



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

TESE Nº 149

**ESTRATIGRAFIA E EVENTOS DA TRANSIÇÃO
NEOARQUEANO-PALEOPROTEROZOICO DA BACIA DE
CARAJÁS, SUDESTE DO CRATON AMAZÔNICO**

Tese apresentada por:

RAPHAEL NETO ARAÚJO

Orientador: Prof. Dr. Afonso Cesar R. Nogueira (UFPA)

**BELÉM- PARÁ
2020**

**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)**

A658e Araújo, Raphael Neto
Estratigrafia e eventos da transição Neoarqueano-Paleoproterozoico da
Bacia de Carajás, sudeste do Cráton Amazônico / Raphael Neto Araújo.
— 2020.

xxvi, 187 f. : il. color.

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

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e
Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará,
Belém, 2020.

1. Estratigrafia. 2. Bacia de Carajás. 3. Glaciação Serra Sul.
4. Evolução tectono-sedimentar. 5. Neoarqueano-Paleoproterozoico.
I. Título.

CDD 551.7



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

**ESTRATIGRAFIA E EVENTOS DA TRANSIÇÃO
NEOARQUEANO-PALEOPROTEROZOICO DA BACIA DE
CARAJÁS, SUDESTE DO CRATON AMAZÔNICO**

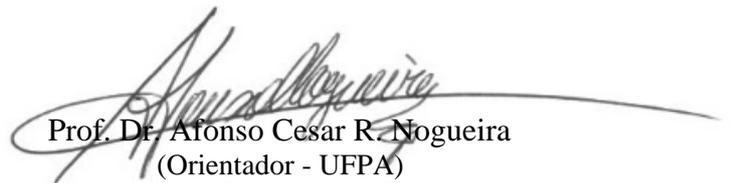
TESE APRESENTADA POR:

RAPHAEL NETO ARAÚJO

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

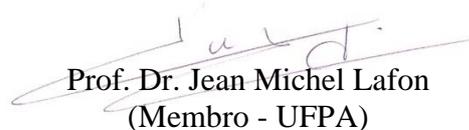
Data de Aprovação: 18 / 09 / 2020

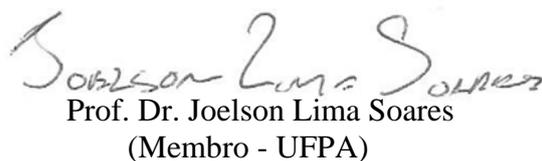
Banca Examinadora:


Prof. Dr. Afonso Cesar R. Nogueira
(Orientador - UFPA)


Prof.ª Dr.ª Lucieth Cruz Viêira
(Membro - UnB)


Prof. Dr. Ricardo Ivan Ferreira da Trindade
(Membro - USP)


Prof. Dr. Jean Michel Lafon
(Membro - UFPA)


Prof. Dr. Joelson Lima Soares
(Membro - UFPA)

À minha família:
Ofir Moraes, Edith Carvalho, Ana Barata,
Rosiane Araújo, Roberto Araújo,
Roberto Araújo Filho e Quézia Alencar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus e ao seu filho Jesus Cristo por todo amor, pelas bênçãos em minha vida e por ter me guiado até esse momento. Em diversos momentos da minha vida ele me mostrou que está vivo e opera milagres nas nossas vidas, acredite.

A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) ou apenas Serviço Geológico do Brasil pelo apoio material e financeiro concedido ao meu doutorado através do projeto Área de Relevante Interesse Mineral de Carajás (ARIM-Carajás) da superintendência regional de Belém (SUREG-BE). Em especial, gostaria de agradecer ao gerente de geologia César Chaves pelo apoio e auxílios prestados em diversas etapas do trabalho, principalmente nas vésperas de etapas de campo sempre prestativo aos trâmites administrativos.

À Universidade Federal do Pará (UFPA) através do Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) pelo apoio concedido durante o programa de doutorado. Em especial, gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Cláudio Lamarão (coordenado do PPGG) pelo apoio e auxílios prestados principalmente durante as etapas finais da tese, bem como, a Cleida Freitas e Joanicy Lopes (secretárias do PPGG) pela ajuda nos tramites finais de entrega da tese. Aos bibliotecários do Instituto de Geociências, em especial, a sra. Lúcia Imbiriba pelas orientações e ajuda na formatação da tese de acordo com as normas do PPGG.

À mineradora Vale S.A. (Parauapebas, Pará, Brasil) por ter cedido os testemunhos de sondagem para estudo e pelo apoio dispensado durante as etapas de campo na região de Carajás. Em especial, gostaria de agradecer aos geólogos que nos acompanharam durante a descrição dos testemunhos nos galpões e nas minas desta empresa Fernando Matos, Sérgio Barcelar, Luiz Cláudio Costa, Fernando Prezotti e Cláudio Rosas. Outros geólogos e técnicos da Vale S.A. participaram destas etapas, e de igual forma, sintam-se agradecidos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira (UFPA) por todos os ensinamentos e oportunidades durante estes mais de dez anos de trabalho. Gostaria de agradecer ainda aos integrantes do grupo de Análise de Bacias Sedimentares da Amazônia (GSED), em especial, aos professores Dr. José Bandeira e Dr. Joelson Soares.

Ao Prof. Dr. Werner Truckenbrodt (UFPA) e sua esposa “Nega”, pelo carinho e apoio durante diversas etapas desse trabalho. Obrigado professor por ter lido e contribuído com o artigo sobre a glaciação Serra Sul de Carajás!

Gostaria de agradecer ainda a Dra. Lúcia Travassos da Rosa-Costa (CPRM-Belém) e a Dra. Cintia Maria Gaia da Silva (CPRM-Belém) pelo incentivo para realização desta tese de doutorado. Lúcia foi a primeira pessoa que me recebeu na CPRM em Belém, e Cintia foi a primeira pessoa a me apresentar a extensa bibliografia sobre Carajás.

Aos amigos que fiz na CPRM ao longo destes quase sete anos no serviço geológico brasileiro, Marcos Vinicius, Bruce Chiba, Pedro Cordeiro, Moacir Furtado, Marcos Quadros, Paulo Melo, Djalma Hartery e Silvio Lisboa. Em especial gostaria de agradecer ao amigo Edilberto Leão (*in memoriam*), que nos deixou muito cedo, mas que tive a oportunidade de conviver e aprender com ele durante algumas etapas de campo para Carajás.

À Rosalva Coelho (CPRM-Belém) por ter me ensinado tudo sobre separação de zircão e ter me ajudado a separar os grãos de zircão das minhas amostras. Agradeço ainda aos colegas Érica, Denise, seu Avelino, Paulo Sérgio e Linaldo que me ajudaram em diferentes etapas na preparação das amostras para geocronologia, cada um com sua contribuição importante.

Ao colega de pós-graduação da UFPA Alexandre Ribeiro, atualmente doutorando da UNICAMP, que estava terminando seu mestrado e mesmo assim aceitou o convite de ir a Carajás para me ajudar durante uma das etapas de campo. Poucas são as pessoas que largam o que estão fazendo para ajudar os outros e você fez isso. Muito obrigado meu nobre colega.

Ao Prof. Dr. Pascal Philippot (IPGP/França) e os seus alunos de doutorado e pós-doutorado que estiveram em Carajás comigo durante uma das etapas de campo. Embora tenham sido dias de trabalho incessantes, muitas coisas boas nasceram das nossas discussões.

Gostaria de agradecer também ao meu sogro Joel, a minha sogra Amélia, e a minha cunhada Esther pelo carinho, apoio e torcida pelo sucesso desse trabalho. Estendo meus agradecimentos ainda a minha cunhada Luana Silva e a minha sobrinha Giovanna Araújo, que ainda não nasceu, mas que já está trazendo muita luz para esse mundo. Te desejo muitas bênçãos em sua vida e que você traga muitas coisas boas aos seus pais e a nossa família.

Agradeço ainda a todos aqueles, que embora não citados, contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento da tese. Por fim, gostaria de pedir desculpas a minha família pela minha ausência nesses últimos anos em reuniões e dias festivos. Diversos finais de semana abdiquei do convívio da minha família devido a minha tese de doutorado. O futuro nos dará muito mais dias de alegria e amor.

"O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano".

(Sir Isaac Newton)

RESUMO

A transição Neoarqueano-Paleoproterozoico é marcada por uma série de modificações paleoambientais, paleoclimáticas e tectônicas que resultaram em eventos dramáticos, que impuseram à Terra condições inéditas, algumas de caráter irreversível. Em termos paleoambientais, destaca-se o aumento dramático do oxigênio no sistema hidrosfera-atmosfera, a partir do *Great Oxidation Event* (GOE) por volta de 2.45 Ga. O aumento do oxigênio foi acompanhado da diminuição de *greenhouse gases* como CO₂ e CH₄, que promoveu o aparecimento de diferentes episódios glaciais por volta de *ca.* 2.45–2.22 Ga, genericamente denominados de *Huronian Glacial Event* (HGE). Embora diversos trabalhos sustentem a hipótese de que esses episódios glaciais correspondam ao primeiro evento glacial de escala global da história da Terra (*Paleoproterozoic snowball Earth*), contradições estratigráficas e geocronológicas impõem dúvidas quanto a sua extensão global. Estranhamente, ao passo que esse conjunto de eventos é amplamente reconhecido em diversas áreas cratônicas ao redor do globo, no Cráton Amazônico eles ainda permanecem pouco compreendidos e/ou ainda não reportados. Neste estudo, a investigação estratigráfica, sedimentológica e geocronológica da sucessão vulcano-sedimentar (*ca.* 5 km de espessura) da Bacia de Carajás localizada no sudeste do Cráton Amazônico, norte do Brasil, permitiu o reconhecimento e sequenciamento de alguns desses eventos registrados nessa bacia. Duas unidades litoestratigráficas estão sendo formalmente propostas para essa bacia: a Formação Serra Sul e a Formação Azul. Intervalos de diamictito glacial do Sideriano–Riáciano (*ca.* 2.58–2.06 Ga) ocorrem empilhados na Formação Serra Sul, e representam o primeiro registro de depósitos glaciais dessa idade na América do Sul. Em termos paleogeográficos, a ocorrência de depósitos glaciais Paleoproterozoicos nesta parte do globo, expande o alcance dessas glaciações para o Cráton Amazônico pela primeira vez, muito embora, o diamictito Serra Sul possa ser correlato a algumas das glaciações Paleoproterozoicas conhecidas, ou a nenhuma delas. Texturas glaciais bem preservadas como foliação glacial e *dropstone features*, indicam que a deposição da desses estratos ocorreu em um sistema subglacial costeiro, no qual sedimentos glaciogênicos foram ressedimentados em um sistema de leque submarino e através de processos de *ice rafting* em águas distais do sistema marinho. O sistema glacial Serra Sul foi desenvolvido imediatamente acima dos estratos pré-glaciais representados pelas unidades de formação ferrífera bandada e rochas vulcânicas do Neoarqueano, que não somente funcionaram como substrato principal, mas também como fonte principal de sedimentos. Adicionalmente, os dados estratigráficos indicam que imediatamente acima do diamictito Serra Sul, depósitos de ritmito da Formação Azul, localmente enriquecidos em manganês, foram depositados em um sistema marinho raso (*offshore* e *offshore*

transition/shoreface), como resultado do aumento do nível do mar durante a fase de deglaciação. Os estratos enriquecidos com manganês foram possivelmente depositados em associação com *black shale*—que levou a formação de rodocrosita durante a diagênese—nas porções mais profundas da bacia marinha. Evidências petrográficas e mineralógicas, sustentadas por observações de campo, sugerem que o manganês foi remobilizado como óxido através de falhas para zonas de baixa tensão e elevada permo-porosidade dentro de camadas de *red beds* da Formação Azul, de forma similar ao observado na migração de hidrocarbonetos. Em termos estratigráficos, a Formação Azul encerra os mesmos intervalos anteriormente inseridos no membro inferior da Formação Águas Claras. Essa formação foi redefinida para designar exclusivamente depósitos de arenito, conglomerado e conglomerado jaspilíticos depositados em um sistema tipo *fluvial braided*, que ocorrem em discordância acima da Formação Azul. Além disso, é sugerido que as formações Azul e Águas Claras representem o registro estratigráfico de uma sequência transgressiva-regressiva (T-R). Dados geocronológicos obtidos a partir da datação U-Pb de zircão detrítico separados das formações Azul e Águas Claras indicam que rochas do Mesoarqueano e Neoarqueano, possivelmente dos domínios Rio Maria e Carajás, foram as principais rochas-fonte de sedimentos. A distribuição das idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de 76 análises concordantes da Formação Azul indicam uma idade para população mais jovem em *ca.* 2.27 Ga, interpretada como a idade máxima de deposição dessa unidade. A ocorrência de grãos de zircão do Riáciano e Orosiriano nessa unidade sugere fortemente que o Domínio Bacajá pode ter sido fonte subordinada de sedimentos, e em termos paleogeográficos, sugere uma possível conexão entre esse domínio e o Domínio Carajás nesse período. A análise integrada dos resultados, apoiada em dados geológicos regionais anteriores, permitiu a proposição de um modelo tectono-sedimentar para a evolução da sucessão Paleoproterozoica da Bacia de Carajás. É sugerido que essa bacia provavelmente evoluiu, durante grande parte do Paleoproterozoico como uma bacia *foreland*, como resultado da colisão entre os domínios Bacajá e Carajás durante o ciclo orogenético Transamazônico por volta de *ca.* 2.2–2.0 Ga. O movimento convergente desses blocos ocasionou o soerguimento gradual do protocontinente Carajás; o fechamento do mar Azul, e a instalação de um amplo sistema fluvial-aluvial, no qual as formações Águas Claras e Gorotire foram depositadas. Esse cenário de profundas modificações esteve diretamente ligado a configuração do supercontinente Columbia, que promoveu a continentalização e amalgamação das massas de terra que posteriormente formaram o proto-Cráton Amazônico no final do Paleoproterozoico.

Palavras-chave: Estratigrafia. Bacia de Carajás. Glaciação Serra Sul. Evolução tectono-sedimentar. Neoarqueano-Paleoproterozoico.

ABSTRACT

The Neoproterozoic-Paleoproterozoic transition is marked by a series of paleoenvironmental, paleoclimatic and tectonic changes that resulted in dramatic events, which imposed to the Earth novel conditions, some of them with irreversible characteristics. On the paleoenvironmental aspect, it is highlighted the rise of oxygen in the hydrosphere-atmosphere system, onset the Great Oxidation Event (GOE) at around *ca.* 2.45 Ga. The rise of this gas caused consequently the decrease of the greenhouse gases such as CH₄, which promoted the emergence of glacial episodes at around *ca.* 2.45–2.22 Ga, generically termed the Huronian Glacial Event (HGE). Although several studies support the hypothesis that these glacial episodes represent the first global glaciation of the Earth's history (Paleoproterozoic snowball Earth), stratigraphic and geochronological contradictions impose doubt as to its global extension. Strangely, although this set of events is widely recognized in several cratonic areas around the globe, these events are still poorly understood and/or not yet reported in the Amazonian Craton. In this study, the stratigraphic, sedimentological and geochronological investigation of the volcano-sedimentary succession (*ca.* 5-km-thick) of the Carajás Basin, situated in the southeastern Amazonian Craton, northern Brazil, allowed the recognition and sequencing of some of these events in this basin. Two new units are being formally proposed to this basin: the Serra Sul and Azul formations. Glacial diamictite intervals of the Siderian–Rhyacian (*ca.* 2.58–2.06 Ga) occur stacked within the Serra Sul Formation, and are the first reported occurrence of glacial deposits of that age in South America. In paleogeographic terms, the occurrence of Paleoproterozoic glacial deposits in this part of the globe, expands the reach of these glaciations to the Amazonian Craton for the first time, although the Serra Sul diamictite may be correlated with any of the known Paleoproterozoic glaciations, or none of them. Well-preserved textures, such as glacial foliation and dropstone features, indicate that the deposition of the Serra Sul Formation occurred in a coastal subglacial setting, in which glaciogenic sediments were resedimented in submarine fan system, and through ice rafting process in distal waters of the marine environment. The Serra Sul glacial system was developed immediately above of pre-glacial strata represented by the Neoproterozoic banded iron formation and volcanic rock units, which not was the main substrate, but also was the main source of sediments to this glacial system. Additionally, the stratigraphic results indicate that the immediately above of the Serra Sul diamictite, rhythmite deposits of the Azul Formation, locally enriched in manganese, were deposited in a shallow marine environment (offshore and offshore transition/shoreface zones), as a result of the sea level rise during the deglaciation phase. The manganese-bearing strata were possibly deposited in association with black shale deposits—which allowed the formation

of rhodochrosite during diagenesis—in deep zones of the marine basin. Petrographic and mineralogical evidences, supported by field observation, indicate that manganese oxides were secondarily remobilized through faults to zones with low strain and high permo-porosity within red bed strata of the Azul Formation, similarly to that observed in hydrocarbon migration. In stratigraphic terms, the Azul Formation represents the same interval previously arranged in the lower member of the Águas Claras Formation. This formation was redefined to designate exclusively sandstone, conglomerate and jasper conglomerate strata, deposited in a braided fluvial system, which occur in unconformably immediately above of the Azul Formation. Moreover, it is suggested that the Azul and Águas Claras formations are the stratigraphic record associated with a transgressive-regressive sequence (T-R). The dating (U-Pb) of detrital zircon grains separated from the Azul and Águas Claras formations indicate that Meso- to Neoproterozoic rocks, possibly of the Rio Maria and Carajás domains, were the main source of sediments. The $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age distribution of the 76 concordant analysis of the Azul Formation indicate a youngest population at *ca.* 2.27 Ga, interpreted as the maximum deposition age of this unit. The occurrence of Rhyacian to Siderian zircon grains in this unit strongly suggest that the Bacajá Domain may have been a subordinated source of sediments, and in paleogeographic terms, suggest a possible connection between this domain and the Carajás Domain at that time period. The integration of the results obtained from this study, supported by previous data on the regional geology, allowed the proposition of a tectono-sedimentary evolutive model to the Paleoproterozoic succession of the Carajás Basin. It is envisaged that this basin evolved during the greater part of the Paleoproterozoic in a foreland style, as result of the collision of the Bacajá and the Carajás domains during the Transamazonian orogenetic cycle at *ca.* 2.2–2.0 Ga. The convergent movement of these blocks caused the gradual uplift of the Carajás protocontinent; the closure of the Azul Sea, and installation of a wide fluvial-alluvial system, in which the Águas Claras and Gorotire formations were deposited. This scenario of profound changes is directly related to the Columbia supercontinent assembly at the end of the Paleoproterozoic, that promoted the continentalization and amalgamation of the ancient landmasses that later formed the proto-Amazonian Craton at the end of Paleoproterozoic.

Keywords: Stratigraphy. Carajás Basin. Serra Sul glaciation. Tectono-sedimentary evolution. Neoproterozoic-Paleoproterozoic.