



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

---

**TESE DE DOUTORADO Nº 143**

**PALEOAMBIENTE E PALEOCLIMA DA FORMAÇÃO  
PEDRA DE FOGO DA BACIA DO PARNAÍBA E SUA  
CORRELAÇÃO COM OS EVENTOS GLOBAIS DE  
SILICIFICAÇÃO DO PERMIANO**

Tese apresentada por:

**LUIZ SATURNINO ANDRADE**

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

---

**BELÉM- PARÁ  
2019**

**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)**

- 
- A553p      Andrade, Luiz Saturnino de Andrade  
Paleoambiente e paleoclima da Formação Pedra de Fogo da Bacia do Parnaíba e sua correlação com os eventos globais de silicificação do Permiano / Luiz Saturnino de Andrade. — 2019.  
xxv, 176 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira Nogueira  
Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
1. Rochas Sedimentares. 2. Geologia estratigráfica - Permiano. 3. Paleoclima - Silicificação. 4. Bacia Sedimentares. 5. Pangea (Supercontinente). I. Título.

CDD 552.50981

---



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



**PALEOAMBIENTE E PALEOCLIMA DA FORMAÇÃO  
PEDRA DE FOGO DA BACIA DO PARNAÍBA E SUA  
CORRELAÇÃO COM OS EVENTOS GLOBAIS DE  
SILICIFICAÇÃO**

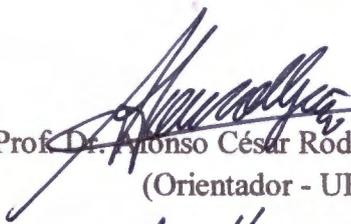
**TESE APRESENTADA POR:**

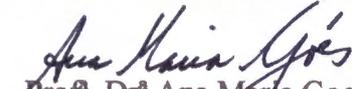
**LUIZ SATURNINO DE ANDRADE**

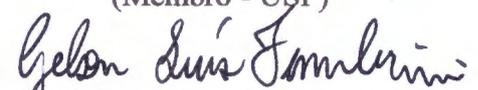
**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor na Área de GEOLOGIA, Linha de Pesquisa ANÁLISE DE BACIAS SEDIMENTARES**

**Data de Aprovação: 02 / 09 / 2019**

**Banca Examinadora:**

  
Prof. Dr. Antonio César Rodrigues Nogueira  
(Orientador - UFPA)

  
Prof. Dr.ª Ana Maria Goes  
(Membro - USP)

  
Prof. Dr. Gelson Luis Fambrini  
(Membro - UFPE)

  
Prof. Dr. Jose Bandeira Cavalcante da Silva Júnior  
(Membro - UFPA)

  
Prof. Dr. Werner Truckenbrodt  
(Membro - UFPA)



## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências e Universidade Federal do Pará (UFPA) pela infraestrutura disponível e apoio financeiro.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, código de financiamento 001), e Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq no.141968/2016-8) pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira, por sua amizade, oportunidades, confiança, paciência, apoio e incentivo, principalmente nos momentos finais para a entrega desta Tese. Agradeço também pelas discussões, questionamentos e ensinamentos científicos ao longo de todos esses anos de amizade. Muito obrigado por tudo.

Ao Laboratório de Caracterização Mineral (LCM) Setor Raios-X nas pessoas da Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Simone Paz, Andréia Oliveira e Bruna Gomes, pela disposição e auxílio nas análises de Fluorescência de Raios-X.

Ao técnico do Laboratório de Difração de Raios-X (DRX) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Aldemir Sotero, pela disponibilidade e auxílio nas análises e interpretações dos resultados.

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

Ao Laboratório de Catodoluminescência do PPGG-UFPA, na pessoa do Dr. Hudson Santos pela disponibilidade e auxílio na obtenção e interpretação das imagens de catodoluminescência.

Ao técnico do Laboratório de Sedimentologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Everaldo Cunha, pelo seu auxílio e disposição no tratamento das amostras.

À Joelma Lobo e Bruno Veras, do Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, pela confecção das lâminas delgadas e polidas. Incansáveis, simpáticos e atenciosos em todas as vezes que os procurei.

Aos colegas do Grupo de Sedimentologia da UFPA (GSED): Dr. Hudson Santos, Dr. Pedro Augusto, Msc. (quase doutor) Cleber Rabelo, aos mestrandos e doutorandos Renato Sol, Renan Fernandes, Walmir Lima, Lucas Cunha, Ivan Romero, Alexandre Ribeiro e Msc. Mateus Xavier, pela amizade, críticas, sugestões e trocas de conhecimento durante esses anos de aprendizado.

Aos amigos Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Kamilla Borges, Msc. Franco Felipe, Dr. Francisco Abrantes Jr., doutorando (USP) John Afonso, e Dr. Isaac Salém, pelas discussões geológicas e momentos de descontração.

Ao Prof. Dr. José Bandeira Cavalcante (JB), pela amizade, discussões científicas, simpatia e muita boa vontade em me ajudar sempre.

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andressa Nogueira, pela amizade e atenção recebida.

Aos professores Dr. Joelson Soares, Dr. Arnaldo de Queiroz, Dr. Vladimir Távora, Msc. Vânia Barriga, Dr<sup>a</sup>. Rosemery Nascimento, Dr. Maurício Borges, pela amizade e atenção.

Ao Prof. Dr. “Ícone da Geologia do Brasil” Roberto Vizeu, pela amizade, companheirismo, ensinamentos, e principalmente, pelos grandes momentos de relaxamento durante os exercícios (TORA-TORA) em “nosso circuito particular”, livres da algazarra urbana. Uma grande amizade que levarei por toda a vida.

Ao Prof. Dr. Fábio Fernandes, pela grande amizade, e pelos momentos de brutalidade nos treinos de corrida.

Ao Dr. Guilherme Raffaeli, pela amizade, discussões científicas e revisão crítica de um dos artigos com importantes recomendações para a melhoria do trabalho.

Ao Dr. Cléber Calça, pela elaboração das lâminas de microbialitos, discussões e sua valiosa interpretação.

Ao Prof. Dr. Juan Carlos Cisneros, da Universidade Federal do Piauí, por sua importante ajuda na realização dos campos, e obtenção das amostras do sílex Pedra de Fogo.

Ao Prof. Dr. Roberto Iannuzzi, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelas discussões sobre as particularidades da paleoflora permiana.

À Doutoranda (UFRGS) Domingas Maria da Conceição, pelas discussões sobre a paleoflora permiana.

Às Secretárias Cleida Freitas e Joanicy Lopes, pela gentileza, atenção e simpatia.

À mestranda Beatriz Oliveira pelo essencial auxílio na tradução de um dos artigos, e também pelas deliciosas trufas.

Aos amigos Afonso Quaresma, Ivaldo Belém, Afonso Ferreira, Francisco Nascimento (Naná), Nazareno, Walter Pinheiro (Waltinho), Lourivaldo Costa (Hulk) pela amizade.

À amiga de longa data, doutoranda Vanisse Rodrigues, pela amizade e momentos de descontração.

Agradeço especialmente à amiga mestranda Amanda Suany, pela amizade, atenção, gentileza, questionamentos filosóficos, e especialmente, por seu essencial esforço e dedicação na formatação desta Tese. Sua ajuda foi importantíssima. MUITÍSSIMO obrigado.

Agradeço especialmente à minha esposa doutoranda Renata Veras, que sempre esteve ao meu lado, apoiando com palavras de incentivo, amor, carinho, atenção e paciência, principalmente nos muitos momentos de estresse e tensão, durante as várias madrugadas despertas para o fechamento desta Tese. Obrigado pela elaboração dos mapas e da minuciosa formatação desta Tese. Jamais teria conseguido sem a sua incansável ajuda. MUITÍSSIMO obrigado. Te amo!

Aos meus pais, por seus esforços na minha criação e educação, pelos valores passados e ensinamentos transmitidos. Nunca tiveram as oportunidades que eu tenho, mas sempre se mantiveram ao meu lado, independente da distância e dos muitos momentos de ausência ao longo desses anos de dedicação a Geologia. O amor que sinto por vocês é indescritível. Aos meus irmãos pela atenção, respeito e carinho.

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

*Tudo tem suas maravilhas,  
até mesmo a escuridão e o silêncio...  
e eu aprendi que em qualquer estado que esteja,  
estarei contente”*

*(Helen Keller)*

## RESUMO

A Formação Pedra de Fogo da Bacia do Parnaíba, localizada no Nordeste do Brasil, constitui uma unidade sedimentar que possui um dos mais importantes registros sedimentares do início do Permiano (Cisuraliano), caracterizada principalmente por intensa silicificação. Embora muitos trabalhos tenham contribuído para o entendimento do paleoambiente desta unidade, importantes lacunas quanto às condições sedimentológicas e paleoclimáticas que favoreceram a grande concentração e preservação da sílica, mediante as mudanças globais ocorridas no início e ao longo do Permiano, ainda permanecem inconclusivas. Apesar de notório que as fontes de sílica contribuíram para o expressivo conteúdo de *chert*, estas nunca foram satisfatoriamente explicadas. Não se tem referências sobre as origens orgânica e/ou inorgânica, bem como, pouco se sabe a respeito das condições e processos que conduziram à preservação dos depósitos e concreções silicosas, bem como a gênese da conhecida ocorrência de carbonatos. No intuito de preencher estas lacunas, e/ou contribuir para o melhor entendimento dos processos deposicionais na Formação Pedra de Fogo. Este estudo fez análises de fácies e estratigrafia, e petrografia, complementadas por imagens de catodoluminescência, análise de DRX e MEV-EDS nos depósitos permianos expostos nas porções leste, sul e oeste da Bacia do Parnaíba. As principais fácies sedimentares foram agrupadas em associações de fácies representativas de um sistema fluvial entrelaçado e eólico, posicionados no topo da Formação Piauí (Carbonífero). Esses depósitos são sobrepostos por um sistema lacustre-*sabkha* da Formação Pedra de Fogo, dominado por ondas de tempestades, e alimentado por uma rede de fluviais efêmeros. De uma forma geral, a Formação Pedra de Fogo representa um sistema lacustre de clima árido, endorréico, frequentemente afetado por regimes de tempestades e alimentado por fluviais efêmeros, na sua maioria não-canalizados. Embora caracteristicamente de clima árido, este sistema mantinha, pelo menos sazonalmente, teores relativamente elevados de umidade suficiente para manutenção e proliferação de sua pujante tafoflora, formada principalmente por samambaias e gimnospermas. Essa flora colonizava as margens desses lagos, tanto nos períodos relativamente úmidos, quanto nos períodos relativamente secos, como forma de compensar a reduzida umidade do macroambiente. As variações entre o posicionamento estratigráfico dos registros de estruturas organossedimentares (tapetes microbianos e estromatólitos estratiformes) e caules de gimnospermas em posição de vida, foram interpretadas como variações recorrentes da linha de costa lacustre, em resposta as fases de expansão e contração desses lagos, desencadeadas por sazonalidades climáticas que prevalecia na porção ocidental sul do Pangeia.

Provavelmente, a flora da Formação Pedra de Fogo constituiu importante catalizador da expressiva silicificação que caracteriza esta unidade. Esta silicificação é predominantemente sindeposicional/eodiagenética, formada amplamente por microquartzo, sob condições de supersaturação em sílica suficientemente alta para preservar delicados filamentos de cianobactérias, bem como pínulas de samambaias e caules de gimnospermas em posição de vida. A oclusão de fraturas e vazios de dissolução (poros secundários) por mosaico de cristais de megaquartzo, esferulitos de calcedônia e duas gerações de calcedônia fibrosa (*chalcedonic overlay*), além de grandes cristais (mm) em drusa de calcita espática, são indicativos de silicificação policíclica e posterior circulação de fluidos carbonáticos até zonas mesogenéticas. A presença da microtextura *gridwork*, indica que a gênese da silicificação é similar ao chert-tipo Magadi (*Rift Valley* no Quênia), porém de fontes distintas, dada a inexistência, pelo menos até o momento, de fontes vulcânicas associadas aos depósitos do Pedra de Fogo.

Palavras-chave: Permiano. Paleoclima. Silicificação. Lacustre. Sabkha

## ABSTRACT

The Pedra de Fogo Formation of the Parnaíba Basin, Northern Brasil is a sedimentary unit that has one of the most important sedimentary records of the early Permian (Cisuralian), characterized mainly by intense silicification. Although previous works have contributed to the understanding of its paleoenvironment, important gaps regarding the sedimentary and paleoclimatic conditions that favored the great concentration and preservation of silica, due to the global changes occurred at the beginning and along of the Permian, still remain inconclusive. Problems as to which sources of silica contributed most to the expressive chert content were never satisfactorily explained. There is no reference to the organic and/or inorganic origins, nor is little known about the conditions and processes that led to the preservation of silica deposits and concretions, as well as the genesis of the known occurrence of carbonates. In order to fill these gaps and/or contribute to a better understanding of the depositional processes in the Pedra de Fogo Formation. This study made facies and stratigraphic analysis, and petrography, complemented by cathodoluminescence image, XRD and SEM-EDS analysis of the permian deposits exposed in the east and southeast portions of the Parnaíba Basin. The main sedimentary facies were grouped into facies associations representative of braided fluvial-aeolian systems from the top Piauí Formation (Carboniferous). This deposits are overlain by lacustrine-sabkha system, wave-dominated nearshore-lacustrine and ephemeral streamsdeposits of the Permian Pedra de Fogo Formation. In general, this unit was deposited in an arid, endorheic lacustrine system, often affected by storm regimes and fed by unconfined flows. Although the arid climate was predominant, this system keeps seasonally, relatively high levels of moisture sufficient to maintain and proliferate its thriving taphoflora, formed mainly by Ferns and Gymnosperms tree. This flora colonized the lakeshore, both in relatively wet and dry periods, as a way to compensate for the low humidity in macroenvironmental. Cyclic variations between the records of organosedimentary structures (microbial mats and stratiform stromatolites) and gymnosperm stem in life position were interpreted as the recurrent migration of the lacustrine shoreline, in response to the expansion and contraction phases of these lakes, triggered by climatic seasonality in the southwestern portion of Pangea. Probably, the flora of the Pedra de Fogo Formation was an important catalyst for the expressive silicification that characterizes this predominantly syndepositional / eodiagenetic unit. This silicification is formed largely by microquartz, under conditions of supersaturation in silica, high enough to preserve the

delicate cyanobacteria filaments, as well as pinnules ferns and gymnosperm stems in life position. The occlusion of fractures and dissolution voids (secondary pores), by mosaic megaquartz mosaic, chalcedony spherulites and two generations of chalcedonic overlays, in addition to large crystals (mm) in coarse mosaic calcspar are indicative of polycyclic silicification and circulation of carbonate fluids to mesogenetic zones. The presence of gridwork microtexture indicates that the genesis of silicification is similar to the Magadi chert-type (Rift Valley of Kenya), but from distinct sources, given the absence of volcanic sources associated with Pedra de Fogo deposits.

Key words: Permian. Paleoclimate. Silicification. Lacustrine. Sabkha



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



## PARECER

### Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de LUIZ SATURNINO DE ANDRADE

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **LUIZ SATURNINO DE ANDRADE** orientando do Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira (UFPA), composta pelos professores doutores Ana Maria Goes (USP), Gelson Fambrini (UFPE), Werner Truckenbrodt (UFPA) e José Bandeira Cavalcante da Silva Júnior (UFPA), após apresentação da sua tese intitulada **“PALEOAMBIENTE E PALEOCLIMA DA FORMAÇÃO PEDRA DE FOGO DA BACIA DO PARNAÍBA E SUA CORRELAÇÃO COM OS EVENTOS GLOBAIS DE SILICIFICAÇÃO DO PERMINANO”**, emite o seguinte parecer:

O candidato realizou sua apresentação de forma clara, bem organizada e segura no tempo estipulado. Na arguição mostrou domínio da temática abordada e respondeu às perguntas formuladas pela banca. O trabalho escrito foi apresentado na forma de três artigos, dois internacionais e um nacional, e atende as exigências básicas para uma tese de doutorado.

Destacam-se as contribuições inéditas em relação à estratigrafia de alta resolução e novos dados que discutem a silicificação pervasiva do intervalo Pedra de Fogo.

Pelo exposto, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar com distinção a tese de doutorado.

Belém, 02 de setembro de 2019.

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

Prof.ª Dr.ª Ana Maria Góes (USP)

Prof. Dr. Gelson Fambrini (UFPE)

Prof. Dr. Werner Truckenbrodt (UFPA)

Prof. Dr. José Bandeira Cavalcante da Silva Júnior (UFPA)