



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

TESE DE DOUTORADO Nº 179

**A CAPA CARBONÁTICA MARINOANA DO SUL DO
CRÁTON AMAZÔNICO: *MULTIPROXY* APLICADOS NA
RECONSTITUIÇÃO PALEOCEONOGRÁFRICA E
GEOBIOLOGICA DO INÍCIO DO EDIACARANO**

Tese apresentada por:

RENAN FERNANDES DOS SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira (UFPA)

Coorientador: Prof. Dr. Pierre Sansjofre (*Muséum National d'Histoire Naturelle*)

**BELÉM-PA
2024**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- S237c Santos, Renan Fernandes dos.
A capa carbonática marinoana do Sul do Cráton Amazônico:
multiproxies aplicados na reconstituição paleoceanográfica e
geobiológica do início do Ediacarano / Renan Fernandes dos Santos.
— 2024.
xli, 412 f.: il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira
Coorientador(a): Prof. Dr. Pierre Sansjofre
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica,
Belém, 2024.
1. Ediacarano. 2. Estratificação oceânica. 3. Paleoredox. 4.
Produtividade primária. 5. Capa dolomítica. I. Título.

CDD 558.1



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**A CAPA CARBONÁTICA MARINOANA DO SUL DO CRÁTON
AMAZÔNICO: *MULTIPROXY* APLICADOS NA
RECONSTITUIÇÃO PALEOCEONOGRÁFICA E
GEOBIOLOGICA DO INÍCIO DO EDIACARANO**


TESE APRESENTADA POR:


RENAN FERNANDES DOS SANTOS

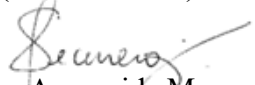
**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área GEOLOGIA,
linha de pesquisa ANÁLISE DE BACIAS SEDIMENTARES**


Data de Aprovação: 30 / 08 / 2024

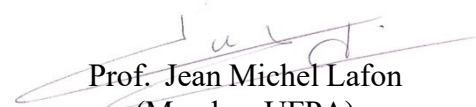
Banca Examinadora:


Prof. Afonso Cesar Rodrigues Nogueira
(Orientador-UFPA)


Prof.^a Dr.^a Marly Babinski
(Membro-USP)


Prof.^a Dr.^a Evelyn Aparecida Mecenero Sanchez
(Membro-UFVJM)


Prof. Ricardo Trindade
(Membro-USP)


Prof. Jean Michel Lafon
(Membro-UFPA)

Dedico esta tese de doutorado a todos os meus ancestrais que pavimentaram o caminho até aqui, especialmente aos meus pais, Arlindo Fernandes e Renata Nunes, cujo apoio incondicional e amor foram fundamentais para minha jornada. Dedico também esta obra a minha querida sobrinha Clarissa Fernandes, desejando-lhe um futuro promissor, onde o conhecimento seja uma ponte para novas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas e entidades que tornaram este trabalho possível.

A Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG), do Instituto de Geociências pela infraestrutura e apoio financeiro.

A coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de doutorado (CAPES, código de financiamento 001, Processo 88887.496658/2020-00).

A Mina Calcário Tangará, na pessoa do Sávio Cardoso, por todo o apoio logístico, fundamentais para a campanha de campo e por ceder os testemunhos de sondagens JOR e JBN.

Ao meu querido orientador, Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira, pela confiança, paciência e por todo incentivo, discussões e questionamentos que foram fundamentais para a elaboração desta pesquisa. Agradeço por todas as oportunidades, sem dúvida cresci e amadureci cientificamente sob sua orientação. Todas as discussões foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e para a minha formação como pesquisador. Obrigado pela sua amizade, por me receber tão bem em Belém-PA. Muito obrigado por tudo.

Ao meu querido coorientador, Prof. Dr. Pierre Sansjofre, pela paciência, confiança e todo o incentivo, agradeço pelas análises, discussões e questionamento que foram fundamentais para elaboração dessa tese, sem dúvidas ela não seria a mesma sem seu apoio, gratidão.

Ao laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, nas pessoas do Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão, Msc. Gisele Tavares Marques, e a Ana Paula Corrêa pela disposição, gentileza e auxílio na obtenção das imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Ao Laboratório de caracterização Mineral (LCM), nas pessoas do Prof. Dr. Romulo Angelica e ao Técnico Aldemir Sotero, pela disposição, gentileza e auxílio na obtenção das análises de difração de raios-X.

Ao laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da Universidade do estado de São Paulo (Unesp) nas pessoas do Prof. Dr. George L. Luvizotto e a Dra. Juliana Okubo pela disposição, gentileza e auxílio na obtenção dos mapas composicionais de microsonda.

Ao laboratório de Astrobiologia do Instituto de Química da Universidade de São Paulo (USP) nas pessoas do Prof. Dr. Fabio Rodrigues e ao técnico Evandro Silva pela disposição, gentileza e auxílio na obtenção das medidas de Microscopia Raman.

Aos Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e no Laboratório

de Geocronologia do Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UNB), nas pessoas das professoras Dra. Juliana C. Marques e Dra. Lucieth C. Viera, respectivamente, pela disposição, gentileza e auxílio na obtenção das análises de isótopos de rocha total.

Ao laboratório Nacional de Luz Sincrotron, Sirius, na pessoa da Dra. Flávia Callefo, pela disposição, gentileza e auxílio na obtenção das análises de nano-XRF. Agradeço a toda a equipe, Mirian Pacheco, Juliana Okubo, Fellipe Muniz, Gabriel Silva, Afonso Nogueira, Leandro Sepeda, Marlene Bom, gratidão pela disposição e todo auxílio durante as análises, não conseguiria sem vocês.

Ao Instituto *Universitaire Européen de la Mer, Université de Bretagne Occidentale*, Brest- França, na pessoa do professor Dr. Stefan V. Lalonde, pela disposição, gentileza e auxílio na obtenção das análises geoquímicas de elementos maiores e menores.

Ao *Muséum National d'Histoire Naturelle*-França, na pessoa do professor Dr. Pierre e da doutoranda Laurane Fogret, pela disposição, gentileza e auxílio na obtenção das análises isotópicas de Carbono e Oxigênio, muito obrigado!

Ao laboratório de catodoluminescência do PPGG-UFPA, na pessoa do Dr. Hudson Santos e do Dr. Pedro Silva pela disponibilidade e auxílio na interpretação das imagens de catodoluminescência.

Agradeço muito a Joelma Lobato e Bruno Veras, do laboratório de laminação do Instituto de Geociências, pela confecção das lâminas delgadas e polidas e por serem sempre tão maravilhosos.

Ao professor Dr. Fábio Pereira, agradeço o auxílio no tratamento de dados e por toda amizade nesses últimos anos. Sua ajuda foi indispensável para o sucesso deste trabalho.

Aos pesquisadores que pacientemente me ouviram e tanto me ensinaram durante o processo de elaboração desta tese, Marlene Bom, Mirian L. Pacheco, Flávia Callefo, Guilherme Romero, Gabriel Uhlein, Juliana Okubo, Romulo Angelica, Peter Crockford, Simon Hohl, Davi Carvalho, Ailton Brito, Isabele Barros, Thomas Fairchild, meus sinceros agradecimentos. Muito obrigado pelas discussões científicas, pelas revisões minuciosas, pelos questionamentos e pelos apontamentos valiosos que foram essenciais para o desenvolvimento desta tese. Agradeço imensamente por todo o apoio e colaboração ao longo deste percurso.

A todos os colegas do Grupo de Análise de Bacias Sedimentares da Amazônia, principalmente aos: Dr. Luiz Andrade, Dr. Hudson Santos, Dr. Pedro Augusto, Dr. Alexandre Ribeiro, Dr. Ailton Brito, aos doutorandos Argel Sodré, Leandro Sepeda, Pedro Guilherme, Laura Garzon, Meireanny de Albuquerque, Taynara Martins, Ivan Barrera, Bruno Scudeiro, pela amizade, sugestões e troca de conhecimentos durante esse doutorado, por todos os excelentes

momentos na querida sala 8.

A querida Cleida Freitas, pela gentileza, atenção e todo o auxílio durante o mestrado e doutorado, meu sincero agradecimento. Obrigado por tudo.

Aos meus queridos amigos que fizeram essa vivência em Belém do Pará mais leve e maravilhosa, Vanessa Lopes, Gleisson Rodrigues, Stephanie Vaz, Matheus Maciel, Edy Nando, Rafaela Garcia, Tatiana Viégas, Wilson Jr., Sandy Brasil, Dandarah, Luciana Cohen, meu profundo agradecimento. A amizade e o apoio de vocês foram inestimáveis durante esta jornada.

Aos queridos amigos que fiz no PPGG, Sergio Patrick, Claudia Arraes, Nayan César, João Paulo, Isabelle Barros, Luiz Felipe, Bettina Bozzi, Renata Veras, Amanda Suany, Bruna Nogueira, Vanisse Rodrigues, Fabio Pereira, Mozaniel Clementino, Sebastian Neita, David Porras, Allan Lima, Thiago Souza, Lohan Baia, Arthur Neri, Camila Vilar e Luiza Barros, agradeço por todos os bons momentos de descontração, conversas, cafés intermináveis e bons drinks. A convivência com vocês tornou essa experiência ainda mais especial e memorável.

Gratidão, queridos pais, avós e demais ancestrais, por terem tecido o meu caminho. Imensa gratidão pela grandeza dos seus sonhos que, de alguma forma, hoje são a minha realidade. Travamos diversas lutas, mas sonhamos muito mais, e por isso chegamos até aqui.

Aos meus pais, Renata Nunes e Arlindo Fernandes, por seus esforços na minha criação e educação, por todo apoio e amor em mim depositado. Muito obrigado por tudo.

Aos meus irmãos, Rafael, Ailton e Diego, gratidão pelo apoio e incentivo, amo vocês.

Agradeço ao governo Federal pelos programas sociais e ações afirmativas implementados durante os mandatos do Presidente Luiz Inácio Lula da Silva, que foram essenciais para permitir que o filho de um pintor analfabeto e de uma dona de casa se tornasse Doutor.

Enfim, a todos as pessoas que direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para a realização deste estudo.

Muito obrigado a todos!

*Eu sou o sonho dos meus pais
Que eram sonhos dos avós
Que eram sonhos dos meus ancestrais
Emicida*

RESUMO

A extensa deglaciação pós Marinoano (~650-635Ma), associada ao evento *Snowball Earth*, induziu alterações profundas na química dos oceanos, registradas em sucessões de capa carbonática distribuídas globalmente. Estes eventos desencadearam grandes alterações paleoceanográficas, principalmente pelos efeitos da eustasia glacial (nível do mar global), ajuste glacioisostático (GIA) e *ice gravity*, e expansão térmica dos oceanos em condições de efeito estufa, impactando o nível relativo do mar. A rápida deglaciação causou uma estratificação de densidade estável com condições geoquímicas complexas, composta por águas profundas hipersalinas e uma camada superficial de água de degelo. A escala de tempo para a desestratificação oceânica varia de dezenas de milhares a milhares de anos. A capa carbonática Puga (~635 Ma), relacionados ao contexto dos depósitos basais da bacia Araras-Alto Paraguai no sul do Cráton Amazônico, é revisitado nas seções clássicas de Tangará da Serra e Mirassol d'Oeste, no Estado de Mato Grosso. Esta sucessão exemplifica esse fenômeno paleoceanográficos pós-Marinoano, e é um dos melhores registros para avaliar os eventos de supersaturação sob condições de GIA e transgressão que controlaram o espaço de acomodação no sul do Cráton Amazônico. Dados sedimentológicos e estratigráficos foram integrados com novos dados paleoceanográficos e paleoredox, combinados com resultados diagenéticos, cristalográficos, geoquímicos (principalmente elementos terras raras e metais traços) e isotópicos ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\epsilon\text{Nd}(t)$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, Sm/Nd) em rocha total são fornecidos para a sequência de capa carbonática Puga. A sucessão de capa carbonática Puga ocorre com aproximadamente 90 metros, sendo os 10 primeiros metros composto por depósitos glaciomarinho, diamictitos e dropstones, da Formação Puga, a capa dolomítica, Formação Mirassol d'Oeste, aproximadamente 40 metros, está em contato direto e apresenta evidências de deformações sinsedimentar na base, é compostos principalmente por: 1) Ds - doloboundstones estratiforme com pseudomorfo de gipso; 2) Dd - doloboundstones dômicos com estruturas tubulares, essa associação de fácies é interpretadas como uma plataforma rasa com intensa atividade microbiana. A porção superior da capa dolomítica é composta por 1) Dp - dolomudstone/dolopackstone peloidal com laminações paralelas ao plano, 2) Dq - dolograinstones/dolomudstone peloidal com laminações quasi-planar e truncamento de baixo ângulo, essa associação é interpretada como plataforma rasa influenciada por onda. A capa calcária (50 m de espessura da Formação Guia) recobre de forma concordante os depósitos de capa dolomítica, o contato é uma camada com espessuras descontínua de marga dolomítica e calcário com leques de cristais de calcita (pseudomorfo de aragonita) intercalados com calcário com

megaripples. A associação de fácies da capa calcária indica um ambiente moderadamente profundo dominado por ação de ondas e tempestades que passam para uma plataforma profunda supersaturada com CaCO_3 . A mineralogia destes depósitos carbonáticos marinhos tem sido um fator crucial na restrição da composição dos oceanos durante a transgressão pós-Marinoana. Desta forma, as restrições diagenéticas, são uma etapa prévia crucial para demonstrar os impactos dos fluidos pós-deposicionais. Um estudo diagenético de alta resolução foi conduzido nestes depósitos, demonstrando maior influência dos processos sin/eodiagenéticos, indicados tanto nos padrões mineralógicos, quanto nos cristalográficos e texturais. O principal processo registrado é a dolomitização, que ocorre em pelo menos duas etapas principais, dolomitas si deposicionais e dolomitas de soterramento raso. Além disso, os testes geoquímicos e isotópicos aplicados neste estudo, corroboram a interpretação da preservação dos sinais sindeposicionais. Os padrões de elementos terras raras + ítrio no carbonato de capa de Puga oferecem *insights* sobre as condições marinhas pós-*Snowball Earth*. As baixas razões $\text{Y}/\text{Ho} > 36$ na capa dolomítica sugerem mistura de água de degelo com água do mar, no entanto a base registra altos valores da razão Y/Ho de até 70, e anomalias de Eu/Eu^* até 3, indicam ressurgência de água do mar hipersalina com interação de fluido hidrotermal (*vents*), corroborando com a interpretação de que a capa dolomítica precipitou durante o processo de desestratificação dos oceanos. As composições isotópicas de Nd radiogênico, combinadas com outros proxies como $\delta^{13}\text{C}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, indicou a influência de contribuições continentais e marinhas durante a precipitação do carbonato de capa de Puga. O sistema isotópico de Nd, menos suscetível a trocas diagenéticas, revelou assinaturas distintas de massas de água e intenso intemperismo do Cráton Amazônico durante a deglaciação, conforme indicado pelas tendências geoquímicas, ex. Y/Ho , e valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\epsilon\text{Nd}(t)$, $\delta^{13}\text{C}$. Os nossos dados de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na capa dolomítica variam de 0.7264 a 0.7084, e esses valores são mais altos do que os valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pré e pós-glaciais da água do mar. A associação de valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mais radiogênico com os valores de $\epsilon\text{Nd}(t)$ menos radiogênico, similares aos encontrados nos diamictitos, reforça a conexão com a contribuição do intemperismo continental na água de degelo. Esta abordagem *multiproxies* reconcilia-se com o modelo anterior de precipitação rápida de carbonato de capeamento, seguindo a escala de tempo de curto prazo para a desestratificação do oceano. Os dados de metais traços redox-sensíveis, U, Mo, V, Ni, Cu, P e isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ indicaram condições paleoredox e paleoprodutividade durante a transgressão pós-glacial. A capa dolomítica precipitou em condições oxigenadas com extensa contribuição das comunidades microbianas, passando para condições predominantemente disóxicas com ação de ondas na última fase de deposição na plataforma dolomítica. O aprofundamento das regiões costeiras relacionado ao aumento abrupto do nível do

mar, que levou à modificação do ciclo biogeoquímico. Nossos dados demonstram uma relação direta da produção de oxigênio e a rápida colonização das comunidades microbianas. A rápida elevação do nível do mar interrompeu a precipitação disseminada de dolomita, à medida que íons de Mg se dispersaram, levando à substituição de plataformas dolomíticas por mares supersaturados em CaCO_3 . Além disso, os dados geoquímicos demonstram um baixo conteúdo de siliciclástico na capa dolomítica, coerente com o modelo de fome de siliciclástico, e o aumento abrupto nestes depósitos, coincide com evolução das condições paleoceanográficas, declínio das comunidades microbianas, predomínio de condições disóxicas e mudança da fábrica carbonática. Durante a transição Criogeniano-Ediacarano processos sedimentares e geoquímicos anômalos geraram uma das mais complexas perturbações paleoambientais no ciclo biogeoquímico associadas a transição *Icehouse-Greenhouse*. A análise de cenários pré-cambrianos no Cráton Amazônico, desvendando os climas extremos, lança uma luz crítica sobre a proliferação de vida em condições extremas e tem fortes implicações para a compreensão de outras superfícies planetárias

Palavras-chaves: ediacarano; estratificação oceânica; produtividade primária; paleoredox; capa dolomítica

ABSTRACT

The post-Marinoan glaciation (~650-635 Ma) was the most severe event from the late Cryogenian period of the planet. The snowball Earth conditions induced a climate anomaly, triggering major changes in the paleoenvironmental and ocean chemistry recorded in the carbonate cap sequences. The dramatic effects on the global sea level were caused by glacial-isostatic adjustment (GIA) and ice gravity on the coastal zones associated with the ocean thermal expansion under greenhouse conditions. The fast input of meltwaters contributed to a stable density ocean stratification formed by hypersaline deep waters and meltwater surface layers. The ocean desaturation occurred in a timescale ranging from tens of thousands to thousands of years. The Puga cap carbonate (~635 Ma), the basal deposits of the Araras-Alto Paraguai basin from the southern Amazon Craton, is revisited in the classical sections from the Tangará da Serra and Mirassol d'Oeste, Mato Grosso State. This succession is one of the best records for evaluating the supersaturation events under GIA and transgression conditions that controlled the accommodation space in the southern Amazon Craton. Sedimentological and stratigraphic data were integrated with new paleoceanographic, and paleo-redox data combined with diagenetic, crystallographic, geochemical (primarily rare earth elements and trace metals), and isotopic (whole rock $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\epsilon\text{Nd}(t)$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, Sm/Nd) results providing further insights to understand the post-Marinoan conditions. The Puga cap carbonate sequence spans approximately 90 meters, with the first 10 meters composed of glaciomarine deposits, diamictites, and dropstones from the Puga Formation. The basal contact with diamictites is plastically deformed, indicating rapid carbonate precipitation. The cap dolostone consists of stratiform doloboundstones with gypsum pseudomorphs and domal doloboundstones with tubestone, which were deposited in a shallow platform with intense microbial activity. Peloidal dolomudstone/dolopackstone with laminations parallel to bedding planes and peloidal dolograins/dolomudstone with quasi-planar laminations and low-angle truncation were formed in a wave-influenced shallow platform. The cap limestone conformably overlies the cap dolostone deposits, marked by dolomitic marlstone with calcite crystal fans (aragonite pseudomorphs) interbedded with mega-rippled limestone. The facies association of the cap limestone indicates moderately deep-water conditions dominated by waves and storms transitioning to a deep platform supersaturated with CaCO_3 . The main diagenetic process is dolomitization during syn-depositional and shallow burial stages. Rare earth element + yttrium patterns have been analyzed in these deposits. Low Y/Ho ratios (<36) in the cap dolostone suggest a mixture of meltwater and seawater, while the base records superchondritic Y/Ho values up to 70 and high Eu/Eu* values up to 3, indicating upwelling of hypersaline seawater with hydrothermal fluid interaction, suggesting dolomite precipitation

during ocean destratification. The radiogenic isotopic compositions of Nd, combined with other proxies such as $\delta^{13}\text{C}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, indicate the influence of continental and marine contributions. The Nd isotopic system, less susceptible to diagenetic exchanges, revealed distinct signatures of water masses and enhanced weathering of the Amazon Craton during deglaciation. This process is indicated by geochemical trends (e.g., Y/Ho) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\epsilon\text{Nd}(t)$, $\delta^{13}\text{C}$ values. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ data in the cap dolostone range from 0.7264 to 0.7084, higher than pre- and post-glacial seawater values. More radiogenic $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values associated with less radiogenic $\epsilon\text{Nd}(t)$ values, similar to those found in diamictites, reinforce coastal weathering contribution to meltwaters. This multiproxies approach is a reconciliation with the previous rapid cap carbonate precipitation model following the short-term timescale for ocean destratification. Redox-sensitive trace metal data, U, Mo, V, Ni, Cu, P, and $\delta^{13}\text{C}$ isotopes, indicated paleo-redox states and paleoproductivity during the post-glacial transgression. The cap dolostone precipitated under oxygenated conditions with extensive microbial community contributions, transitioning to predominantly dysoxic conditions with wave action in the last deposition phase. The abrupt sea-level rise altered the biogeochemical cycle, indicating a direct relationship between oxygen production and rapid microbial community colonization. The rapid sea-level rise and continental weathering reduced seawater Mg/Ca ratios with substantial Ca^{2+} input, also demonstrated by $\epsilon\text{Nd}(t)$ values, causing the change of dolomitic platform to CaCO_3 -supersaturated seas in the Amazon Craton margin. Additionally, low siliciclastic content in the cap dolostone is consistent with the siliciclastic starvation model, and the abrupt increase caused the decline of microbial communities coincident with the predominance of dysoxic conditions and long-term transgression. During specific Cryogenian-Ediacaran deglaciation scenarios, anomalous sedimentary and geochemical processes generated one of the most complex paleoenvironmental disturbances in the biogeochemical cycle. They strongly influenced the rapid primary productivity, directly impacting microbial life. The analysis of Precambrian scenarios in the Amazon Craton unraveling the extreme climates sheds critical light on extremophile life proliferation and has strong implications for understanding other planetary surfaces.

Keywords: oceanic stratification; paleocoastal; primary productivity; paleoredox; cap dolostone