2015).

Principais mudanças no ciclo do fósforo ao longo da história da Terra

No Arqueano a baixa concentração de fosforitos era resultado de um intemperismo químico anóxico na crosta primitiva que também era escassa em P. Assim, quando ocorria o intemperismo, a quantidade de P dissolvido era mínima, resultando numa baixa biodisponibilidade de fósforo no oceano. Como um dos processos mais eficientes para a liberação do P acumulado em matéria orgânica é a redução do sulfato pelas bactérias, os processos fosfogênicos foram limitados pelas baixas concentrações de sulfato no Arqueano, dependente da disponibilidade de oxigênio na atmosfera (DRUMMOND, 2015).

Além disso, a remineralização de matéria orgânica no Arqueano era limitada pela quantidade disponível de moléculas receptoras de elétrons. Nesse caso, a oxidação atmosférica se destaca no controle de reciclagem do P, pois, conforme a atmosfera se torna rica em oxigênio, ocorre o aumento da capacidade de reciclagem do P. Essa dinâmica é observada nos oceanos modernos, onde a remineralização de matéria orgânica depende de diversos outros fatores - como a cinética da degradação orgânica, adsorção de matéria orgânica em minerais, processos de polimerização e taxas de sedimentação (KIPP & STÜEKEN, 2017).

Com a falta de oxigênio dissolvido nos oceanos durante o Arqueano, a reciclagem da biomassa dependia principalmente de ferro e sulfato em solução. Altas concentrações de Fe dissolvido no oceano seriam responsáveis por causar um feedback negativo na disponibilidade do P. A alta concentração de ferro no oceano tinha um importante papel sustentando a produção biológica ao ser responsável por realizar a maior parte da reciclagem de P através da respiração de Fe^{3+} . No entanto, a redução do elemento (resultando em altos níveis de Fe^{2+}) poderia causar a eliminação do P liberado na água (KIPP & STÜEKEN, 2017).

Durante o Paleoproterozóico ocorreu o primeiro grande Evento Fosfogênico e o surgimento de fosforitos, que resultaram de um intemperismo químico da crosta continental em uma atmosfera oxigenada. A partir do intemperismo químico, quando o P passou a ser levado aos oceanos após sua dissolução, a produção de oxigênio no oceano superficial aumentou, contribuindo para que houvesse o Grande Evento de Oxidação (DRUMMOND, 2015).

No Neoproterozóico, eucariotos marinhos foram parte importante do ecossistema e a sua evolução ao longo do intervalo 850-500 Ma tiveram impacto no ciclo do carbono, fósforo e do oxigênio. Durante o período, houve o surgimento dos animais móveis, que ocorreu aproximadamente em 565 Ma. Entre 555 e 542 Ma, surgiram os animais escavadores. Esses organismos foram importantes por conseguirem penetrar sedimentos e causar perturbações no ecossistema, permitindo que houvesse a oxigenação do substrato e trazendo alternativas para uma retenção de P mais eficiente nos oceanos (LENTON, 2018).

No Fanerozóico, houve a colonização dos continentes por plantas vasculares que afetaram a entrada de fósforo no oceano, devido a produção de matéria orgânica. A fosfogênese da fase inicial, que ocorreu durante o Pré Cambriano-Cambriano, corresponde ao aparecimento da primeira macrofauna, pelotas fecais e bioturbação do substrato e do solo por animais móveis. As pelotas fecais teriam ajudado a concentrar P no sedimento, mantendo o

fosfato em sedimentos profundos. Ou seja, houve a concentração de fósforo em sedimentos por meio do ciclo biológico (ROTHMAN, 2003).

Impacto das ações humanas no ciclo do fósforo

A mineração do fósforo, nos últimos cem anos, tem sido crescente devido a importância do nutriente para a agricultura, como fertilizante. Além disso, ações antrópicas como o desmatamento, cultivo excessivo e rejeitos urbanos e industriais, têm aumentado o transporte de fósforo de sistemas terrestres para o oceano. O acúmulo de fósforo em rios e áreas costeiras acaba resultando na eutrofização, que é o processo de poluição de águas, tornando-as turvas e com baixos níveis de oxigênio disponível, um processo que leva à morte de diversos animais e vegetais.

O aumento da erosão, resultante do desmatamento florestal e do cultivo excessivo, aumentaram a concentração de P nos rios. Em contrapartida, a criação de represas faz com que as cargas de sedimentos para os rios diminuam, fazendo com que o fluxo de P para os oceanos também seja reduzido. Estima-se que o aumento do fluxo de fósforo para os rios seja cerca do triplo em comparação com os níveis registrados antes do impacto de seu uso na agricultura (RUTTENBERG, 2003).

CONCLUSÃO:

O fósforo (P) é um elemento essencial à vida na Terra e está presente em diversos processos bioquímicos e estruturais dos seres vivos. Além disso, há uma íntima relação entre a evolução do ciclo do fósforo no planeta e as mudanças climáticas e biosféricas que ocorreram ao longo da história da Terra. Processos como a tectônica de placas, mudanças climáticas extremas - como as glaciações - e a evolução biológica tiveram um papel importante nas mudanças que ocorreram no ciclo do P. Além disso, na história recente datada dos últimos cem anos, o fluxo de fósforo nos rios também sofre mudanças causadas pelas ações humanas, o que tem impacto direto no ciclo do elemento.

BIBLIOGRAFIA

BERGMAN, Noam M.; LENTON, Timothy M.; WATSON, Andrew J. *COPSE: a new model of biogeochemical cycling over Phanerozoic time*. American Journal of Science, v. 304, n. 5, p. 397-437, 2004.

DRUMMOND, Justin BR et al. *Neoproterozoic peritidal phosphorite from the Sete Lagoas Formation (Brazil) and the Precambrian phosphorus cycle*. Sedimentology, v. 62, n. 7, p. 1978-2008, 2015.

FÖLLMI, K. B. *The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits*. **Earth-Science Reviews**, v. 40, n. 1-2, p. 55-124, 1996.

GLENN, C.; ROBERT, E. *Phosphorites*. Encyclopedia of Sediments and Sedimentary rocks. 10.1007/3-540-31079-7156 p. 519-526, 1978.

JOHNSTON, David T. et al. *Uncovering the Neoproterozoic carbon cycle*. **Nature**, v. 483, n. 7389, p. 320-323, 2012.

KIPP, Michael A.; STÜEKEN, Eva E. *Biomass recycling and Earth's early phosphorus cycle*. Science advances, v. 3, n. 11, p. 4795, 2017.

LENTON, Timothy M. *Gaia and natural selection*. Nature, v. 394, n. 6692, p. 439-447, 1998.

LENTON, Timothy M. et al. *Tipping elements in the Earth's climate system*. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 105, n. 6, p. 1786-1793, 2008.

LENTON, Timothy M.; DAINES, Stuart J. *The effects of marine eukaryote evolution on phosphorus, carbon and oxygen cycling across the Proterozoic–Phanerozoic transition*. Emerging Topics in Life Sciences, v. 2, n. 2, p. 267-278, 2018.

MOORE, C. M. et al. *Processes and patterns of oceanic nutrient limitation*. Nature geoscience, v. 6, n. 9, p. 701-710, 2013.

PANTANO, Glaucia et al. *Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar*. Química Nova, v. 39, n. 6, p. 732-740, 2016.

ROTHMAN, Daniel H.; HAYES, John M.; SUMMONS, Roger E. *Dynamics of the Neoproterozoic carbon cycle*. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 100, n. 14, p. 8124-8129, 2003.

RUTTENBERG, K. C. *The global phosphorus cycle*. Treatise on geochemistry, v. 8, p. 682, 2003.

SCHEFFER, Marten et al. *Anticipating critical transitions*. science, v. 338, n. 6105, p. 344-348, 2012.

SHIELDS-ZHOU, Graham; OCH, Lawrence. *The case for a Neoproterozoic oxygenation event: geochemical evidence and biological consequences*. **GSA Today**, v. 21, n. 3, p. 4-11, 2011.