



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

TESE DE DOUTORADO Nº 180

**CARTOGRAFIA DO RELEVO TERRESTRE EM
ÁREAS FLORESTAIS, POR RADAR EM BANDA P:
AVALIAÇÃO, MELHORAMENTO E APLICAÇÃO À
AMAZÔNIA**

Tese apresentada por:

CARLOS RODRIGO TANAJURA CALDEIRA
Orientador: Prof. Dr. Laurent Polidori (UFPA)

**BELÉM - PARÁ
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)

C146c Caldeira, Carlos Rodrigo Tanajura.

Cartografia do relevo terrestre em áreas florestais, por radar em banda P: avaliação, melhoramento e aplicação à Amazônia / Carlos Rodrigo Tanajura Caldeira. — 2024.

xx, 139 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Laurent Polidori

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2024.

1. Modelos digitais de elevação. 2. Qualidade. 3. Precisão. 4. Radar. I. Título.

CDD 550.2462



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

CARTOGRAFIA DO RELEVO TERRESTRE EM ÁREAS FLORESTAIS, POR RADAR EM BANDA P: AVALIAÇÃO, MELHORAMENTO E APLICAÇÃO À AMAZÔNIA


Tese apresentada por

CARLOS RODRIGO TANAJURA CALDEIRA

Como requisito parcial a obtenção do Grau de Doutor em Ciências na área de GEOLOGIA, Linha de pesquisa em GEOLOGIA MARINHA E COSTEIRA.


Data da Aprovação: 30 / 09 / 2024

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Laurent Polidori
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **PEDRO WALDIR MARTINS E SOUZA FILHO**
Data: 30/09/2024 14:39:08-0300
Verifique em <http://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e S. Filho
(Membro – UFPA)

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI**
Data: 02/10/2024 12:16:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antônio Maria Garcia Tommaselli
(Membro – UNESP)


Prof. Dr. Yosio Edemir Shimabukuro
(Membro – INPE)

Assinado por: **Joaquim João Moreira de Sousa**
Num. de Identificação: 10331586
Data: 2024.10.01 16:30:34+01'00'

Prof. Dr. Joaquim João Moreira de Sousa
(Membro – UTAD)

Dedico esta tese a Deus, pela força e sabedoria concedidas em cada etapa desta jornada. À minha esposa, por sua paciência, compreensão e apoio inabalável, que foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente. E à minha filha, cuja alegria e inocência me inspiram a ser uma pessoa melhor todos os dias. À minha família, pelo amor incondicional e pelo suporte constante. Sem vocês, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela força, sabedoria e resiliência concedidas ao longo desta jornada. Sua presença constante iluminou meu caminho e me guiou em cada passo, tornando possível a conclusão deste trabalho.

À minha amada esposa, Mayara Cobacho Ortega Caldeira, a mulher que me completa e me fortalece em todos os momentos, e à minha querida filha, Clara Ortega Caldeira, dedico minha mais profunda gratidão. Mayara, você é a essência que movimenta minha engrenagem, a fonte inesgotável de apoio e amor. Sua paciência, compreensão e encorajamento inabalável foram fundamentais para que eu pudesse enfrentar os desafios e adversidades desta trajetória e de todas que vivemos juntos, você é o anjo que guia minha vida é minha fonte de energia quando preciso me recarregar, sempre e para todo o sempre, obrigado por tudo. Clara, sua chegada durante esta jornada trouxe uma nova dimensão de alegria e propósito, revitalizando meu espírito e renovando minha determinação, a cada dia triste basta um sorriso seu para transformar tudo em alegria novamente. Vocês duas são minha maior inspiração e motivação, e sem vocês, nada disso seria possível.

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, Roseli Tanajura Borges Caldeira, cujo amor e sacrifício construíram a base sobre a qual me apoiei. Ao meu pai, Carlos Alberto Marques Caldeira (*in memoriam*), cuja memória permanece viva como uma fonte de força e inspiração. Às minhas irmãs Marielle e Daniela, cunhado Rondinelli e sobrinho Pedro, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio e encorajamento. Agradeço também ao meu sogro Joaquim, sogra Marly, cunhada Priscila, cunhado Luciano e sobrinha Cecília, que, ao entrarem em minha vida, se tornaram parte essencial deste alicerce de amor e solidariedade.

Expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Laurent Polidori, cuja orientação transcendeu os limites acadêmicos e se transformou em uma amizade sólida. Sua paciência, sabedoria e orientação foram inestimáveis, moldando este trabalho de maneira profunda. Agradeço igualmente ao meu amigo e colaborador, Mhamad El Hage, que frequentemente atuou como coorientador, oferecendo *insights* valiosos e apoio contínuo.

Aos amigos, agradeço a toda força e palavra amiga, a todo momento de descontração que fez alimentar ainda mais a sabedoria da vida. Seriam muitos a citar neste momento, mas de forma especial os que estiveram ao meu lado nesta jornada em particular, Alan Salomão, com

toda sua expertise e sabedoria, Leandro e Isadora Passos, assim como o “Guto” e o “Toninho” nos alimentando com seus sorrisos e diversões, Wallace e Rosane, com todo apoio e partilha, meu muito obrigado. E a todos os amigos, tanto dentro quanto fora da UFRA, cujo apoio e camaradagem foram pilares de força durante esta jornada. Suas palavras de encorajamento e sua presença constante foram essenciais para a realização deste sonho.

Aos meus alunos, que compartilharam comigo as dificuldades e conquistas ao longo do percurso acadêmico, meu sincero reconhecimento. Vocês contribuíram significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e S. Filho (UFPA), Prof. Dr. Antônio Maria Garcia Tommaselli (UNESP), Prof. Dr. Yosio Edemir Shimabukuro (INPE), e Prof. Dr. Joaquim João Moreira de Sousa (UTAD), pela inestimável contribuição ao desenvolvimento desta tese. Suas valiosas observações, sugestões e encorajamento são fundamentais para o aprimoramento deste trabalho, e estou imensamente grato pelo tempo e dedicação que cada um de vocês dedicou a este processo. Suas contribuições enriqueceram significativamente a qualidade da pesquisa e o alcance dos resultados obtidos.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) por todo o apoio e oportunidade proporcionados durante a realização deste doutorado. Agradeço, também, à secretaria do programa, em especial a secretária Cleida por toda paciência e dedicação, à biblioteca do instituto e aos docentes do programa, cujo suporte foi indispensável para o desenvolvimento deste trabalho. Estendo meus sinceros agradecimentos à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) pelo apoio contínuo ao longo do doutorado, e à coordenação do curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da UFRA por todo o suporte oferecido.

Agradeço também a Secretaria de Meio Ambiente – SEMA/AP pela disponibilização, de forma gratuita, dos dados altimétricos da área de estudo, das bandas X e P. Os dados LiDAR foram financiados pelo Fundo Amazônia, e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais através do Prof. Dr. Eric Bastos Gorgens, onde também deixo meus profundos agradecimentos e parceria.

Para finalizar, deixo uma reflexão que sintetiza o árduo caminho percorrido: "O suor e o sacrifício são os alicerces sobre os quais se erguem as grandes conquistas." Agradeço a todos que fizeram parte desta jornada.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano”

(Isaac Newton)

RESUMO

A obtenção de Modelos Digitais de Terreno (MDT) precisos em áreas de floresta densa, como a Amazônia, é um desafio para diversas aplicações em geociências. A interferometria de radar de banda P, com sua capacidade de penetração na vegetação, surge como uma ferramenta promissora para superar as limitações de outras técnicas, como o LiDAR (*Light Detection And Ranging*), que, embora preciso, apresenta custos elevados para mapeamento em larga escala. Este estudo avaliou a qualidade de MDT gerados por radar de banda P na Amazônia, utilizando dados LiDAR como referência e aplicando diversos critérios de análise. Foram realizadas comparações visuais e análises quantitativas de elevação e declividade, revelando uma alta similaridade entre os dois produtos. O MDT de radar de banda P apresentou um erro médio de elevação de $-0,52$ m e um erro médio de declividade de -4° , com desvios padrão e RMSE (*Root Mean Square Error*) abaixo de 3 metros para elevação e $6,14^\circ$ para declividade. A pesquisa também investigou o realismo hidrográfico do MDT, analisando depressões ao longo de cursos d'água e a aderência à lei de Horton, bem como, o impacto das propriedades da paisagem, como inclinação e aspecto, na precisão do modelo. Além disso, o estudo comparou o MDT de radar de banda P com outros MDE (Modelos Digitais de Elevação) disponíveis, como Copdem (*Copernicus Digital Elevation Model*), Fabledem (*Forest and buildings removed Copernicus DEM*) e SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), bem como um MDE derivado de dados aéreos em banda X, demonstrando os riscos de utilizar comprimentos de onda curtos para representar o terreno em áreas florestais, especialmente em relação à representação da declividade em diferentes escalas de resolução. Os resultados deste estudo multicritério comprovam a adequação da interferometria de radar de banda P aerotransportado para a modelagem da elevação digital em ambientes de floresta tropical densa, oferecendo uma alternativa promissora para o mapeamento do relevo em áreas onde a vegetação limita a aplicação de outras técnicas. A utilização de radares de banda P abre novas perspectivas para o estudo e monitoramento do terreno em regiões de floresta densa, com implicações significativas para diversas áreas, como hidrologia, geomorfologia, planejamento ambiental e gestão de recursos naturais.

Palavras-chave: modelos digitais de elevação; qualidade; precisão; radar.

ABSTRACT

Obtaining accurate Digital Terrain Models (DTM) in dense forest areas, such as the Amazon, is a challenge for various applications in geosciences. P-band radar interferometry, with its vegetation penetration capability, emerges as a promising tool to overcome the limitations of other techniques, such as LiDAR (Light Detection and Ranging), which, although precise, presents high costs for large-scale mapping. This study evaluated the quality of DTMs generated by P-band radar in the Amazon, using LiDAR data as a reference and applying various analysis criteria. Visual comparisons and quantitative analyses of elevation and slope were conducted, revealing a high similarity between the two products. The P-band radar DTM showed a mean elevation error of -0.52 m and a mean slope error of -4° , with standard deviations and RMSE (Root Mean Square Error) below 3 meters for elevation and 6.14° for slope. The research also investigated the hydrographic realism of the DTM by analyzing depressions along watercourses and adherence to Horton's law, as well as the impact of landscape properties such as slope and aspect on model accuracy. Additionally, the study compared the P-band radar DTM with other available DEMs (Digital Elevation Models), such as Copernicus, Fbdem and SRTM, as well as a DEM derived from X-band airborne data, demonstrating the risks of using short wavelengths to represent the terrain in forested areas, especially regarding slope representation at different resolution scales. The results of this multicriteria study confirm the suitability of airborne P-band radar interferometry for digital elevation modeling in dense tropical forest environments, offering a promising alternative for terrain mapping in areas where vegetation limits the application of other techniques. The use of P-band radars opens new perspectives for the study and monitoring of terrain in dense forest regions, with significant implications for various fields such as hydrology, geomorphology, environmental planning, and natural resource management.

Keywords: digital elevation models; quality; accuracy; radar.



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 CARLOS RODRIGO TANAJURA CALDEIRA

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **CARLOS RODRIGO TANAJURA CALDEIRA** orientando do Prof. Dr. Laurent Polidori (UFPA) e composta pelos professores doutores Joaquim João Moreira de Sousa (UTAD - Portugal), Antonio Maria Garcia Tommaselli (UNESP), Yosio Edemir Shimabukuro (INPE) e Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA) após apresentação da sua tese intitulada “**CARTOGRAFIA DO RELEVO TERRESTRE EM ÁREAS FLORESTAIS POR RADAR EM BANDA P: AVALIAÇÃO, MELHORAMENTO E APLICAÇÃO À AMAZÔNIA**”, emite o seguinte parecer:

Após avaliação detalhada da defesa de tese, considera-se que o candidato demonstrou excelência em diversos aspectos fundamentais para o grau acadêmico em questão. A apresentação foi clara, bem estruturada e respeitou integralmente o tempo disponível, refletindo uma profunda compreensão do tema e uma capacidade notável de comunicação científica. Além disso, o candidato evidenciou uma preparação sólida para discutir as questões levantadas durante a sessão, respondendo de forma objetiva e fundamentada, demonstrando um domínio completo do tema abordado. Importa salientar que, no decorrer do seu percurso acadêmico, o candidato publicou três artigos como primeiro autor, sendo dois em periódicos de relevância internacional e um regional, o que atesta a originalidade do trabalho realizado, bem como sua contribuição significativa para o tema. Além disso, publicou outros dois artigos como coautor na área da tese desenvolvida com seu orientador.

Em face da qualidade do trabalho apresentado, da capacidade demonstrada na defesa e dos resultados científicos obtidos, consideramos, por unanimidade, que o candidato merece a **aprovação com distinção**.

Belém, 30 de setembro de 2024


Prof. Dr. Laurent Polidori (Orientador-UFPA)

Prof. Dr. Joaquim João Moreira de Sousa (UTAD- Portugal) assinado por: Joaquim João Moreira de Sousa

Num. de Identificação: 10331586
Data: 2024.10.01 16:30:34+01'00'

Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli (UNESP)



Documento assinado digitalmente
ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI
Data: 02/10/2024 12:16:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Yosio Edemir Shimabukuro (INPE)

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



Documento assinado digitalmente
PEDRO WALFIR MARTINS E SOUZA FILHO
Data: 30/09/2024 14:39:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>