



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

TESE DE DOUTORADO N° 170

**MUDANÇAS DA COBERTURA, USO DO SOLO E
PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM MINAS A CÉU
ABERTO NA AUSTRÁLIA E NO BRASIL: UM INDICADOR
DE INTENSIDADE DE EXPLOTAÇÃO MINERAL**

Tese apresentada por:

DIOGO CORRÊA SANTOS

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

**BELÉM - PARÁ
2023**

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)

S237m Santos, Diogo Corrêa.
Mudanças da cobertura, uso do solo e produção de minério de ferro em minas a céu aberto na Austrália e no Brasil: : um indicador de intensidade de exploração mineral / Diogo Corrêa Santos. — 2023.
xiii, 106 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, 2023.

1. Minério de ferro. 2. Sensoriamento remoto. 3. MCUS.
4. GEOBIA. 5. Imagens de satélite. I. Título.

CDD 621.3678



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

**MUDANÇAS DA COBERTURA, USO DA TERRA E
PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM MINAS A CÉU
ABERTO NA AUSTRÁLIA E NO BRASIL: UM INDICADOR
DE INTENSIDADE DE EXPLOTAÇÃO MINERAL**

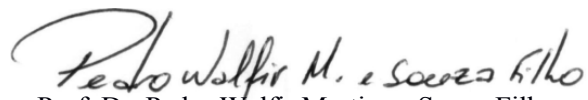
Tese apresentada por


DIOGO CORRÊA SANTOS

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

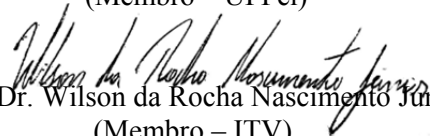
Data de Aprovação: 26 / 05 / 2023

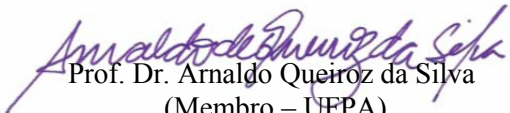
Banca Examinadora:


Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho
(Orientador – UPPA/ITV)


Prof. Dr. Alvaro Penteado Crosta
(Membro – UNICAMP)


Prof. Dr. Felipe de Lucia Lobo
(Membro – UFPel)


Prof. Dr. Wilson da Rocha Nascimento Junior
(Membro – ITV)


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

“A Deus, aos meus pais
Santos e Célia,
aos meus
irmãos Leonardo e Leopoldo
e a minha esposa Bruna.”

AGRADECIMENTOS

Desenvolver uma tese de doutorado é um trabalho bastante árduo e que sozinho é praticamente impossível de finalizá-lo. Sendo assim, deixo aqui meus agradecimentos aqueles que sempre estiveram do meu lado nessa trajetória, nos momentos difíceis e alegres. Em particular aquele que nunca me abandonou e que sempre me guiou e me inspirou. Obrigado Deus, principalmente pelo dom da sabedoria e da inteligência que me permitiu chegar no mais alto grau acadêmico, lugar onde nunca imaginei alcançar.

Sou filho da Dona Célia e do Seu Santos, ambos sem curso superior, porém sempre se despojaram para dar o melhor para que eu e meus irmão estudássemos e nos formássemos. Graças aos meus pais e meu esforço cheguei a uma universidade pública e me formei. Lembro que meu pai muitas das vezes deixou de ir trabalhar (de ônibus) e guardava o dinheiro, para que assim eu conseguisse chegar na universidade com esse próprio dinheiro. Minha mãe também pedia dinheiro emprestado na vizinha para eu poder me alimentar, pois eu passava o dia inteiro na Universidade. Ou seja, até hoje costumo dizer que meu diploma de graduação em Geologia, embora tenha o meu nome, também pertence a Dona Célia e ao Seu Santos que são minhas fortalezas, pois sem vocês tenho certeza que eu não conseguiria. Portanto, minha gratidão eterna aos meus pais que lá atrás me ajudaram a dar os primeiros passos e que sempre me apoiaram na minha trajetória acadêmica. Aproveitando o ensejo agradeço também aos meus irmãos Leonardo Santos e Leopoldo Santos por serem meus melhores amigos e que sempre torceram pelas minhas vitórias. Agradeço por me darem três presentes que agora fazem parte da minha vida e que amo, minhas sobrinhas Carol, Yasmin e Ísis.

Um agradecimento especial ao meu orientador e amigo Pedro Walfir, pelos ensinamentos e aprendizados não só acadêmico, mas também de vida. E obrigado por me aturar desde o TCC (risos), pela confiança no meu trabalho, e por ser uma inspiração não só para mim, mas também para todas as pessoas que o cercam.

Continuando, agradeço ao Instituto Tecnológico Vale (ITV) que me acolheu dando-me oportunidade de trabalho, infraestrutura e suporte financeiro. A Universidade Federal do Pará (UFPA) e o Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) pela oportunidade de ingresso e de usufruir de um programa de excelência na Amazônia, de conceito CAPES 7.

Agradeço aos amigos que sempre estiveram comigo na minha trajetória acadêmica compartilhando momentos de descontração e conhecimento. Em especial aos da minha turma de graduação em Geologia (2005) que alguns viraram até padrinhos do meu casamento: João Neto, Jeremias, Patrick, Eduardo e Fabrício. Ao amigo Wilson Junior (comandante), parceiro de longa data, que sempre me auxiliou com seus conhecimentos em geotecnologias e que divide

comigo uma grandiosa amizade, sincera e divertida. E aos amigos do LAIT/ITV Arthur Gustavo, João Paulo e Vânia, pelo pronto suporte quando precisei de algo no desenvolvimento da minha tese.

Um agradecimento especial a minha amada esposa Bruna Gomes Ribeiro Santos, que sempre apoiou e apoia meus projetos profissionais e que foi de fundamental importância para que eu desenvolvesse esta tese de forma relativamente mais branda. Além de compartilhar sua amizade e companheirismo em todos os momentos de nossas vidas. Te amo! Estendo este agradecimento, a toda família Gomes/Ribeiro que estiveram ao meu lado e de minha esposa nessa trajetória, dividindo momentos alegres e descontraídos, que indiretamente me incentivaram para a conclusão desta tese.

Dedico esta tese *in memória* a minha cunhada Brena Gomes Ribeiro, que foi uma das vítimas da pandemia de Covid-19 e que antes de sua partida, e em uma de nossas conversas, tinha como um de seus objetivos alcançar um título de doutorado. Agradeço a Deus por ter conhecido uma menina tão inteligente que foi professora, sempre prezou pela educação e pelo conhecimento científico. Conhecimento este que poderia ter salvado sua vida caso não fosse tão negligenciado pelas autoridades governamentais neste período.

Por fim, agradeço a todos que participaram direta ou indiretamente da realização deste trabalho e já adianto minhas desculpas pelos que aqui não foram citados por mero esquecimento, mas que com certeza foram importantes para a finalização desta Tese.

RESUMO

O minério de ferro é um recurso de suma importância para o desenvolvimento de uma nação. Com o avanço tecnológico, industrial e urbano, principalmente dos países asiáticos, a demanda por este recurso vem aumentando consideravelmente nas últimas décadas. Consequentemente, mudanças da cobertura e uso do solo (MCUS) vem ocorrendo nas áreas mineradas dos países com maior produção de minério. A Austrália e o Brasil são os maiores produtores de minério de ferro no mundo. Em 2019, alcançaram a produção de 930 milhões de toneladas (mt) e 480 mt, respectivamente. Entretanto, pouco se sabe sobre a extensão do uso do solo necessário para exploração de minério de ferro na escala das minas a céu aberto produtivas nesses dois países. Diante disso, esta tese de doutorado teve como objetivos (1) mapear as MCUS no tempo e no espaço em áreas de mineração de ferro nos países dois com maior produção do mundo; (2) estimar a área utilizada para exploração de minério de ferro, assim como a produção de minério acumulada desde a década de 1980 até 2019; e (3) determinar um indicador de intensidade de exploração mineral, representado pela produção de minério em milhões de toneladas por quilômetro quadrado (mt/km^2) para as principais minas de ferro da Austrália e do Brasil. Para este fim, imagens de satélite Landsat 5 TM (1984 e 1986) e Sentinel-2B (2019) foram processadas para mapear as MCUS em áreas de minas de ferro a céu aberto na região de Pilbara na Austrália Ocidental província mineral de Hamersley e na região de Carajás (PA), Corumbá (MS) e Quadrilátero Ferrífero – QF (MG) no Brasil, a partir da técnica de Análise de Imagens Baseado em Objetos Geográficos (GEOBIA). Os valores de produção de minério de ferro por área minerada foram extraídos dos anuários estatísticos da produção mineral dos dois países. Os resultados mostraram que a mineração de ferro na Austrália em 1986 ocupava uma área de $41,45 \text{ km}^2$ e foi expandida para $875,06 \text{ km}^2$ até 2019. No Brasil em 1984 a extensão da mineração de ferro era de $109,53 \text{ km}^2$ e se estendeu para $295,75 \text{ km}^2$ em 2019. A Acurácia global e o índice kappa do conjunto das imagens classificadas ficaram acima de 90%, indicando a ótima qualidade do mapeamento. Os dados de produção de minério de ferro acumulado entre os anos de 1984 a 2019 mostraram que a Austrália alcançou a produção total de 8.4 bilhões de toneladas de minério de ferro neste período, em uma área minerada de $875,06 \text{ km}^2$, o equivalente a $9.7 \text{ mt}/\text{km}^2$. Enquanto o Brasil atingiu a produção total de 7.03 bilhões de toneladas em uma área de $297,75 \text{ km}^2$. O Indicador de intensidade de exploração mineral mostrou que o Brasil e a Austrália produziram o equivalente a $23.6 \text{ mt}/\text{km}^2$ e $9.7 \text{ mt}/\text{km}^2$, respectivamente ao longo do período estudado. O estudo concluiu que (1) a área de solo minerado cresceu em todas as minas nos dois países analisados entre 1984 e 2019, sendo que a maior expansão foi detectada na Austrália; (2) a alta produção de minério de ferro na Austrália

e no Brasil e as consequentes MCUSs são impulsionadas pela alta demanda dos países asiáticos com destaque para a China; e (3) o indicador de intensidade de exploração mineral mostrou que as minas de ferro do Brasil apresentaram a melhor relação entre produção mineral vs. área minerada em comparação à Austrália. Esta relação permite afirmar que os dois países alcançaram um patamar de produção extremamente alto em uma área proporcionalmente diminuta, em especial no Brasil. Por fim, esta tese de doutorado contribuiu para quantificar a extensão das áreas das minas de ferro, compreender a intensidade da produção deste minério e as consequentes MCUS nestes dois países.

Palavras-chave: minério de ferro; sensoriamento remoto; mina a céu aberto; produção; exploração; MCUS; GEOBIA; Imagens de satélite.

ABSTRACT

Iron ore is a very important resource for the development of a nation. With technological, industrial and urban advances, especially in Asian countries, the demand for this resource has increased considerably in recent decades. Consequently, changes in land cover and use (LCLU) have occurred in the mined areas of countries with higher ore production. Australia and Brazil are the largest iron ore producers in the world. In 2019, they reached production amounts of 930 million tons (mt) and 480 mt, respectively. However, little is known about the extent of land required for iron ore exploitation at the scale of productive open-pit mines in these two countries. Therefore, this doctoral thesis aimed to (1) map the LCLU in time and space in iron mining areas in the countries with the highest production in the world; (2) estimate the area used for iron ore exploitation as well as the accumulated ore production from the 1980s to 2019; and (3) identify an indicator of mineral exploitation intensity and ore production in millions of tons per square kilometer (mt/km^2) for the main iron mines in Australia and Brazil. Landsat 5 TM (1984 and 1986) and Sentinel-2B (2019) satellite images were processed to map LCLU in areas of open cast iron mines in the Pilbara region of Western Australia, Hamersley mineral province and in the regions of Carajás (PA), Corumbá (MS) and Quadrilátero Ferrífero, QF, (MG) in Brazil, using geographic object-based image analysis (GEOBIA). The values of iron ore production per mined area were extracted from the statistical yearbooks of mineral production in the two countries. The results showed that iron mining in Australia occupied an area of 41.45 km^2 in 1986 and was expanded to 875.06 km^2 by 2019. In Brazil, the extent of iron mining was 109.53 km^2 in 1984, and this area expanded to 295.75 km^2 in 2019. The overall accuracy and kappa index of the set of classified images were above 90%, indicating the excellent quality of the classification. The accumulated iron ore production data between 1984 and 2019 showed that Australia reached a total production of 8.4 billion tons of iron ore in this period in a mined area of 875.06 km^2 , equivalent to $9.7 \text{ mt}/\text{km}^2$. Brazil reached a total production of 7.03 billion tons in an area of 297.75 km^2 . The mineral exploitation intensity indicator showed that Brazil and Australia produced equivalents of $23.6 \text{ mt}/\text{km}^2$ and $9.7 \text{ mt}/\text{km}^2$, respectively, over the study period. The study concluded that (1) the area of mined soil increased in all the mines in the two countries analyzed between 1984 and 2019, with the largest expansion being detected in Australia; (2) the high production of iron ore in Australia and Brazil and the consequent LCLU changes are driven by high demand from Asian countries, especially China; and (3) according to the mineral exploitation intensity indicator, there was a better relationship between mineral production and mined area in Brazil than in Australia. This result allows us to confirm that the two countries, especially Brazil, reached extremely high levels of

production in a proportionately small area. Finally, this doctoral thesis contributed to the understanding of the intensity of iron ore production and the consequent LCLU changes in these two countries in addition to contributing quantitative and specialized data on the extents of the main iron ore mines globally.

Key words: iron ore; remote sensing; open-pit mine; production; exploitation; LCLU; GEOBIA; satellite image.



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 DIOGO CORRÊA SANTOS

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **DIOGO CORRÊA SANTOS** orientando do Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho, composta pelos professores doutores Álvaro Penteadó Crósta (UNICAMP), Felipe de Lucia Lobo (UFPel), Wilson da Rocha Nascimento Júnior (ITV) e Arnaldo de Queiroz da Silva (UFPA), após apresentação da sua tese intitulada “**MUDANÇAS DA COBERTURA, USO DO SOLO E PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM MINAS A CÉU ABERTO NA AUSTRÁLIA E NO BRASIL: UM INDICADOR DE INTENSIDADE DE EXPLOTAÇÃO MINERAL**”, 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 dois artigos submetidos a periódicos de impacto internacional. Dessa forma, todos os artigos atendem às exigências básicas para uma tese de doutorado.

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

Belém, 26 de maio de 2023

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

Prof. Dr. Álvaro Penteadó Crósta (Membro – UNICAMP)

Prof. Dr. Felipe de Lucia Lobo (Membro – UFPel)

Dr. Wilson da Rocha Nascimento Júnior (Membro – ITV)

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