

## Geoinformação e Sensoriamento Remoto em Geografia

# Monitoramento da biomassa lenhosa por índices de vegetação em áreas de produção de carvão, distrito de Mabalane-Moçambique

Monitoring of woody biomass by vegetation indices in charcoal production areas, Mabalane district, Mozambique

Monitoreo de la biomasa leñosa mediante índices de vegetación en áreas de producción de carbón vegetal, distrito de Mabalane, Mozambique

Idolgy Ribeiro dos Santos Mabunda<sup>I</sup> , Laurindo António Guasselli<sup>II</sup> 

<sup>I</sup>Universidade Save , Chongoene, GZ, Moçambique

<sup>II</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul , Porto Alegre, RS, Brasil

## RESUMO

O distrito de Mabalane ainda possui uma quantidade considerável de recurso biológico, produzindo a maior parte do carvão vegetal que alimenta os maiores centros urbanos das províncias de Maputo, Gaza e Inhambane. O monitoramento da biomassa em áreas de produção de carvão é essencial para garantir a sustentabilidade e a recuperação ambiental dessas regiões. Esse trabalho tem como objetivo aplicar índices de vegetação (IV's) no monitoramento da biomassa lenhosa em áreas de produção de carvão vegetal no distrito de Mabalane-Moçambique. Foram utilizadas imagens de satélite Landsat 5 de 2008 e Landsat 8 de 2020, e calculados os índices de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index). No campo foram alocadas 45 parcelas de 30x30 m, e registado o DAP  $\geq 2,5$  cm. A biomassa foi estimada usando a equação de Sevens. Para determinar o melhor índice de vegetação (IV) para monitoramento da biomassa, foi utilizado o método de mínimos quadrados de correlação de Person, considerando a biomassa como variável dependente, e os valores de IV's como variáveis independentes. O melhor índice foi determinado com base no maior valor de coeficiente de correlação e no coeficiente de determinação. Os resultados mostraram que a biomassa estimada variou entre 5,13 e 28,58 t/ha. Os valores de NDVI e SAVI de 2008 foram maiores, e os de EVI menores. A melhor correlação foi observada entre a biomassa estimada pela equação de Sevens e o NDVI de 2008.

**Palavras-chave:** Semi-árido; NDVI; SAVI; EVI; Sustentabilidade; África

## ABSTRACT

The Mabalane district still has a considerable amount of biological resources, producing most of the charcoal that feeds the largest urban centers in the provinces of Maputo, Gaza and Inhambane. Monitoring biomass in charcoal production areas is essential to ensure the sustainability and environmental recovery of these regions. This work aims to apply vegetation indices (VIs) in the monitoring of woody biomass in charcoal production areas in the Mabalane district, Mozambique. Satellite images from Landsat 5 from 2008 and Landsat 8 from 2020 were used, and the vegetation indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) and EVI (Enhanced Vegetation Index) were calculated. In the field, 45 plots of 30x30 m were allocated, and the DBH  $\geq$  2.5 cm was recorded. Biomass was estimated using the Sevene equation. To determine the best vegetation index (VI) for biomass monitoring, the Person least squares correlation method was used, considering biomass as the dependent variable and the IV values as independent variables. The best index was determined based on the highest correlation coefficient and determination coefficient. The results showed that the estimated biomass ranged from 5.13 to 28.58 t/ha. The NDVI and SAVI values for 2008 were higher, and the EVI values were lower. The best correlation was observed between the biomass estimated by the Sevene equation and the NDVI for 2008.

**Keywords:** Semi-arid; NDVI; SAVI; EVI; Sustainability; Africa

## RESUMEN

El distrito de Mabalane aún posee una cantidad considerable de recursos biológicos y produce la mayor parte del carbón vegetal que alimenta a los mayores centros urbanos de las provincias de Maputo, Gaza e Inhambane. El monitoreo de la biomasa en las zonas de producción de carbón es esencial para garantizar la sostenibilidad y la recuperación ambiental de estas regiones. Este trabajo tiene como objetivo aplicar índices de vegetación (IV) en el monitoreo de la biomasa leñosa en áreas de producción de carbón en el distrito de Mabalane, Mozambique. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 del 2008 y Landsat 8 del 2020 y se calcularon los índices de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) y EVI (Enhanced Vegetation Index). En campo se asignaron 45 parcelas de 30x30 m y se registró el DBH  $\geq$  2,5 cm. La biomasa se estimó utilizando la ecuación de Sevene. Para determinar el mejor índice de vegetación (IV) para el monitoreo de biomasa, se utilizó el método de mínimos cuadrados de correlación de Person, considerando la biomasa como variable dependiente y los valores de IV como variables independientes. El mejor índice se determinó con base en el valor más alto del coeficiente de correlación y del coeficiente de determinación. Los resultados mostraron que la biomasa estimada varió entre 5,13 y 28,58 t/ha. Los valores NDVI y SAVI de 2008 fueron más altos y los valores EVI fueron más bajos. La mejor correlación se observó entre la biomasa estimada mediante la ecuación de Sevene y el NDVI de 2008.

**Palabras clave:** Semiárido; NDVI; SAVI; EVI; Sostenibilidad; África

## 1 INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é uma das principais fontes de energia em vários países africanos. Além disso, desempenha um papel fundamental na subsistência das

populações rurais e urbanas. Em Moçambique, essa fonte energética continua sendo amplamente utilizada, tanto no meio doméstico quanto no setor industrial, devido o seu baixo custo e fácil acesso (Vital e Pinto, 2009; Silva *et al.*, 2014). A crescente urbanização e o aumento populacional intensificaram a demanda por carvão vegetal, o que, por sua vez, tem acelerado as taxas de extração da madeira e provocado uma pressão considerável sobre os recursos florestais. Esse cenário é um desafio significativo para a sustentabilidade ambiental e para manejo equilibrado das florestas moçambicanas.

Em 2000 apenas 30% da população africana vivia em centros urbanos, mas as projeções apontam que esse número poderá atingir 60% em 2050 (Grant, 2015). Cerca de 80% das famílias urbanas do continente dependem do carvão vegetal como principal fonte de energia para cozinhar, e a tendência é que o consumo continue a crescer até 2040. A intensificação dessa demanda tem provocado uma profunda alteração nos padrões tradicionais de produção de carvão, levando à expansão das áreas de corte e a degradação progressiva da vegetação nativa (Sedano *et al.*, 2020).

O distrito de Mabalane, localizado na província de Gaza, destaca-se como um dos principais polos produtores de carvão vegetal de Moçambique, sendo responsável por abastecer grande parte dos centros urbanos das províncias de Maputo, Gaza e Inhambane. Apesar de ainda conservar extensas áreas de vegetação nativa, o distrito vem enfrentando uma exploração florestal crescente, motivada tanto por interesses comerciais quanto pela necessidade de sustento das comunidades locais (Baumert *et al.*, 2016; Malate, 2017; Fernando Júnior *et al.*, 2022). Em 2014, Mabalane contava com cerca de 166 licenças para exploração e comercialização de carvão vegetal. Embora esse número tenha diminuído temporariamente por imposição governamental, voltou a crescer em 2019, evidenciando o caráter cíclico e pouco controlado da atividade. Esse processo tem contribuído para a redução da biomassa lenhosa e para a degradação dos ecossistemas locais.

O monitoramento da biomassa florestal é uma estratégia essencial para compreender a dinâmica ecológica das florestas e avaliar o impacto das atividades humanas sobre os recursos naturais. A biomassa representa um importante indicador de estoque de carbono e da produtividade dos ecossistemas, sendo, portanto, uma variável fundamental para os estudos sobre mudanças climáticas e conservação ambiental (Marques *et al.*, 2022; Forzieri *et al.*, 2024). Entretanto, o monitoramento tradicional da biomassa, baseado apenas em medições de campo, demanda tempo, recursos e esforço físico consideráveis, o que limita sua aplicação em grandes áreas ou em regiões de difícil acesso.

Neste contexto, o sensoriamento remoto é uma ferramenta poderosa no monitoramento ambiental em larga escala, permitindo a obtenção de dados contínuos e multitemporais sobre a superfície terrestre (Turner *et al.*, 2003; Shi *et al.*, 2024). As imagens de satélite possibilitam acompanhar as mudanças espaciais e temporais da cobertura vegetal e do uso do solo, além de fornecerem subsídios para o planejamento territorial e o manejo sustentável (Kerr e Ostrovsky, 2003; Da Costa e Guasselli, 2017). Destacam-se os índices de vegetação, que exploram a relação entre as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, refletindo as condições de vigor, densidade e estrutura da vegetação (Ponzoni e Shimabukuro, 2010).

Índices de vegetação como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), o SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) e o EVI (Enhanced Vegetation Index), têm sido amplamente empregados na estimativa de variáveis biofísicas, como biomassa, índice da área foliar e cobertura do dossel (Van Leeuwen e Orr, 2006; Zhi-Hui *et al.*, 2022). O NDVI é sensível a quantidade de clorofila e ao vigor de vegetação, sendo eficaz na detecção de áreas degradadas e na avaliação de mudanças temporais na cobertura vegetal (Huang *et al.*, 2020). O SAVI ajusta a influência do solo em regiões com cobertura vegetal esparsa, sendo adequado para ambientes semiáridos (Alves e Azevedo, 2015). E o EVI corrige limitações do NDVI ao reduzir a saturação em áreas de dossel denso e melhorar a resposta espectral em regiões com alta biomassa (Garrouste *et al.*, 2016).

Em florestas tropicais e semiáridas, como as de Mabalane, o uso de índices espectrais permite detectar variações sutis na estrutura da vegetação e avaliar o grau de regeneração ou degradação em diferentes períodos. Contudo, ainda são escassos os estudos que relacionam diretamente os índices de vegetação com a biomassa lenhosa em áreas de produção de carvão vegetal em Moçambique, o que representa uma lacuna científica relevante. Avaliar essa relação é fundamental não apenas para compreender os impactos ambientais da exploração florestal, mas também para subsidiar políticas de manejo sustentável e estratégias de mitigação das mudanças climáticas.

Diante desse cenário, este estudo como objetivo aplicar de índices de vegetação (IV's) no monitoramento da biomassa lenhosa em áreas de produção de carvão vegetal no distrito de Mabalane-Moçambique.

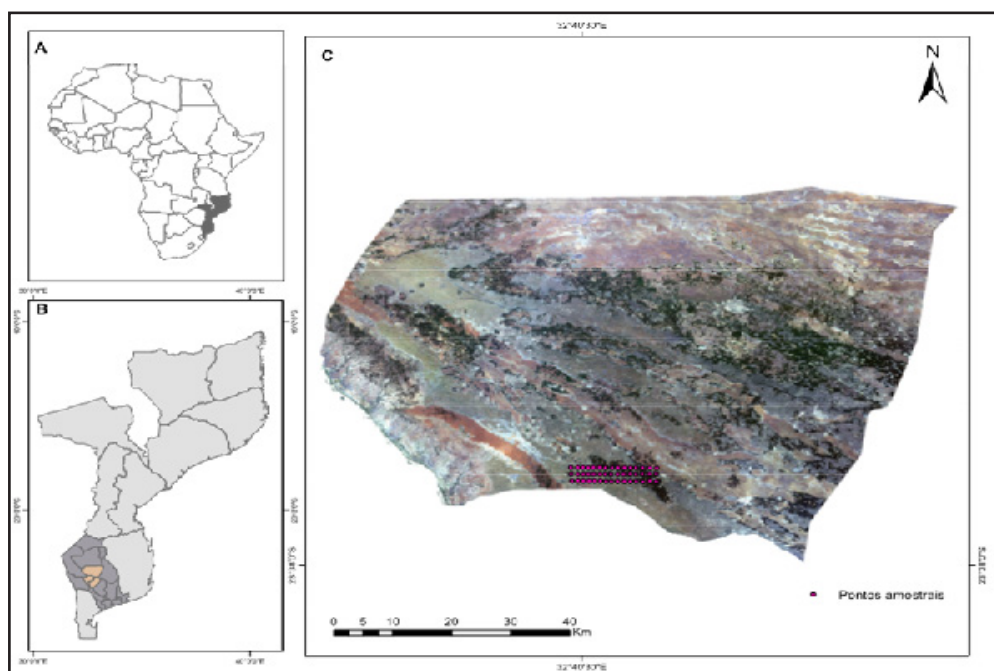
Busca assim, contribuir no monitoramento da biomassa lenhosa em áreas de produção de carvão vegetal, identificar qual o índice de vegetação mais eficiente na estimativa da biomassa, compreender a dinâmica espaço-temporal da cobertura vegetal e oferecer subsídios científicos para a conservação dos recursos florestais e o fortalecimento de práticas sustentáveis na produção de carvão vegetal.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Localização da área do estudo

A área do estudo se localiza no Posto Administrativo de Combumune, Distrito de Mabalane, Moçambique entre as coordenadas 23°00' e 24°10'Sul e 32°05' e 33°15' Este, com uma superfície de 9.107 km<sup>2</sup> (Figura 1). Tem como limite, a Sul o distrito de Chokwé e Guijá, a Este os distritos de Chigubo e Guija, a Norte os distritos de Chicualacuala, e a Oeste com o distrito de Massingir. Este distrito conta com três postos administrativos Mabalane, Combumune e Ntlavene (MAE, 2005).

Figura 1 – Localização da área de estudo. A: África; B: Moçambique (Província de Gaza e Distrito de Mabalane); C: Combumune



Fonte: Autores (2024)

## 2.2. Dados de sensores remotos

Foram utilizadas imagens obtidas no Serviço Geológico dos EUA-USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) de 2008 e 2020, Datum WGS 84 (World Geodetic System 1984) e projeção Universal Transversa de Mercator - Zona 36S. As imagens são do Landsat-5, órbita 168/76 de 14/09/2008 e Landsat-8, órbita 168/76 de 15/09/2020. Foram selecionadas imagens de setembro, em períodos de seca, livre de nuvens (Souza et al., 2013).

As imagens foram pré-processadas e realizada a correção radiométrica e correção atmosférica, pela função Apply DOS1 atmospheric correction. O método DOS é um método de correção do espalhamento atmosférico no qual a interferência atmosférica é estimada diretamente a partir dos números digitais (ND) da imagem de satélite, sendo ignorada a absorção atmosférica. Foram gerados os Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI); Índice de Vegetação Ajustada pelo Solo (SAVI); Índice de Vegetação Melhorado (EVI), Equação 1 a 3:

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho red}{\rho NIR + \rho red} \quad (1)$$

Em que:  $\rho Nir$  = bandas do infravermelho próximo;  $red$  = banda do vermelho.

$$SAVI = \left\{ \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \right\} (1 + L) \quad (2)$$

Em que:  $\rho Nir = NIR$  = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo, adimensional;  $R$  = reflectância na banda referente ao vermelho, adimensional;  $L$  = fator de correção para o solo, adimensional.

$$EVI = G \cdot \left\{ \frac{NIR - R}{L + NIR + C1 \cdot R - C2 \cdot B} \right\} \quad (3)$$

Em que:  $NIR$  = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo, adimensional;  $R$  = reflectância na banda referente ao vermelho;  $B$  = Reflectância na banda referente ao azul;  $L$  é o fator de ajuste para o solo (1,0);  $G$  é o fator de ganho (2,5);  $C1$  e  $C2$  são coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis da atmosfera (6,0 e 7,5).

### 2.3. Trabalho de campo

Foram alocadas em campo 45 parcelas de 30 m x 30 m. Para associar os dados de campo com os dados de sensoriamento remoto foram extraídas coordenadas do centro de cada parcela com uso do GPS.

A coleta de dados florísticos foi realizada nos meses de Julho e Agosto de 2020. Em cada parcela foram registrados os seguintes dados: (a) identidade das espécies lenhosas; (b) número de indivíduos vivos; (c) diâmetro à altura do peito (DAP) dos indivíduos com  $DAP \geq 2.5$ .

## 2.4. Estimativa da Biomassa lenhosa

A biomassa foi estimada com uso de equações alométricas. As equações alométricas são equações de regressão utilizando métodos estatísticos e variáveis de árvores individuais tais como DAP, altura, área basal da árvore, volume da árvore. A ideia essencial das funções alométricas é estimar variáveis muito difíceis de medir, neste caso a biomassa, através de variáveis fáceis de medir (tais como as indicadas acima) e sem ter que destruir as árvores.

Para a estimativa da biomassa dos componentes da parte aérea foi usada a equação alométrica de Sevens (2015), Equação (4):

$$(P_{total})=0,204*dap^{2,275} \quad (4)$$

Em que:  $P_{total}$  (kg) = Biomassa total;  $dap$  = diâmetro acima do peito

## 2.5. Análise estatística

Para determinar o melhor índice de vegetação no monitoramento da biomassa lenhosa foi utilizado o método de mínimos quadrados de correlação de Pearson. A biomassa estimada pela equação de Sevens foi considerada a variável dependente e os valores dos índices de vegetação foram considerados variáveis independentes. A selecção do melhor índice de vegetação baseou-se no maior valor de coeficiente de correlação e coeficiente de determinação.

# 3. RESULTADOS

## 3.1. Estimativa da biomassa

Na área florestal a biomassa calculada pela equação de Sevens, variou entre 5,13 e 28,58 t.h<sup>-1</sup>, (Tabela 1).

Tabela 1 – Biomassa estimada pela equação alométrica

Equação	Biomassa (t.h-1)		
	Mínima	Média	Máxima
Sevene	5,13	21,05	28,58

Fonte: Autores (2024)

A estimativa da biomassa na área florestal, calculada pela equação de Sevene, apresentou uma variação significativa, com valores mínimos de 5,13 t.h<sup>-1</sup>, máximos de 28,58 t.h<sup>-1</sup> e uma biomassa média de 21,05 t.h<sup>-1</sup>. Essa variação é explicada por fatores ecológicos e estruturais presentes nas áreas amostradas, como a diversidade de espécies arbóreas, a densidade das árvores e as diferentes idades e estágios de desenvolvimento das plantas. Além disso, intervenções humanas, como a exploração do carvão vegetal e extração da madeira e fatores ambientais, como a qualidade do solo, a disponibilidade de água e nutrientes e a exposição à luz solar, também influenciam diretamente a quantidade de biomassa.

### 3.2. Variação dos índices de vegetação na área de produção de carvão vegetal

Os valores dos índices de vegetação a partir das imagens de 2008 e 2020 mostraram diferenças em ambos os períodos (Tabela 2).

As variações das reflectâncias da interação da radiação com a estrutura interna das folhas e arquitetura do dossel, como a quantidade de folhas e sua orientação espacial. Os valores de NDVI e SAVI de 2008 foram relativamente maiores do que os valores de EVI.

A análise de correlação de Pearson ( $r$ ) mede a força entre a associação das duas variáveis, valores da biomassa e índices de vegetação. A melhor correlação foi observada na biomassa estimada pela equação de Sevene com NDVI-2008 ( $r=0.85$ ), (Tabela 3).

Tabela 2 – Valores máximo, médio e mínimo dos índices de vegetação, em 2008 e 2020, com imagens Landsat

Valores	2008			2020		
	NDVI	SAVI	EVI	NDVI	SAVI	EVI
Máx	0,295	0,44	-0,242	0,234	0,172	0,173
Méd	0,157	0,234	-0,189	0,124	0,141	0,14
Min	0,1	0,149	-0,242	0,153	0,11	0,108

Fonte: Autores (2024)

Tabela 3 – Matriz de correlação entre a biomassa lenhosa e índices de vegetação

	Biomassa	DVI 2008	NDVI 2020	EVI 2008	EVI 2020	SAVI 2008	SAVI 2020
Biomassa	1	0,85	0,74	0,84	0,77	0,76	0,60
NDVI 2008	0,85	1	0,55	0,64	0,76	0,69	0,37
NDV 2020	0,74	0,55	1	0,67	0,6	0,59	0,51
EVI 2008	0,84	0,64	0,67	1	0,62	0,65	0,55
EVI 2020	0,77	0,76	0,6	0,62	1	0,57	0,42
SAVI 2008	0,76	0,69	0,59	0,65	0,57	1	0,41
SAV 2020	0,60	0,37	0,51	0,55	0,42	0,41	1

Fonte: Autores (2024)

Os modelos obtidos a partir de regressão de *stepwise*, onde biomassa estimada pela equação de Sevene foi a variável dependente e o índice vegetação a variável independente (Tabela 4). O modelo de estimativa pela equação de Sevene e o NDVI-2008 foi estatisticamente significativo e apresentou maior coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj} = 72\%$ ). O valor de 0.72 de  $R^2_{aj}$ , significa que cerca de 72% da variação da biomassa é explicada pelo NDVI.

Tabela 4 – Modelos desenvolvidas na regressão de Stepwise

Modelos	Estatísticas				$R^2_{aj}$
	Parâmetros		IC 95%		
	$\beta_0$	$\beta_1$	$L_l$	$L_s$	
1. $Y = -2.7+58 x$	-2.7	57.7	48.50	66.96	0.72
2. $Y = -3.1+48 x$	-3.1	48.4	36.69	60.1	0.53
3. $Y = -4+150 x$	-4.02	155	128.3	181.7	0.69
4. $Y = 2.4+91 x$	2.4	90.97	71.2	110.8	0.58
5. $Y = -3+100 x$	-3	1001	78.6	1246	0.56
6. $Y = 0.92+73 x$	0.92	73.1	47.8	98.3	0.35

Em que:  $\beta_0$  e  $\beta_1$  – Parâmetros de regressão. IC - Intervalo de Confiança. ( $R^2_{aj}$ )  
 Fonte: Autores (2024)

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Estimativa da Biomassa lenhosa

A biomassa estimada pela equação de Sevene apresentou uma variação significativa entre 5,13 e 28,58 t.h<sup>-1</sup>, e média de 21,05 t.h<sup>-1</sup>. Estes valores indicam que a área em estudo possui estoques de biomassa moderados. São valores típicos de ecossistema florestais sobre pressão antrópica contínua. A pressão das atividades humanas causa desmatamento e degradação, levando à redução da biomassa e impactando o ecossistema (Nobre, Brandão e Arieira, 2025). A variação reflete a heterogeneidade estrutural e a degradação desigual das formações florestais no distrito de Mabalane.

Valores semelhantes, com variação de biomassa entre 0,9 e 31,0 t.h<sup>-1</sup>, foram reportados por Carreiras, Melo e Vasconcelos (2013) em florestas de Miombo da Zambézia. Demonstram que as florestas tropicais secas de Moçambique apresentam uma ampla variação em função do grau de perturbação e do tipo de cobertura vegetal. Por outro lado, Macave *et al.* (2022) ao estimarem valores mais elevados, entre 11 e 95 Mg/ha, no norte de Moçambique, utilizando dados ópticos e de radar, evidenciaram que ecossistemas menos explorados acumulam maior quantidade de biomassa.

A diferença entre os valores encontrados neste estudo e os das regiões menos perturbadas pode estar associada à intensificação da exploração florestal para a produção de carvão vegetal, que reduz a densidade arbórea e a presença de indivíduos de maior diâmetro. Segundo Ribeiro *et al.* (2008), em áreas do Miombo moçambicano, a variabilidade espacial está fortemente associada à frequência de incêndios e à densidade de cobertura dossel, fatores diretamente influenciados pela atividade humana. Portanto, Potter *et al.* (2008) e Forzieri *et al.* (2024) sustentam que as variações espaço-temporais da biomassa são afetados por fatores bióticos e abióticos.

A diversidade de espécies arbóreas é um fator crítico que afeta a biomassa. As florestas com maior diversidade tendem a ter uma produtividade alta devido a complementariedade entre espécies que utilizam diferentes nichos ecológicos (Brockerhoff *et al.*, 2017; Tatsumi, 2020). Neste caso a variação da biomassa observada pode, portanto ser atribuída à presença de diferentes espécies.

A densidade de árvores é outro fator que influencia diretamente na quantidade da biomassa. Áreas com maior densidade possuem maior capacidade de estocar carbono, como demonstrados nos estudos de Meng *et al.* (2021); Castillo-Figueroa, Gonzalez-Melo e Posada (2023), que relacionam a densidade florestal à maior produtividade e, conseqüentemente, maiores valores de biomassa. Em termos de idade das árvores, florestas maduras, com árvores de idade avançada, armazenam mais biomassa de que florestas jovens, uma vez que as árvores possuem maior diâmetro e altura, acumulando mais massa lenhosa.

A exploração de carvão vegetal e a extração de madeira são fatores que reduzem significativamente os estoques de biomassa. Estudos de FAO (2020) indicam que a exploração desenfreada dos recursos florestais tem contribuindo para a degradação das florestas em África, particularmente em países que o carvão vegetal é uma das principais fontes.

A maior parte da população do distrito de Mabalene encontra na exploração florestal uma fonte de renda. A exploração intensiva para produção de carvão e extração da madeira têm sido apontadas como principais atividades que reduzem a

biomassa em áreas florestais. Essa prática, além de reduzir a capacidade de sequestro de carbono das florestas, degrada o solo e dificulta a regeneração natural das áreas exploradas. Grainger (1993) demonstra que a exploração intensa da madeira leva à redução da densidade florestal e a degradação da estrutura da floresta, afetando a capacidade de regeneração da biomassa. Isso pode explicar as áreas com biomassa mínima de 5,13 t.h<sup>-1</sup>, onde atividades de extração de madeira e produção de carvão impactaram severamente a vegetação.

A produção de carvão, em particular tem sido a maior fonte de renda da comunidade local. Segundo Junior *et al.* (2022) a produção de carvão em Moçambique contribui para a perda de biomassa, com árvores de grande porte sendo frequentemente cortadas para a produção de carvão, o que reduz a capacidade dessas florestas de funcionar como sumidouros de carbono e de regenerar-se de forma eficaz. Sedano *et al.* (2021) indicam que a procura de carvão vegetal é a responsável por uma degradação anual de cerca de 175 km<sup>2</sup> de florestas de Mopane na província de Gaza, Sul de Moçambique. Esse processo de degradação contínua pode levar a redução da biodiversidade e da biomassa nas áreas mais exploradas, resultando nos baixos valores observados neste estudo.

Além disso, Ansah (2022) aborda o impacto da exploração florestal nas comunidades locais. Destaca, que em áreas onde a produção de carvão é uma atividade econômica predominante, há uma diminuição significativa na cobertura florestal e, conseqüentemente na biomassa disponível. A IEA (2010) afirma que o número de pessoas na África Subsaariana que dependem do uso tradicional de biomassa pode aumentar para 918 milhões até 2030. Portanto, Mwampamba *et al.* (2013) referem que o setor de carvão vegetal pode fornecer a principal fonte de subsistência em áreas rurais e urbanas para cerca de 12 milhões de pessoas até 2030. Para Arnold *et al.* (2006), um grande número de pessoas é atraído pela produção comercial e venda de carvão vegetal, pois há demanda estável, facilidade de acesso aos recursos florestais e baixos custos iniciais de investimento. A exploração de carvão vegetal a partir de florestas nativas continua a ser de importância socioeconômica elevada devido,

entre outros aspectos, ao maior poder calorífico, apego a normas e valores culturais, facilidade de acesso a serviços não-energéticos, como frutas, medicamentos, durante o processo produtivo (Woollen *et al.*, 2016). A sobre exploração dessas áreas resulta em florestas menos densas e mais suscetíveis a degradação, corroborando com os valores mínimos de biomassa encontrados.

As áreas com maior biomassa, como o valor de 28,58 t.h<sup>-1</sup>, estão associadas a regiões menos afetadas pela exploração florestal e em processo de regeneração. Segundo Chazdon (2012) após distúrbios de abertura de clareiras florestais, o recrutamento de novas espécies vegetais pode se originar através de banco de sementes do solo, dispersão de sementes, rebrotamento de troncos danificados ou regeneração adiantada. Muitas espécies de florestas maduras são capazes de rebrotamento a partir de raízes e/ou caules após um processo de corte e queima da floresta (Kammesheidt, 1999).

A regeneração natural pode ocorrer após a cessação das atividades e extração exploração florestal, levando a um aumento gradual da biomassa, especialmente se as práticas de manejo forem implementadas. Após a exploração, as espécies comerciais têm pouca capacidade para se regenerar. A manutenção de 10% dos indivíduos das espécies exploradas com DAP acima de 50cm, não parece ser suficiente para garantir a regeneração natural dessas espécies (Schwartz *et al.*, 2017).

Vários estudos acharam resultados similares ao do presente estudo. Nascimento e Laurance (2002) estimaram a biomassa média acima do solo nas florestas tropicais da Amazônia brasileira obtendo 30,0 t.h<sup>-1</sup>. Esta estimativa incluiu também a contribuição de pequenas árvores. De Walt e Chave (2004) estudaram a estrutura e biomassa de quatro florestas neotropicais de planície na América Central e do Sul, em que a biomassa estimada variou entre 6,6 e 93,5 t.h<sup>-1</sup>.

Na África, Ntonmen *et al.* (2002) utilizaram a equação alométrica da biomassa acima do solo para árvores do sub-bosque. A equação alométrica multiespécie desenvolvido para árvores de sub-bosque complementa estudos recentemente desenvolvidos para árvores de sub-bosque, contribuindo para a estimativa da

biomassa lenhosa total acima do solo em florestas semidecíduas na Bacia do Congo. Carreiras, Melo e Vasconcelos (2013), estimaram a biomassa acima do solo em florestas de savana de Miombo (Moçambique, África Oriental) na província da Zambezia-Moçambique usando radar de abertura sintética de banda L, e obtiveram valores que oscilavam entre 0,9 e 15,5 . Ribeiro *et al.* (2008) mapearam biomassa acima do solo e índice de área foliar (LAI) na Província de Niassa na Reserva do Niassa com valores entre 1,2 e 8,9 de biomassa.

#### 4.2. Variação dos índices de vegetação na área de produção de carvão vegetal

Os valores dos índices de vegetação foram maiores em 2008 e menores em 2020. Esses resultados evidenciaram a redução na densidade da vegetação no período analisado. O NDVI mostrou valores mais altos em 2008, com valor máximo de 0,295, média de 0,157 e mínimo de 0,100, se comparado com 2020, que apresentou valor máximo de 0,242, média de 0,124 e mínimo de 0,153.

Essa variação indica uma densidade vegetal e saúde da vegetação significativamente maior em 2008. Esses valores são consistentes com as conclusões de Pedreira Junior (2020), que analisou os parâmetros biofísicos da superfície em diferentes usos e ocupações, e constatou que locais com maior biomassa vegetal (DV) apresentaram os maiores valores de NDVI e balanço de radiação, além dos menores valores de albedo superficial e temperatura superficial.

Milanovic *et al.* (2019) aplicaram NDVI no monitoramento e avaliação das mudanças temporais da cobertura vegetal, para fornecer aos gestores florestais locais com informações essenciais e atualizadas sobre as alterações da cobertura vegetal numa base anual.

Nossos resultados destacam a importância do NDVI como ferramenta de monitoramento da biomassa em áreas de produção de carvão. A redução da densidade da vegetação entre 2008 e 2020 pode estar diretamente associada ao manejo inadequado como também a intensificação da exploração florestal.

Os valores de SAVI também foram maiores em 2008, com valor máximo de 0,440, média de 0,234 e mínimo de 0,149, se comparado com 2020, que apresentou valor máximo de 0,172, média de 0,141 e mínimo de 0,110. Esses dados indicam que o SAVI foi eficaz em corrigir os efeitos do solo, especialmente em áreas com menor densidade vegetal. Alves *et al.* (2014) e Alves e Azevedo (2015) apontam que o SAVI é mais adequado para estimar a biomassa em regiões semiáridas, minimizando a influência do solo na reflectância. Se comparado com outros IVs durante período chuvoso e seco em região semiárida, observaram que no período seco o SAVI respondeu melhor que outros IV. Em 2020, os valores menores de SAVI podem indicar degradação da vegetação e uma maior exposição do solo, alinhando-se com as observações de áreas semiáridas.

Para o EVI os resultados mostraram valores menores de EVI em 2008, se comparado com os valores de 2020, que apresentaram valor máximo de 0,173, média de 0,140 e valor mínimo de 0,108. Garrouste *et al.* (2016) destacam que o EVI inclui fatores de ajuste que o tornam mais robusto para quantificação de biomassa se comparado ao NDVI. Em 2020, o aumento relativo dos valores de EVI pode indicar uma recuperação da vegetação ou mudanças estruturais significativas no dossel.

A biomassa apresentou a maior correlação com o NDVI de 2008 (0,85), indicando que, naquele ano, o NDVI foi um forte preditor da biomassa lenhosa, capturando de maneira eficaz a variabilidade da biomassa. Este resultado é consistente com estudos anteriores que também destacaram a eficácia do NDVI na estimativa da biomassa.

Huang *et al.* (2020) observaram que o NDVI é um bom preditor de biomassa verde, tanto úmida quanto seca e expressa de forma eficiente o estado e os atributos da vegetação. Silva Filho *et al.* (2020) destacaram que o NDVI tem sido um dos índices mais utilizados para a estimativa de biomassa em diversos ecossistemas devido à sua simplicidade e eficácia.

No entanto, a correlação com o SAVI de 2020 foi a mais baixa entre os índices analisados (0,60). Isso sugere uma menor capacidade do SAVI de 2020 em prever a biomassa lenhosa, possivelmente devido a mudanças na densidade da vegetação, ou a maior reflectância do solo. Este resultado é sustentado por Pereira *et al.* (2020) ao

notarem que o valor da refletância diminui em áreas com maior desenvolvimento de atividades humanas e, portanto, com paisagens mais degradadas, como nas áreas de solo exposto e de vegetação mais rarefeita. Segundo Rêgo *et al.* (2012), isso se deve ao SAVI apresentar um fator de ajuste para o brilho do solo, o que altera a escala de valores que acompanha cada índice.

Nossa análise mostra que os índices de vegetação de 2008 têm correlações mais fortes com a biomassa lenhosa do que os índices de 2020. Isso pode ser devido a várias razões, incluindo mudanças nas práticas de manejo de uso da terra, degradação da vegetação ou diferentes condições ambientais que afetaram a capacidade dos índices de vegetação em capturar a biomassa. O NDVI de 2008 apresentou a correlação mais alta com a biomassa (0,85), sugerindo que é o melhor índice para monitoramento da biomassa lenhosa em áreas de produção de carvão. Resultados semelhantes foram observados por Zanette *et al.* (2017) e Macave *et al.* (2022), que destacam o NDVI como o melhor indicador da variação da biomassa aérea em florestas tropicais secas, devido à sua estabilidade e simplicidade de cálculo.

Além disso, o uso de índices de vegetação pode ser aprimorado com tecnologias emergentes, como drones equipados com sensores multiespectrais ou dados de satélite de alta resolução espacial. Essas ferramentas podem fornecer medições mais detalhadas da biomassa e apoiar estratégias de manejo sustentável em áreas de produção de carvão.

As correlações mais baixas dos índices de 2020 sugerem que houve mudanças significativas nas áreas entre 2008 e 2020. Isso destaca a importância de considerar variáveis temporais ao utilizar índices de vegetação para estimativas de biomassa. Bezerra *et al.* (2014) enfatizam que as mudanças temporais na cobertura vegetal podem influenciar a precisão dos índices de vegetação na estimativa da biomassa.

Nossa análise aplicou seis modelos de regressão utilizando o método stepwise para a estimativa da biomassa com base em índices de vegetação (Tabela 4). Os parâmetros fornecidos incluem o intercepto ( $\beta_0$ ), o coeficiente do termo

independente ( $\beta_1$ ), os intervalos de confiança (IC) de 95% para os parâmetros e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ).

Os resultados modelos de regressão indicam diferenças significativas na capacidade preditiva dos índices de vegetação. O modelo 1 destaca-se pela maior precisão na estimativa da biomassa. Os Modelos 3 e 4 também apresentam bons valores de  $R^2_{aj}$ , com 0.69 e 0.58, respectivamente. E os Modelos 2, 5 e 6 apresentaram  $R^2_{aj}$  menores, especialmente o Modelo 6, com  $R^2_{aj}$  de 0.35, demonstrando menor eficácia em explicar a variabilidade da biomassa, sugerindo que características específicas da área podem influenciar a eficácia dos índices.

O Modelo 1 foi o mais robusto, obteve o maior  $R^2_{aj}$  de 0.72, com 72% da variabilidade na biomassa explicada pelo índice de vegetação. Apresenta intervalos de confiança relativamente estreitos para  $\beta_1$  (48.50 a 66.96), reforçando a sua precisão. Os Modelos 3 e 5 possuem intervalos de confiança mais amplos, indicando maior variabilidade nas estimativas dos parâmetros, reduzindo a precisão dos modelos. Os valores dos parâmetros de regressão e seus sinais indicam a natureza da relação entre os índices de vegetação e a biomassa.

Os Modelos 1, 2, 3 e 5 possuem interceptos negativos, enquanto os Modelos 4 e 6 têm interceptos positivos. Coeficientes maiores de  $\beta_1$  indicam uma maior sensibilidade do modelo às variações no índice de vegetação, sendo que o Modelo 3 apresenta o maior coeficiente (150), sugerindo uma relação forte entre o índice de vegetação e a biomassa.

O Modelo 1 se destaca como o mais robusto e preciso para a estimativa da biomassa, com um  $R^2$  ajustado de 0.72 e intervalos de confiança estreitos, indicando alta precisão. Este modelo deve ser considerado a melhor opção para estudos futuros de monitoramento da biomassa em áreas de produção de carvão utilizando índices de vegetação derivados de imagens de satélite.

A eficácia do uso de índices de vegetação, como NDVI, EVI, e SAVI, no monitoramento da biomassa lenhosa é amplamente documentada na literatura. Silva *et al.* (2019) destacam que índices de vegetação como NDVI e SAVI, foram eficazes

para monitorar e analisar a dinâmica da cobertura vegetal no semiárido brasileiro. Os índices identificaram áreas degradadas com precisão, principalmente durante o período seco, destacando o SAVI como o índice com maior acurácia na resposta espectral da vegetação. Zanette *et al.* (2017), testaram modelos matemáticos para estimar a biomassa aérea, e observaram que a maioria das equações avaliadas apresentou alto coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da estimativa aceitável considerando que são equações para florestas naturais, podendo fornecer boas estimativas de biomassa.

Estudos recentes corroboram a eficácia do NDVI e SAVI na estimativa da biomassa biomas tropicais e subtropicais. A integração dos resultados deste estudo com investigações realizadas em outras regiões produtoras do carvão vegetal poderia oferecer uma perspectiva mais ampla sobre a aplicabilidade em diferentes contextos ambientais e socioeconômicos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biomassa lenhosa variou entre 5,13 e 28,58 t/ha, com a maior correlação observada entre a biomassa estimada e o NDVI de 2008. Os valores dos índices de vegetação NDVI e SAVI foram maiores em 2008, indicando uma densidade vegetal maior nesse ano, enquanto o EVI foi menor.

Os índices vegetação apresentaram comportamentos distintos nos anos analisados. Mas, o NDVI se mostrou superior ao estimar a biomassa lenhosa com a maior correlação com a biomassa ( $r=0,85$ ) e o melhor coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}=0,72$ ), evidenciando sua superioridade na estimativa da biomassa lenhosa.

## REFERÊNCIAS

ABOLA, J.; AREVALO, J.; FERNANDEZ, A. Allometric Relationships of Different Tree Species and Stand Aboveground Biomass in the Gomer Laurel Forest (Canary Islands). **Flora**, n.3, p.264-274, nov. 2005.

ANSAH, P. K. The Impact of Charcoal Production on the forest of Sub-Saharan Africa: A theoretical Investigation. **Journal of Sustainable Development**, v.15, n.2, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5539/jsd.v15n2p16>. Acesso em 23 mar. 2024

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V.; SANTOS, C. A. C.; SANTOS, F. A. C. Comportamento Sazonal do Albedo e dos índices de vegetação na bacia hidrográfica do Alto curso do rio Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, p.1015-1027, 2014.

ALVES, R. E.; AZEVEDO, A. R. Aplicação de índices de vegetação em áreas semiáridas: estudo de caso no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 8, n. 2, p. 439-452, 2015.

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P.V. Análise da variação espacial e temporal do índice de vegetação e sua relação com parâmetros climáticos na Bacia Hidrográfica do alto curso do rio Paraíba, estado da Paraíba, Brasil. **Boletim Goiano de Geografia** [online], Goiana, v.35, n.3. p.530-553, set/dez 2015 Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/bgg/article/view/38842>. Acesso em 29 Jul 2024.

ARNOLD, J. E. M.; KOHLIN, G.; PERSON, R. Woodfuels, livelihoods and policy interventions: changing perspectives. **World Development**, v. 34, n.3, p.596-611, marc. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2005.08.008>. Acesso em 11 jul. 2024.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B.; SILVA, B. B.; LOPES, P.M.; SILVA, Ê.F.F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.1, p.73-84, 2014. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/s141543662014000100010>. Acesso em 11 fev. 2023.

BOLOGNESI, M. et al. Rapid mapping and impact estimation of illegal charcoal production in southern Somalia based on worldview-1 imagery. **Energy Sustain. Dev.**, v.25 p.40-49, abr. 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/270960783\\_Rapid\\_mapping\\_and\\_impact\\_estimation\\_of\\_illegal\\_charcoal\\_production\\_in\\_southern\\_Somalia\\_based\\_on\\_WorldView-1\\_imagery](https://www.researchgate.net/publication/270960783_Rapid_mapping_and_impact_estimation_of_illegal_charcoal_production_in_southern_Somalia_based_on_WorldView-1_imagery). Acesso em 11 fev. 2023

BROCKERHOFF, E. G. et. al. Biodiversidade florestal, funcionamento do ecossistema e provisão de serviços ecossistêmicos. **Biodivers Conserv**, 26, 3005-3035, Dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1453-2> Acesso 12 fev. 2023.

CARREIRAS, J. M. B.; MELO, J. B.; VASCONCELOS, M. J. Estimating the above-ground biomass in Miombo savanna woodlands (Mozambique, East Africa) using L-Band Synthetic Aperture Radar data. **Remote Sensing**, Basel, v. 5, n. 4, p. 1524-1548, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs5041524>

CASTILLO-FIGUEROA, D.; GONZALEZ-MELO, A. & POSADA, J.M. Wood density is related to aboveground biomass and productivity along a successional gradient in upper Andean tropical forests. **Front. Plant Sci.**, v.14, nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1276424>. Acesso em 20 mar. 2024.

CHAZDON, R. L. Regeneração de florestas tropicais. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. **Ciências Naturais**, v.7, n.3, p.195-218, Dez. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v7i3.587>. Acesso em 20 mar. 2024.

CHAZDON, R. L. Regeneração florestal natural e a conservação da biodiversidade tropical. **Biotropica**, Washington, v. 44, n. 6, p. 715–725, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2012.00848.x>

COSTA, L. C. B.; GUASSELLI, L. A. Dinâmica Sazonal de Remanescentes da Mata Atlântica, a Partir de Séries Temporais Ndvi/Modis. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n.30, p.214-239, abr. 2017. Disponível em: doi: 10.12957/geouerj.2017.15868. Acesso em 23 de set. 2023.

DANELICHEN, V. H. M.; PEREIRA, O. A.; NOVAIS, J. W. Z.; BIUDES, M. S.; NOGUEIRA, J. S.; CORREIA, A. R. Assessment of Land Use in A Conservation Unit in the Brazilian Pantanal by Remote Sensing. **Australian Journal of basic and Applied Sciences**, v.13, p.141-150, jun. 2019. Disponível em: DOI: 10.22587/ajbas.2019.13.6.16. Acesso em 21 mar. 2024.

DUTRA, D. J.; ELMIRO, M. A. T.; GARCIA, R. A. Comparative analysis of methods applied in vegetation cover delimitation using Landsat 8 images. **Soc. Nat.**, v.32, p.699-710, out. 2020. Disponível em: DOI: 10.14393/SN-v32-2020-56139. Acesso em 17 fev. 2023.

FAO (Food and agriculture organization of the United Nations). The State of the World's Forests. 2020. Disponível em: [https://www-fao-org.translate.google.com/translate/state-of-forests/en/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pt&\\_x\\_tr\\_hl=pt&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www-fao-org.translate.google.com/translate/state-of-forests/en/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc). Acesso em 23 de set. 2023.

FERNANDO JÚNIOR, J.; RIBEIRO, N.; WELLS, G.; ARTUR, L.; RYAN, C.; FARÃO, A.; HARGREAVES, P.; BOWERS, S.; FISHER, J. Produção sustentável de carvão vegetal em Moçambique: Um contributo ao anteprojecto da lei florestal. **Observatório do Meio Rural**, n.179, jul. 2022. Disponível em: <https://omrmz.org/wp-content/uploads/2022/07/DR-179-Producao-sustenta%CC%81vel-de-carvao-vegetal-em-Mocambique-2.pdf>. Acesso em 17 fev. 2023.

FERRETTI, M.; FISCHER, C.; GESSLER, A. et al. Advancing forest inventorying and monitoring. **Annals of Forest Science**, v.81, n.6, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01220-9>. Acesso em: 23 nov. 2024.

FORZIERI et al. Ecosystem heterogeneity is key to limiting the increasing climate-driven risks to European forests. **One Earth**, v.7, p. 1-16, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.005>. Acesso em: 18 fev. 2025.

FRANCISCO, C.; GRUBER, N. Índices de vegetação obtidos de imagens multiespectrais aplicados na discriminação da cobertura vegetal em relevo montanhoso. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n.32, e16931, jan. 2018. Disponível em: Doi:10.12957/geouerj.2018.16931. Acesso em: 18 mar. 2023.

GARROUTE, E. L. et al. Using NDVI and EVI to map spatiotemporal variation in the biomass and quality of forage for Migratory Elk in the Greater Yellowstone ecosystem. **Remote Sensing**, v.8, n.5, p.1-25, mai. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs8050404>. Acesso em 23 mar. 2024.

GOFC-GOLD. A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and. **Losses of carbon stocks in forests remaining forests and forestation**. GOFC-GOLD Report COP22-1 GOFC-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University, The Netherlands, 2016.

GRACE, J.; MITCHARD, E.; GLOOR, M. Perturbations in the carbon budget of the tropics. **Global Change Biology**, v.20 (10), p.3238-3255, jun. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.12600>. Acesso em: 14 set. 2024.

GRANT, R. **África: Geographies of Change**, New York and Oxford: Oxford University Press, 2015.

HARRIS, A.; CARR, A. S.; DASH, J. Remote sensing of vegetation cover dynamics and resilience across southern Africa. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.28, p.131-139, mai. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.11.014>. Acesso em: 14 set. 2024

HOMEIER, J. & LEUSCHNER, C. Factors controlling the productivity of tropical Andean forests: Climate and soil are more important than tree diversity. **Biogeosciences** 18, p.1525-1541, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-18-1525-2021>. Acesso em: 14 set. 2024

HUANG, S.; TANG, L.; HUPY, J. P.; WANG, Y.; SHAO, G.A. commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. **Journal of Forestry Research** [online], v.32, p.1-6, mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>. Acesso em: 18 mar. 2023.

IEA. **World Energy Outlook**. Paris. France: International Energy Agency (IEA), 2010.

JIN, J.; WANG, Q. Evaluation of Informative Bands Used in Different PLS Regressions for Estimating Leaf Biochemical Contents from Hyperspectral Reflectance. **Remote Sensing**, 11(2), jan. 2019, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11020197>. Acesso em: 14 set. 2024

JUNIOR, J. F. et. al. Produção Sustentável de Carvão Vegetal em Moçambique: Um contributo ao anteprojecto da lei florestal. **Observatório do meio rural**, Maputo, n.179, jul. 2022. Disponível em: <https://omrmz.org/wp-content/uploads/2022/07/DR-179-Producao-sustentavel-de-carvao-vegetal-em-Mocambique-2.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2024.

KAMMESHEIDT, L. Forest recovery by root suckers and above-ground sprouts after slash-and-burn agriculture, fire and logging in Paraguay and Venezuela. **Journal of Tropical Ecology**, v.15, n.2, p.143-157, marc. 2019. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-tropical-ecology/article/abs/forest-recovery-by-root-suckers-and-aboveground-sprouts-after-slashandburn-agriculture-fire-and-logging-in-paraguay-and-venezuela/937A3BA6D9291A212BE0666CC68614EF>. Acesso em: 18 mar. 2023.

KIOR, A. SUKHOV, V. SUKHOVA, E. Application of Reflectance Indices for Remote Sensing of Plants and Revealing Actions of Stressors. **Photonics**, v.8, n.582, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/photonics8120582>. Acesso em: 21 mar. 2023.

KÖNIG, L. A.; MOHREN, F.; SCHELHAAS, M.; NABUURS, H.B.G. Tree regeneration in models of forest dynamics - Suitability to assess climate change impacts on European forests, **Forest Ecology and Management**, v.520, e120390, set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120390>. Acesso em: 14 set. 2024

KULIEŠIS, A.; KASPERAVIČIUS, A.; KULBOKAS, G.; KULIEŠIS, A. A.; PIVORIŪNAS, A.; ALEINIKOVAS, M.; ŠILINSKAS, B.; ŠKĖMA, M.; BENIUŠIENĖ, L. Using Continuous Forest Inventory Data for Control of Wood Production and Use in Large Areas: A Case Study in Lithuania. **Forests**, v.11, e1039, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f11101039>. Acesso em: 21 mar. 2023.

MACAVE, O. A.; RIBEIRO, N. S.; CHAÚQUE, A.; BRANQUINHO, C.; WASHINGTON-ALLEN, R. A. Modelling aboveground biomass of Miombo woodlands in Niassa Special Reserve, northern Mozambique. **Forests**, Basel, v. 13, n. 2, p. 311, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020311>

MALATE, J.Y. **Importância dos recursos Florestais na Comunidade de Combomune, Distrito de Mabalane, Moçambique**. Dissertação (Mestre em Gestão de Recursos Florestais), Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Bragança. Bragança 2017.

MARQUES, N. C. S.; MACHADO, R. B.; AGUIAR, L. M. S.; MENDONÇA-GALVÃO, L.; TIDON, R.; VIEIRA, E. M.; MARINI-FILHO, O. J.; BUSTAMANTE, M. Drivers of change in tropical protected areas: Long-term monitoring of a Brazilian biodiversity hotspot. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v.20, n.2, p.69-78, abr. 2022. Disponível em: <https://www.perspectacolconserv.com/en-pdf-S2530064422000116>. Acesso em: 21 mar. 2023.

MARTINS-NETO, R. P.; TOMMASELLI, A. M. G.; IMAI, N. N.; HONKAVAARA, E.; MILTIADOU, M.; SAITO MORIYA, E. A.; DAVID, H. C. Tree Species Classification in a Complex Brazilian Tropical Forest Using Hyperspectral and LiDAR Data. **Forests**, v.14, n.5, mai. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f14050945>. Acesso em: 21 mar. 2023.

MENG, N. et al. Higher stand densities can promote soil carbon storage after conversion of temperate mixed natural forests to larch plantations. **Eur. J. of Forest Res**, p.373-386, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01346-9>. Acesso em: 21 jun. 2023.

MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL. (MAE). **Perfil do distrito de Mabalane província de Gaza, República de Moçambique**. Maputo, MAE, 2005.

MILANOVIC, M. M. et al. Application of Landsat-derived NDVI in monitoring and assessment of vegetation cover changes in central Serbia. **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences**, v.14, n.1, p.119-129, feb. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.26471/cjees/2019/014/064>. Acesso em: 21 mar. 2023.

MIRAGLIO, T.; ADELIN, K.; HUESCA, M.; USTIN, S.; BRIOTTET, X. Monitoring LAI, Chlorophylls, and Carotenoids Content of a Woodland Savanna Using Hyperspectral Imagery and 3D Radiative Transfer Modeling. **Remote Sensing**, v12, n.1, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12010028>. Acesso em: 21 jun. 2023.

MWAMPAMBA, T. H.; GHILARDI, A.; SANDER, K.; CHAIX, K. J. Dispelling common misconceptions to improve attitudes and policy outlook on charcoal in developing countries. **Energy for Sustainable Development**, v.17, n.2, 75-85, abr. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.01.001>. Acesso em: 21 mar. 2023.

NOBRE, C. A.; ARIEIRA, J.; BRANDÃO, D.O. Amazônia em risco e a COP30 como uma oportunidade crítica para evitar o ponto de não retorno. **Estudos Avançados**, 39 (114), e39114029, 2025.

OLIVEIRA, L. Z.; ULLER, H. F.; KLITZKE, A. R.; ELEOTÉRIO, J. R. & VIBRANS, A. C. Towards the fulfillment of a knowledge gap: Wood densities for species of the subtropical Atlantic Forest. **Data** v.4, n.3, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/data4030104>. Acesso em: 21 mar. 2023.

PARUELO J. M.; JOBBÁGY E. G.; SALA O. E. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. **Ecosystems**, v.4, n.7, p.683-698, nov, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0037-9>. Acesso em: 21 mar. 2023.

PEDREIRA JUNIOR, A. L. et al. Efeito da Mudança da Cobertura em Parâmetros Biofísicos em Cuiabá, Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n.3, p.1324-1334, abr. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/243652/35373>. Acesso em: 24 nov. 2023.

PEREIRA, J. A. V. et al. Uso e cobertura do solo e comparação entre os índices de vegetação SAVI e NDWI na área de proteção ambiental das onças, paraíba, Brasil. **Revista de Geografia**, Recife, v.37, n.2, jun. 2020. Disponível em: DOI:10.51359/2238-6211.2020.245694. Acesso em: 21 mar. 2023.

PIÑEIRO, G.; OESTERHELD, M.; PARUELO, J. Seasonal Variation in Aboveground Production and Radiation- use Efficiency of Temperate rangelands Estimated through Remote Sensing. **Ecosystems**, v.9, n.3, abr. 2006, p.357-373. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-005-0013-x>. Acesso em: 14 set. 2024

POTTER, C.; GROSS, P.; KLOOSTER, S.; FLADELAND, M.; GENOVESE, V. Storage of carbon in U.S. forests predicted from satellite data, ecosystem modeling, and inventory summaries. **Clim Change**, v.90, p. 269-282, jul. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9462-5>. Acesso em: 21 mar. 2023.

KERR, J.T.; OSTROVSKY, M. From space to species: ecological applications for remote sensing. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 18, n. 6, p.299-305, jun. 2002.

RÊGO, S. C. A.; LIMA, P. P. S.; LIMA, M. N. S.; MONTEIRO, T. R. R. Análise comparativa dos índices de vegetação NDVI e SAVI no município de São Domingos do Cariri-PB. **Revista Geonorte**, v.2, n.4, p.1217-1229, 2012.

REQUENA-MULLOR, J.; LÓPEZ, E.; CASTRO, A.; CABELLO, J.; VIRGÓS, E.; GONZÁLEZ-MIRAS, E.; CASTRO, H. Modeling spatial distribution of European badger in arid landscapes: an ecosystem functioning approach. **Landscape Ecology**, v.29, n.5, p.843-855, mai. 2014. Disponível em: DOI:10.1007/s10980-014-0020-4. Acesso em: 21 jun. 2023.

RIBEIRO, N. S.; SAATCHI, S. S.; SHUGART, H. H.; WASHINGTON-ALLEN, R. A. Aboveground biomass and leaf area index (LAI) mapping for Niassa Reserve, northern Mozambique. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, Washington, v. 113, n. G02, p. 1–13, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JG000550>

SEDANO, F.; DUNCANSON, L.; LISBOA, S.N.; E RIBEIRO, N. Monitoring forest degradation from charcoal production with historical Landsat imagery. A case study in southern Mozambique. **Environ. Res. Lett**, v.15, jan. 2020. Disponível em: DOI 10.1088/1748-9326/ab3186. Acesso em: 21 jun. 2022.

SEDANO, F. et al. The connection between forest degradation and urban energy demand in sub-Saharan Africa: a characterization based on high-resolution remote sensing data. **Environmental Research Letters**, v.16, mai. 2021. Disponível: DOI 10.1088/1748-9326/abfc05. Acesso em: 21 jun. 2022.

SETIAWAN, Y.; YOSHINO, K.; PRASETYO, L. B. Characterizing the dynamics change of vegetation cover on tropical forestlands using 250m multi-temporal MODIS EVI, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.26, p.132-144, fev. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.06.008>. Acesso em: 14 jun. 2022.

SCHWARTZ G.; FALKOWSKI, V.; PEÑA-CLAROS M. Natural regeneration of tree species in the Eastern Amazon: Short-term responses after reduced-impact logging. **Forest Ecology and Management**, v.385, p.97-103, fev. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112716310842>. Acesso em: 24 jun. 2023.

SHI, Y.; WANG, Z.; ZHANG, G.; WEI, X.; MA, W.; YU, H. Evaluating the Research Status of the Remote Sensing-Mediated Monitoring of Forest Biomass: A Bibliometric Analysis of WOS. **Forests**, v.15, n.524, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f15030524>. Acesso em 19 nov. 2024.

SILVA, C. V. S. Monitoramento da cobertura vegetal por sensoriamento remoto no semiárido brasileiro através de índices de vegetação. **Nativa, Sinop**, Recife, v.7, n.6, p.708-717, nov. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i6.7646>. Acesso em 11 nov. 2022.

SILVA, D. A. L.; CARDOSO, E. A. C.; VARANDA, L. D.; CHRISTOFORO, A. L.; MALINOVSKI, R. A. Análise de viabilidade econômica de três sistemas produtivos de carvão vegetal por diferentes métodos. **Revista Árvore**, v.38, n.1, p.185-93, fev. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000100018>. Acesso em: 24 jun. 2023.

SILVA FILHO, D. F.; NASCIMENTO, C. R.; ANDRADE, A. L. Relação entre índices de vegetação e biomassa em florestas tropicais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 44, n. 1, p. e440102, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-908820200000010>

SITOE & TCHAUQUE. **Avaliação dos níveis de consumo da energia de biomassa nas províncias de Tete, Nampula, Zambézia, Sofala, Gaza e Maputo**. Relatório final. Ministério da Energia. Maputo, Moçambique. 2007.

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no Estado de Mato Grosso. **Nativa**, v.1, p.34-43, nov. 2013. Disponível em: DOI:10.14583/2318-7670.v01n01a07. Acesso em 11 nov. 2022.

SUN, W.; LIANG, S.; XU, G.; FANG, H.; DICKINSON, R. Mapping plant functional types from MODIS data using multisource evidential reasoning. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.3, p.1010-1024, mar. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.022>. Acesso em 3 out. 2022.

TRENTIN, A. B.; SALDANHA, D. L.; KUPLICH, T. M. Análise comparativa do NDVI em fitofisionomias na bacia hidrográfica do Rio São Marcos. **Rev. Geogr. Acadêmica**, v.7, n.1, jul. 2013. Disponível em: DOI:10.18227/1678-7226rga.v7i1.2994. Acesso em 11 nov. 2022.

TATSUMI, S. Tree diversity effects on forest productivity increase through time because of spatial partitioning. **Forest Ecosystems**, v. 7, n. 24, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00238-z>. Acesso em 11 nov. 2023.

TURNER, W.; SPECTOR, S.; GARDINER, N.; FLADELAND, M.; STERLING, E.; STEININGER, M. Remote sensing for biodiversity science and conservation. **Trends in Ecology and Evolution**, n.18, n.6, jun. 2003, p.306-314. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00070-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00070-3). Acesso em 23 nov. 2022.

VAN DER TOL, C.; VILFAN, N.; DAUWE, D.; CENDRERO-MATEO, M. P.; YANGA, P. The scattering and re-absorption of red and near-infrared chlorophyll fluorescence in the models Fluspect and SCOPE. **Remote Sensing of Environment**, v.232, 111292, out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111292>. Acesso em 23 nov. 2022.

VAN LEEUWEN, W. J. D.; ORR, B. J. Spectral vegetation indices and uncertainty: insights from a user's perspective, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.44, n.7, p.1931-1933, ago. 2006. Disponível em: [10.1109/TGRS.2006.873688](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.873688). Acesso em 11 nov. 2023.

VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil. **BNDES Setorial**, v.30, p.237-97, set. 2009. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1661>. Acesso em 23 nov. 2022.

YIP, K. H. A.; LIU, R.; WU, J.; HAU, B. C. H.; LIN, Y.; ZHANG, H. Community-based plant diversity monitoring of a dense-canopy and species-rich tropical forest using airborne LiDAR data, **Ecological Indicators**, v.158, e111346, jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111346>. Acesso em 2 nov. 2024.

ZANETTE, V. H. et al. Ajuste de modelos de regressão para a estimativa da biomassa aérea para seis regiões do estado do Paraná. **Enciclopédia Biosfera**, v.14 n.26; p.29, dez. 2017. Disponível em: DOI: [10.18677/EnciBio\\_2017B3](https://doi.org/10.18677/EnciBio_2017B3). Acesso em 23 nov. 2022.

ZHI-HUI, M.; DENG, L.; FU-ZHOU D.; XIAO-JUAN L.; DAN-YU Q. Angle effects of vegetation indices and the influence on prediction of SPAD values in soybean and maize, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.93, 102198, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102198>. Acesso em 11 nov. 2023.

WANG, X.; OU, T.; ZHANG, W.; RAN, Y. An Overview of Vegetation Dynamics Revealed by Remote Sensing and Its Feedback to Regional and Global Climate. **Remote Sens.**, 14, e5275, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14205275>. Acesso em 2 fev. 2023.

WOOLLEN, E.; RYAN, C. M.; BAUMERT, S.; VOLLMER, F.; GRUNDY, I.; FISHER, J.; LISBOA, S. N. Charcoal production in the Mopane woodlands of Mozambique: what are the trade-offs with other ecosystem services? **Phil. Trans. R. Soc. B**. set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0315>. Acesso em 23 nov. 2022.

## Contribuições de autoria

### 1 – Idolgy Ribeiro dos Santos Mabunda

Doutor em Energia e Meio Ambiente, Professor da Faculdade de Ciências da Terra e Recursos Naturais, Universidade Save

<https://orcid.org/0000-0002-1046-965X> - [idolgym2001@yahoo.com.br](mailto:idolgym2001@yahoo.com.br)

Contribuição: Conceituação, Escrita – primeira redação, Investigação, Metodologia

### 2 – Laurindo António Guasselli

Professor do Dep. de Geografia do Instituto de Geociências, Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<https://orcid.org/0000-0001-8300-846X> - [laurindo.guasselli@ufrgs.br](mailto:laurindo.guasselli@ufrgs.br)

Contribuição: Análise Formal, Escrita – revisão e edição

## Como citar este artigo

Mabunda, I. R. S.; Guasselli, L. A. Biomassa lenhosa em áreas de produção de carvão, distrito de Mabalane-Moçambique. **Geografia Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 30, e91211, 2026. Disponível em: [10.5902/2236499491211](https://doi.org/10.5902/2236499491211). Acesso em: dia mês abreviado. ano.