



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

TESE DE DOUTORADO Nº 159

**EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS LIMITES
AUSTRAL E BOREAL DOS MANGUEZAIS AMERICANOS
DURANTE O HOLOCENO E ANTROPOCENO**

Tese apresentada por:

ÉRIKA DO SOCORRO FERREIRA RODRIGUES

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Cancela Lisboa Cohen (UFPA)

**BELÉM- PARÁ
2021**

**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)**

R696e Rodrigues, Érika do Socorro Ferreira

Efeitos das mudanças climáticas nos limites austral e boreal dos manguezais americanos durante o Holoceno e Antropoceno / Érika do Socorro Ferreira Rodrigues. — 2021.

xix, 123 f.: il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Cancela Lisboa Cohen

Coorientador(a): Prof. Dr. Kam-Biu Liu

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

1. Aquecimento global. 2. Nível do mar. 3. Manguezais americanos. 4. Palinologia. 5. Holoceno e Antropoceno. I. Título.

CDD 551.9



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

**EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS LIMITES
AUSTRAL E BOREAL DOS MANGUEZAIS AMERICANOS
DURANTE O HOLOCENO E ANTROPOCENO**

TESE APRESENTADA POR:

ÉRIKA DO SOCORRO FERREIRA RODRIGUES

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutora em Ciências na Área de GEO-
LOGIA e Linha de Pesquisa em GEOLOGIA MARINHA E COSTEIRA**

Data de Aprovação: 08 / 09 / 2021

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Cancêla Lisboa Cohen
(Orientador-UFGPA)

Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini
(Membro – IG/USP)

Prof. Dr. Paulo Eduardo de Oliveira
(Membro – IG/USP)

Prof. Dr. José Augusto Martins Corrêa
(Membro-UFGPA)

Prof. Dr. Nils Edvin Asp Neto
(Membro – UFGPA)

*Dedico aos meus queridos professores,
Marcelo Cohen e Luiz Pessenda*

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 (PDSE-CAPES);

À Louisiana State University (LSU- EUA) pela grande estrutura e apoio nos meus 7 meses de permanência de Doutorado Sanduíche (PDSE-CAPES);

Ao meu orientador no qual admiro muito, Prof. Dr. Marcelo Cancela Lisboa Cohen, agradeço sinceramente pela sua supervisão, apoio moral, incentivo, confiança, paciência, ensinamentos em trabalhos de campo e oportunidade de orientação em minha pesquisa de doutorado ao longo de quatro anos na Universidade Federal do Pará. Seus ensinamentos levarei para o resto de minha vida acadêmica;

Ao querido Prof. Dr. Luiz Carlos Ruiz Pessenda, agradeço a grande oportunidade e parceria nesse trabalho. Minha tese nunca poderia ter sido concluída sem todo apoio logístico durante os trabalhos de campo e atividades em seu laboratório (Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA). Agradeço pela confiança e oportunidade relacionado ao trabalho da Baía de São Francisco do sul (SC). Sua abordagem ao ensino e à pesquisa tem me inspirado muito;

Agradeço ao Prof. Dr. Kam-biu Liu, o qual tive o privilégio de trabalhar em pesquisa relacionada a paleotempestologia e técnicas polínicas em seu laboratório na Universidade da Louisiana (LSU – EUA);

Ao Prof. Dr Marlon França (IFPA) pela paciência e conselhos na trajetória de conclusão da Tese;

À minha querida amiga, Cleida Freitas agradeço por me ensinar tudo sobre organização institucional assim como toda a paciência durante 7 anos de integra convivência. Ao querido e especial amigo Dr. Qiang Yao agradeço a parceria nos artigos científicos.

Agradeço as minhas amigas Beatriz Luna e Luiza Reis pela parceria acadêmica. Amizades que levarei no coração;

Aos membros do laboratório de Paleoecologia global da LSU nas pessoas de Nicholas Culligan, Lance Riedlinger, Junghyung Ryu, Alex Moreno e Marianne Dietz. Agradeço a

atenção e auxílio nas análises polínicas e LOI-XRF;

Aos amigos e pesquisadores do CENA-USP: Beatriz Luna, Evandro Magalhães, Thiago Campos, Flávio Lorente. Elton Alves, Luiza Reis. Trabalho e foco na pesquisa sempre.

À amiga Dra. Camila Santos pela oportunidade de me aceitar no estágio docência do PPGG;

Às amigas Rose Caldas, Christiane Lucas e Laís Torres, pelos anos de convivência na sala de estudo 1- IG-PPGG-UFPA;

Aos colegas do Laboratório de Dinâmica Costeira PPGG- Geociências da Universidade Federal do Pará, - Vanessa Castelo, Sérgio Nunes, Sérgio Molano, Bettina Bozi, Fernando Borges e Neuza Freire. Agradecida pela amizade, críticas, sugestões e trocas de conhecimento durante esses anos;

Aos membros do GSED e ao Laboratório de Sedimentologia: Em especial aos amigos Renato Sol, Luiz Saturnino e Walmir Lima, além do querido Prof. Dr. Afonso Nogueira.

Agradeço aos revisores de meus manuscritos pelos comentários construtivos;

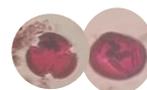
À Biblioteca Raimundo Montalvão e membros. Em especial Lúcia Imbiriba pela grande colaboração e atenção em relação as Normas acadêmicas;

Agradeço aos membros da secretaria do Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geologia nas pessoas de Joanicy Lopes, Cleida Freitas (Jozinha e Cleidoca) e ao coordenador Prof. Dr. Cláudio Nery Lamarão;

No final, agradeço aos meus irmãos e minha mãezinha Edna Ferreira. Em especial aos meus filhos: **Igor e Hannah** Rodrigues. Sem a existência de vocês dois em minha vida, nada, simplesmente nada teria acontecido. É um amor infinito, incondicional que me fortalece e me alimenta a seguir sempre em frente.

*Raízes que serpenteiam em águas das costas americanas
Que agarram lamas nutridas por rios e oceano
Guardando filhos do carbono e protegendo gerações futuras das mazelas
climáticas.*

Érika Rodrigues



RESUMO

Durante o Holoceno a distribuições dos manguezais foi controlada em grande parte pelo clima e flutuações do nível do mar. O clima limitou essas florestas às latitudes 30°N e 28°S. Portanto, em resposta ao aquecimento global no Antropoceno, espera-se que os manguezais migrem para latitudes mais temperadas invadindo áreas úmidas colonizadas por marismas (*Spartina* sp.). O objetivo geral desta Tese é avaliar os efeitos das mudanças climáticas e flutuações do NRM na distribuição dos manguezais americanos ao longo do Holoceno e Antropoceno, baseado em imagens de satélite e drone, fácies sedimentares, diatomáceas, pólen, geoquímica (LOI, XRF, COT, NT, ST, C: N, C: S, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) e datações por ^{210}Pb e ^{14}C . Para isto, foi escolhido um estuário do litoral sul do Espírito Santo como representante dos manguezais tropicais (20°41'S), além de regiões costeiras subtropicais situadas na costa norte (26° 6'S) e sul de Santa Catarina (28°29' S) e litoral da Louisiana (29°09' N). Os resultados desta pesquisa estão apresentados em quatro artigos científicos. O primeiro, (ver, capítulo II) trata sobre os efeitos do aquecimento global no estabelecimento dos manguezais na região costeira da Louisiana (29° 09' N) durante o Holoceno. O segundo artigo científico (ver, capítulo III) mostra a migração dos manguezais para o limite austral desse ecossistema no continente sul-americano, na região de Laguna, de acordo com o aumento nas temperaturas mínimas de inverno no Antropoceno (costa sul de Santa Catarina, 28°29' S). O terceiro manuscrito (ver, capítulo IV) avalia os impactos do aumento do nível do mar nos manguezais tropicais do sudeste brasileiro (costa sul Espírito Santo, 20°41'S) durante o Holoceno e Antropoceno, usando uma abordagem multi-proxy. O quarto artigo científico (ver, capítulo V) aborda o estabelecimento dos manguezais na Baía de São Francisco do Sul (costa norte de Santa Catarina, 26°6'S), em resposta ao aquecimento global nos últimos 1000 anos. Os resultados indicaram uma transgressão marinha na costa sul de Santa Catarina (28°29' S) e litoral da Louisiana (29° 09' N) no Holoceno inicial. Este processo natural converteu ambientes lacustres em lagunas colonizadas por ervas adaptadas a ambiente estuarino. Na costa tropical brasileira o aumento do NRM no Holoceno médio (2-5 m acima do nível atual) foi determinante para o estabelecimento dos manguezais. Este comportamento foi observado em um estuário localizado na costa sul do Espírito Santo (20°41'S) onde uma planície herbácea foi gradualmente substituída por uma laguna cercada por manguezais entre ~6300 anos cal AP e ~4650 anos cal AP. No entanto, entre ~4650 anos cal AP e 2700 anos cal AP a laguna colonizada por manguezais em suas margens foi convertida em uma planície de maré ocupada por ervas,

palmeiras e árvores/arbustos refletindo a redução da influência estuarina no Holoceno tardio, de acordo com a queda do NRM. A partir dos últimos mil anos ocorreu uma diminuição significativa na ocorrência de pólen de manguezal nos sedimentos das planícies de maré do sul do Espírito Santo (390 cal anos AP (1560 DC) e 77 cal anos AP (1873 DC), provavelmente causado por uma queda no NRM associada a Pequena Idade do Gelo (LIA). Estudos paleoclimáticos indicaram flutuações na temperatura durante LIA (380 a 50 anos cal AP) e MCA – Período Quente Medieval (950 a 750 anos cal AP) no Holoceno tardio e consequente mudança na vegetação no sul do Brasil. Estes eventos climáticos provavelmente influenciaram o aparecimento da sucessão de gêneros de manguezais na Baía de São Francisco do Sul (costa norte de Santa Catarina, 26°6' S). Os efeitos da queda e/ou estabilização do nível do mar no Holoceno tardio foram registrados na costa sul catarinense (Laguna, 28°29'S) através da mudança na geomorfologia costeira. Neste mesmo período no litoral de Louisiana (29°09'N), sedimentos arenosos (sedimentos *overwash*) foram depositados nesses estuários refletindo a migração gradual desses sedimentos em direção ao continente provavelmente resultado de eventos de tempestade. As tendências de NRM na costa sul brasileira (Laguna, 28°29'S) e norte americana (litoral da Louisiana, 29°09'N) a partir do Holoceno médio foram as mesmas apresentando condições físico-químicas apropriadas para o desenvolvimento de manguezais, como ocorreu no litoral do Espírito Santo (~6300 anos cal AP) e na Baía de São Francisco do sul (~1500 anos cal AP). Entretanto, não foram registrados grãos de pólen de manguezal nos sedimentos do atual limite austral (Laguna, 28°29'S) e boreal (litoral da Louisiana, 29°09'N) dos manguezais americanos durante o Holoceno. Neste intervalo de tempo ocorreu uma contribuição significativa de matéria orgânica de origem estuarina em planícies de maré ocupadas por *Spartina* sp. Em relação ao aquecimento global e aumento do NRM no Antropoceno um aumento de pólen de manguezal nos testemunhos sedimentares do Espírito Santo (20°40'S) refletiram a migração do mangue para planícies arenosas topograficamente mais elevadas anteriormente dominada por vegetação herbácea. Em relação aos manguezais de Laguna (atual limite austral dos manguezais americanos, 28°29'S), análises de pólen e datações de ¹⁴C e ²¹⁰Pb indicaram que os manguezais foram estabelecidos sob influência estuarina entre ~ 1957 e 1986 DC, representados por árvores de *Laguncularia* sp. Análises espaço temporal com base em imagens de satélite e drone indicaram que os manguezais vêm se expandindo nas últimas décadas com introdução de novos gêneros de mangue. Em nossa área de estudo na Baía de São Francisco do Sul (costa norte de Santa Catarina, 26°6' S), análises palinológicas e datação ¹⁴C revelaram que

os manguezais se estabeleceram em torno de ~ 1500 anos cal AP representados por *Laguncularia* sp. seguido por *Avicennia* sp. (~500 anos cal AP) e *Rhizophora* sp. apenas no último século. Provavelmente, essa sucessão de gêneros de manguezais foi causada por uma tendência de aquecimento na América do Sul durante o Holoceno tardio e as árvores de *Rhizophora* sp. pelo aquecimento durante o Antropoceno. Em relação aos manguezais localizados no litoral da Louisiana registros históricos indicaram a presença de pequenos arbustos de *Avicennia* sp. no início do século XX. Atualmente, estudos de sensoriamento remoto coordenado por Cohen (2021) indicam uma expansão latitudinal de *Avicennia* sp. colonizando áreas que eram anteriormente ocupadas por *Spartina* sp. após duas décadas de invernos quentes. Portanto, os manguezais migraram dos trópicos para zonas temperadas na medida que as temperaturas mínimas de inverno aumentaram durante o Holoceno. No entanto, os manguezais de Laguna e Louisiana (atual limite dos manguezais sul e norte americano) estabeleceram-se apenas no início e meado do século XXI, respectivamente. Tal dinâmica dos manguezais americanos estudados na presente tese foi causada provavelmente pelo aquecimento global natural do Holoceno e intensificado durante o Antropoceno. Esse processo também causou um aumento do nível do mar que resultou na migração dos manguezais de zonas baixas para novas planícies de maré mais elevadas.

Palavras-chave: Aquecimento global. Aumento nível do mar. Manguezais americanos. Palinologia. Holoceno e Antropoceno.

ABSTRACT

During the Holocene, mangrove distributions were primarily controlled by climate change and sea level fluctuations. In particular, low winter temperatures in the subtropical coastal areas limited these ecosystems to expand beyond 30°N and 28°S in the North and South Hemisphere. Therefore, under the continuous warming trend during the Anthropocene, mangroves are expected to migrate to more temperate regions previously occupied by saltmarshes (e.g., *Spartina* sp.). The purpose of this Thesis is evaluate the effects of climate changes and SLR fluctuations on the distribution of American mangroves along the Holocene and Anthropocene, based on satellite and drone images, sedimentary facies, diatoms, pollen, geochemistry (LOI, XRF, TOC, TN, TS, C: N, C: S, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) as well ^{210}Pb and ^{14}C datings. To achieve the aforementioned objectives, studies were conducted on the tropical coast of southeastern Brazil - south of the Espírito Santo State (20°41'S), the subtropical coastal regions located on the north (26°6'S) and south (28°29' S) coast of Santa Catarina, and Louisiana littoral (29° 09' N). The results of this research are presented in four scientific papers. The first one (see, chapter II) deals with the effects of global warming on the establishment of mangroves in the Louisiana littoral (29° 09' N) during the Holocene. The second scientific paper (see, chapter III) shows southward migration of the austral limit mangroves in South America, according to the increase in minimum winter temperatures in the Anthropocene (southern Santa Catarina coast, 28°29' S). The third manuscript (see, chapter IV) assesses the impacts of sea level rise on tropical mangroves in southeastern Brazil (southern Espírito Santo coast, 20°41'S) during the Holocene and Anthropocene, using a multi-proxy approach. The fourth scientific paper (see, chapter V) addresses the establishment of mangroves in the São Francisco do Sul Bay (north Santa Catarina coast, 26° 6'S), in response to global warming in the last 1000 years. The results indicated a marine transgression off the southern coast of Santa Catarina (28°29' S) and the Louisiana littoral (29°09' N) during early Holocene. This natural process converted a lake into lagoons colonized by herbs adapted to an estuarine environment. On the Brazilian tropical coast, the middle Holocene high sea-level stand (2-5 m above the current level) was decisive for the establishment of mangroves. This compartment was observed in an estuary located on the south coast of Espírito Santo (20°41'S) where a herbaceous plain was gradually replaced by a lagoon surrounded by mangroves between ~6300 cal yr BP and ~4650 cal yr BP. However, between ~4650 cal yr BP and 2700 cal yr BP the lagoon colonized by mangroves on its margins was converted to a tidal flat occupied by herbs, palms and trees/shrubs reflecting the reduction of estuarine

influence in the late Holocene, according to with the fall and/or stabilization of the RSL. From the last thousand years there has been a significant decrease in the occurrence of mangrove pollen in the sediments of the tidal flats of southern Espírito Santo (390 cal yr BP (1560 AD) and 77 cal yr BP (1873 AD), probably caused by a RSL fall associated with Little Ice Age (LIA). Paleoclimatic studies have indicated temperature fluctuations during LIA (380 to 50 cal yr BP) and MCA – Medieval Warm Period (950 to 750 cal yr BP) in the late Holocene and consequent change in the Brazil southern vegetation. These climatic events probably influenced the appearance of the mangrove genera succession in the São Francisco do Sul Bay (north Santa Catarina coast, 26°6' S). The effects of the sea level fall and/or stabilization during late Holocene were recorded on the southern coast of Santa Catarina (Laguna, 28° 29 ' S) through changes in coastal geomorphology. In this same period at the Louisiana coastline (29°09 ' N), sandy sediments (*overwash* sediments) were deposited in these estuaries reflecting the gradual migration of these sediments towards land likely a result of storm events. The position of RSL on the southern Brazilian coast (Laguna, 28° 29 ' S) and north american (Louisiana coast, 29° 09 ' N) from the middle Holocene were the same presenting suitable physicochemical conditions for mangrove development, as occurred on the coast of Espírito Santo (~6300 cal yr BP) and São Francisco do Sul Bay (~1500 cal yr BP). However, no mangrove pollen grains were recorded in the sediments of the current austral (Laguna, 28° 29 ' S) and boreal (Louisiana coast, 29° 09 ' N) limit of American mangroves during the Holocene. During this time interval, there was a significant contribution of organic matter of estuarine source in tidal flats occupied by *Spartina* sp. Regarding to global warming and RSL rise during Anthropocene an increase mangrove pollen of Espírito Santo sedimentary cores (20° 40' S) reflected mangrove migration to topographically higher sandy plains previously dominated by herbaceous vegetation. Regarding Laguna mangroves (current southern limit of the American mangroves, 28° 29 ' S), pollen analyzes, ¹⁴C and ²¹⁰Pb datings indicated that the mangroves were established under estuarine influence between ~1957 and 1986 AD, represented by *Laguncularia* sp. trees. Spatio-temporal analyzes based on satellite and drone images indicated that mangroves have been expanding in recent decades with the introduction of new mangrove genera. In our study area in São Francisco do Sul Bay (north coast of Santa Catarina, 26°6' S), palynological analyzes and ¹⁴C dating revealed that mangroves were established around ~ 1500 cal yr BP represented by *Laguncularia* sp. followed by *Avicennia* sp. (~500 cal yr BP) and *Rhizophora* sp. in the last century. This mangrove succession genera were likely caused by a warming trend in South

America during the late Holocene and *Rhizophora* sp. by warming during the Anthropocene. In relation to the mangroves located on the Louisiana littoral, historical records indicated the presence of small shrubs of *Avicennia* sp. at the beginning of the 20th century. Currently, remote sensing studies coordinated by Cohen (2021) indicate a latitudinal expansion of *Avicennia* sp. colonizing areas that were previously occupied by *Spartina* sp. after two decades of warm winters. Therefore, mangroves migrated from the tropics to temperate zones as winter minimum temperatures increased during the Holocene. The Laguna and Louisiana mangroves (currently South and North American mangroves limit) were only established in the early and mid-21st century, respectively. Such dynamics were likely caused by the natural global warming of the Holocene and intensified during the Anthropocene. This process also caused a RSL rise which resulted in the migration of mangrove from lowlands to new higher tidal flats.

Keywords: Global Warming. SL rise. American Mangroves. Palynology. Holocene and Anthropocene.