



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

TESE DE DOUTORADO Nº 156

**TRÊS DÉCADAS DE MUDANÇAS NA PLANÍCIE COSTEIRA
BRASILEIRA: O STATUS DOS MANGUEZAIS, DA
AQUICULTURA E SALICULTURA A PARTIR DE SÉRIES
TEMPORAIS LANDSAT E TÉCNICAS DE APRENDIZADO
DE MÁQUINA**

Tese apresentada por:

CESAR GUERREIRO DINIZ

Orientador: Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (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)

D585t Diniz, Cesar Guerreiro.

Três décadas de mudanças na planície costeira brasileira: O status dos manguezais, da aquicultura e salicultura a partir de séries temporais Landsat e técnicas de aprendizado de máquina / Cesar Guerreiro Diniz. — 2021.

xvi, 92 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho

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

1. Aprendizado de Máquina. 2. Mudança de Uso e Cobertura da Terra. 3. Zona Costeira. 4. Manguezais. 5. Aquicultura e Salicultura. I. Título.

CDD 621.3678



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

**TRÊS DÉCADAS DE MUDANÇAS NA PLANÍCIE COSTEIRA
BRASILEIRA: O STATUS DOS MANGUEZAIS, DA
AQUICULTURA E SALICULTURA A PARTIR DE SÉRIES
TEMPORAIS LANDSAT E TÉCNICAS DE APRENDIZADO
DE MÁQUINA**

Tese apresentada por

CESAR GUERREIRO DINIZ

**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Doutor em Ciências na Área de GEOLOGIA e
Linha de Pesquisa GEOLOGIA MARINHA E COSTEIRA.**

Data de Aprovação: 31 / 03 / 2020

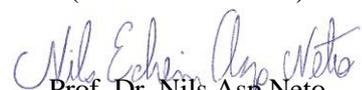
Banca Examinadora:


Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho
(Orientador – UFPA)


Prof. Dr. David Lagomasino
(Membro – Universidade da Carolina do
Leste - ECU)


Prof. Dr. Arnaldo Queiroz da Silva
(Membro – UFPA)


Prof. Dr. Carlos Souza Junior
(Membro – Imazon)


Prof. Dr. Nils Asp Neto
(Membro – UFPA)

“Você provavelmente não mudará o mundo
com seu Mestrado ou Doutorado.
Mas, uma vez que os tenha começado,
termine-os.”
(Cesar Diniz, 2016)

"You probably won't change the World
with your Master's or Doctorate thesis.
But once you've started,
finish them."
(Cesar Diniz, 2016)

AGRADECIMENTOS

A ciência é um eterno exercício de cooperação. O clichê Newtoniano “Se enxerguei mais longe é porque me apoiei em ombros de gigantes” é, de fato, a representação do mecanismo básico de funcionamento de todas as ciências. Assim, deixo aqui meus agradecimentos a um punhado de amigos, professores, técnicos e familiares;

Absolutamente privilegiado, sou filho de dois professores e irmão de mais dois. Claro que todos os pais, mães e irmãos, independentemente de suas formações, são professores por nascimento. Em meu caso, porém, sou cercado de 4 professores de fato. Todos treinados para tal, tendo exercido ou exercendo a profissão em momentos distintos de suas vidas. Minha mãe, é especialista da educação de infantil, meu pai e irmãos, especialistas no treinamento acadêmico-universitário. Eu, portanto, sou um eterno e afortunado aluno, dentro ou fora de casa. Assim, muito obrigado, Pai, Mãe e meus Irmãos.

Deixo um agradecimento ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) e a Biblioteca do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pela infraestrutura, pelo excelente quadro de funcionários e pela conceituada equipe docente. Mais uma vez privilegiado, pude passar boa parte de minha vida acadêmica vinculado a esta que, de longe, é a melhor Universidade do Norte do país.

Não poderia deixar de agradecer as agências nacionais de fomento à pesquisa CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), durante os 48 meses desta empreitada não houve um único mês em que não tenha contado com o apoio de ao menos umas destas duas agências. Juntas estas duas agências representam a esperança por dias melhores ao desenvolvimento científico brasileiro. Essa pesquisa recebeu o suporte dos projetos CNPq-870005/1997-9, 310283/2019-1, 306334/2020-8 e CAPES-001.

Um dos resultados mais inusitados deste doutorado, é, sem dúvida, a consolidação de uma empresa de C&T, lotada no Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá (PCT-Guamá), especializada no uso da inteligência artificial (IA) para descoberta de padrões em imagens orbitais. A Solved – Soluções em Geoinformação, surgiu de um desafio técnico, proposto por Pedro Walfir (Orientador) e Tasso Azevedo (Coordenador da Rede MapBiomias), em busca de soluções inovadoras para o mapeamento dos ambientes costeiros no Brasil. Aos dois, expresso minha gratidão pela confiança na capacidade de solucionar os desafios propostos.

Assim, deixo aqui meus agradecimentos nominais a Luiz Cortinhas, coautor de todas as publicações científicas deste período de doutoramento, além de sócio fundador da empresa.

Agradeço igualmente a Luis Sadeck, Maria Luize, Bruno Haick, Alexandre Filho, Gilberto Nerino e Jhonatans Rodrigues, todos colaboradores Solved. Sem o auxílio prestado por cada um de vocês, este doutorado não teria chegado ao seu fim, tão pouco existiria a nossa empresa.

Por fim, agradeço a Nonata Trévia, pelos mais de 10 anos de companheirismo, amizade e paciência. Ser pesquisador por si só já é um desafio, é muito longa a jornada acadêmica entre graduação, mestrado, doutorado. Além da jornada por si própria, fazer da pesquisa, na Amazônia brasileira, a atividade principal de sustentação de uma empresa de tecnologia, é outro desafio gigantesco. Porém, nenhum destes é maior que o desafio que se iniciou semanas atrás. Poucos dias antes desta defesa, ganhei o maior de meus títulos, o de Pai. Assim, agradeço a meu filho, Gael, e sua mãe, pelos desafios dos próximos capítulos.

RESUMO

Desde a década de 80, o mapeamento de uso e cobertura da terra (LULC) tornou-se uma tarefa científica comum. No entanto, a identificação sistemática e contínua de qualquer uso ou cobertura terrestre, seja em escala global ou regional, exige grande capacidade de armazenamento e processamento. Esta tese apresenta dois fluxos de processamento de dados orbitais, gerenciados por computação em nuvem para avaliar: 1) a extensão anual dos manguezais brasileiros de 1985 a 2018, em conjunto com a criação e avaliação de um novo índice espectral, o Índice Modular de Reconhecimento de Manguezais (MMRI), que foi projetado especificamente para melhor discriminar as florestas de manguezal da vegetação circundante; e 2) a situação anual da aquicultura e da salicultura nas planícies costeiras do Brasil, de 1985 a 2019. No que se refere ao item 1, a cobertura do manguezal apresentou dois períodos de ocupação distintas, 1985-1998 e 1999-2018. O primeiro período mostra uma tendência ascendente, que parece estar mais relacionada à distribuição temporalmente desigual dos dados Landsat do que à regeneração dos manguezais brasileiros. No segundo período, foi registrada uma tendência de perda de área de manguezal, atingindo até 2% das florestas de manguezal. Em uma escala regional, ~ 80% da cobertura de manguezais do Brasil está localizada na Amazônia, nos estados do Maranhão, Pará e Amapá. Em termos de persistência, ~ 75% dos manguezais brasileiros permaneceram inalterados por duas décadas ou mais, em especial na Amazônia. Já no que tange o item 2, faz-se importante lembrar que a aquicultura e a produção de sal, são dois dos mais clássicos usos da terra costeiros em todo o mundo. No Brasil não é diferente, ambos os usos compõem atividade econômica relevante na Zona Costeira Brasileira (BCZ). No entanto, a discriminação automática de tais atividades, dissociando-as de coberturas ou usos outros, igualmente relacionados a presença de água em superfície, não é uma tarefa fácil. Espectralmente falando, água é água e, a menos que apresente uma alta concentração de compostos opticamente ativos, pouco se consegue fazer para dissociar uma variedade de alvos aquosos. Nesse sentido, Redes Neurais Convolucionais (CNN) têm a vantagem de prever o rótulo de determinado pixel, fornecendo como entrada uma região/local (patches ou chips) no entorno desse pixel. Juntas, a natureza convolucional das CNN, bem como a utilização de mecanismos de segmentação semântica, fornecem ao classificador U-Net, um tipo de CNN, a capacidade de acessar o “domínio do contexto” ao em vez de apenas valores de pixel isolados. Apoiados no domínio do contexto, em detrimento ao domínio puramente espectral, os resultados obtidos nesta tese mostram que as aquiculturas/salinas ocupavam ~356 km² em 1985 e ~544 km² em 2019, refletindo uma expansão de 52% (~188 km²), um aumento de 1,5x em 35 anos de ocupação da BCZ. De 1997 a 2015, a área aquícola cresceu por um fator

de ~1.7x, saltando de 349 km² para 583 km², 67% de expansão. Regionalmente, em 2019, o setor Nordeste concentra 93% das superfícies aquícolas/salineiras da BCZ, 6% situa-se no Sudeste e 1% no Sul. Curiosamente, apesar de apresentar extensas zonas costeiras e condições adequadas para o desenvolvimento de diferentes produtos aquícolas, a Amazônia não apresenta sinais relevantes de infraestrutura aquícola/salineira ao longo das 3 décadas analisadas.

Palavras-chave: Manguezais. Aquicultura. Salicultura. Zona Costeira. Aprendizado de Máquina. Random Forest. U-Net. Landsat. Séries Temporais.

ABSTRACT

Since the 1980s, land-use and land-cover (LULC) mapping has become a common scientific task. However, the systematic and continuous identification of any terrestrial use or cover, whether on a global or regional scale, demands large storage and processing capacities. This thesis presents two cloud computing pipelines to analyze: 1) the annual status of Brazilian mangroves from 1985 to 2018, along with a new spectral index, the Modular Mangrove Recognition Index (MMRI), which has been specifically designed to better discriminate mangrove forests from the surrounding vegetation, and 2) the annual status of the aquaculture and salt-culture over the Brazilian coastal plains. The mangrove cover showed two distinct occupation periods, 1985-1998 and 1999-2018. The first period shows an upward trend, which seems to be related more to the uneven distribution of Landsat data than to the regeneration of Brazilian mangroves. In the second period, a mangrove loss trend was registered, reaching up to 2% of the mangrove forest. On a regional scale, ~80% of Brazil's mangrove cover is located in the Amazon, Maranhao, Para, Amapa states. In terms of persistence, ~75% of the Brazilian mangroves remained unchanged for two decades or more, especially in the Brazilian Amazon. As for item 2, aquaculture and salt-culture are two of the most classical coastal land-uses worldwide. It isn't different in Brazil, where both land-uses are related to relevant economic activities in the Brazilian Coastal Zone (BCZ). However, to automatically discriminate such activities from other water-related covers/uses is not an easy task. Spectrally speaking, water is water and, unless it presents a high concentration of optically active compounds, not much can be done to dissociate a variety of water-related targets. In this sense, convolutional neural networks (CNN) have the advantage of predicting a given pixel's label by providing as input a local region (named patches or chips) around that pixel. Both the convolutional nature and the semantic segmentation capability allow the U-Net classifier, a type of CNN, to access the "context domain" instead of solely isolated pixel values. Backed by the context domain, the results obtained show that the BCZ aquaculture/saline ponds occupied ~356 km² in 1985 and ~544 km² in 2019, reflecting an area expansion of 52% (~185 km²), a rise of 1.5x in 35 years. From 1997 to 2015, the saline/aquaculture area grew by a factor of ~ 1.7, jumping from 349 km² to 583 km², a 67% increase. In 2019, the northeast sector concentrated 93% of the coastal aquaculture/salt-culture surface, 6% in Southeast and 1% in South. Interestingly, despite presenting extensive coastal zones and suitable conditions for developing different aquaculture products, the Amazon coast shows no relevant aquaculture infrastructure sign.

Keywords: Mangroves. Aquaculture. Salt-culture. Coastal Zone. Machine Learning. Random Forest. U-Net. Landsat. Time Series.



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
CESAR GUERREIRO DINIZ

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **CESAR GUERREIRO DINIZ** orientando do Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA), composta pelos professores doutores David Lagomasino – ECU/NASA, Carlos Souza Junior - Imazon, Arnaldo Queiroz da Silva – UFPA e Nils E. Asp Neto - UFPA, após apresentação da sua tese intitulada **“TRÊS DÉCADAS DE MUDANÇAS NA PLANÍCIE COSTEIRA BRASILEIRA: O STATUS DOS MANGUEZAIS, DA AQUICULTURA E SALICULTURA A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS LANDSAT E TÉCNICAS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA”**, emite o seguinte parecer:

A banca examinadora reconhece a importante contribuição do trabalho para o mapeamento de manguezais, aquicultura e salicultura utilizando séries temporais de dados Landsat, algoritmos de aprendizagem de máquina e de aprendizagem profunda (*Deep Learning*) em computação em nuvem. O estudo traz um novo índice espectral para o mapeamento de manguezais. Essas contribuições já foram publicadas em periódicos especializados.

A banca recomenda que a tese destaque nas conclusões a relevância científica dos resultados deste estudo e suas potenciais aplicações na área ambiental e no sensoriamento remoto. Recomenda-se incluir também uma melhor contextualização dos processos geológicos e oceanográficos em escala continental e global.

Finalmente, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado.

Belém, 31 de março de 2021.

Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho
(Orientador – UFPA)

Prof. Dr. David Lagomasino
(Membro externo – East Carolina University/NASA)

Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva
(Membro externo-UFPA)

Prof. Dr. Carlos Souza Junior
(Membro externo-Imazon)

Prof. Dr. Nils E. Asp Neto
(Membro interno-UFPA)