

Artigos

Índices de vegetação na diagnose nutricional de povoamentos híbridos de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake

Vegetation indices in the nutritional diagnosis of hybrid stands of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake

Juliana Carvalho Barbosa Ramos¹ , Elton da Silva Leite¹ ,
Everton Luís Poelking¹ , Luis Carlos de Freitas¹ , Iago Nery Melo^{1,2} ,
Ricardo Previdente Martins^{1,3} , João Albany Costa¹ 

¹Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, Brasil

²Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA, Brasil

³Bracell, Alagoinhas, BA, Brasil

RESUMO

O sensoriamento remoto, por meio das técnicas de razão de bandas para o monitoramento nutricional de plantios clonais de eucalipto, é fundamental para garantir a sanidade, produtividade e reduzir custos de empreendimentos florestais. Objetivou-se aplicar índices de vegetação a partir de imagens de satélite de alta resolução na diagnose nutricional de macronutrientes em plantios de híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. O estudo foi realizado em 62 áreas de seis municípios do estado da Bahia sob cultivo de plantios homogêneos de eucalipto, com idades entre 1,3 e 1,8 anos. O delineamento foi inteiramente casualizado com seis tratamentos constituídos pelo regime pluviométrico (1000 a 1300 mm ano⁻¹ e 1300 a 1600 mm ano⁻¹) e tipos de solo (classe e textura). A diagnose nutricional de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) foi realizada a partir da análise foliar e da determinação dos índices de vegetação: índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de diferença normalizada da água (NDWI) e índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI). As áreas avaliadas possuem alto vigor (NDVI > 0,70) e os maiores valores foram observados nas regiões chuvosas (1300 a 1600 mm ano⁻¹) (médio de 0,78). O índice NDWI apresenta maior correlação para os teores médios de Ca e Mg. Os índices NDVI, NDWI e SAVI apresentam forte correlação entre si (-0,97 a 1,00) e podem auxiliar no mapeamento do vigor e consequentemente na produtividade de eucalipto.

Palavras-chave: Manejo florestal; Sensoriamento remoto; Macronutrientes



ABSTRACT

Remote sensing through band ratio techniques for nutritional monitoring of clonal eucalyptus plantations is essential to guarantee health and productivity, reducing costs of forestry enterprises. The objective was to apply vegetation indices from high resolution satellite images in the nutritional diagnosis of macronutrients in plantations of clonal hybrids of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. The study was carried out in 62 areas of six municipalities in the state of Bahia under cultivation of homogeneous eucalyptus plantations, aged between 1.3 and 1.8 years. The design was completely randomized with six treatments constituted by the rainfall regime (1000 to 1300 mm year⁻¹ and 1300 to 1600 mm year⁻¹) and soil types (class and texture). The nutritional diagnosis of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg) and sulfur (S) was performed from leaf analysis and determination of vegetation indices: normalized difference vegetation (NDVI), normalized difference water index (NDWI) and soil adjusted vegetation index (SAVI). The evaluated areas have high vigor (NDVI > 0.70) and the highest values were observed in the rainy regions (1300 to 1600 mm year⁻¹) (mean of 0.78). The NDWI index presents the highest correlation for the average levels of Ca and Mg. The NDVI, NDWI and SAVI indexes present a strong correlation with each other (-0.97 to 1.00) and can help in mapping vigor and consequently in eucalyptus productivity.

Keywords: Forest management; Remote sensing; Macronutrients

1 INTRODUÇÃO

O segmento de base florestal desempenha grande relevância no mercado externo com vendas de R\$ 97,4 bilhões em 2019 (IBÁ, 2020), deixando o Brasil em posição de destaque como o maior exportador de celulose, impulsionando a economia brasileira (CEPEA, 2020). Tal crescimento estimula o investimento em técnicas para aumento da produção florestal e garante a sustentabilidade econômica do empreendimento (MICHELON; ZAMBERLAN; OLIVEIRA NETO; SAMPAIO, 2019).

O aumento da produtividade das florestas é promovido, dentre outros fatores, pelos nutrientes minerais ou orgânicos que são disponibilizados para a cultura (ROCHA; DU TOIT; GONÇALVES, 2019). Nesse contexto, torna-se essencial o monitoramento nutricional como forma de garantir que o povoamento esteja em condições satisfatórias de produtividade, por meio de análises de tecido foliar (CIPRIANI; COSTA; OTTONI; VIEIRA; MENDES; MARCOLAN, 2016) que permitem identificar a ocorrência de eventuais deficiências ou desequilíbrios (EMBRAPA, 2005).



A importância do monitoramento nutricional dos talhões é fundamental para garantir alta produtividade, já que por meio dele é possível manejar as adubações de manutenção que podem ser necessárias após a adubação de plantio (CIPRIANI; COSTA; OTTONI; VIEIRA; MENDES; MARCOLAN, 2016). Contudo, monitorar e realizar coletas foliares em extensas áreas pode se tornar uma atividade onerosa e que exigirá recursos financeiros e humanos elevados.

Além disso, a diagnose visual requer mão de obra altamente capacitada. A automatização deste método, a partir das técnicas de razão de bandas de imagens de alta resolução obtidas por sensores remotos, poderia aumentar a assertividade do monitoramento, visto que a diagnose nutricional constitui indicadores de produtividade vegetal (ALBA; MARCHESAN; MELLO; TRAMONTINA; SILVA; PEREIRA, 2017). Nesse sentido, o sensoriamento remoto (SR) apresenta-se como alternativa para redução de custos e otimização do monitoramento das florestas (BONFATTI JÚNIOR; LENGOWSKI; REESE, 2019).

A interpretação de índices de vegetação (IV's), obtidos a partir de imagens multiespectrais, está entre as ferramentas do SR que podem auxiliar no manejo das florestas (inventário florestal, detecção de pragas e doenças, monitoramento de vigor, por exemplo) e indicar o comportamento espectral dos talhões clonais de eucalipto fotossinteticamente ativos e saudáveis, considerando os resultados encontrados por Alba, Marchesan, Mello, Tramontina, Silva e Pereira (2017) em seu estudo sobre o SR na estimativa de volume de eucalipto e por Ponzoni, Pacheco, Santos, Andrades Filho (2015) na caracterização de dosséis de híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. Além disso, a aplicação do SR no diagnóstico nutricional do eucalipto constitui-se como uma inovação tecnológica no setor florestal, considerando o fato desta tecnologia ser amplamente utilizada para culturas agrícolas (MARIN; ALVES; POZZA; GANDIA; CORTEZ; MATTIOLI, 2019), haja vista a relação dos teores nutricionais das folhas com a resposta espectral de imagens de alta resolução.



Estudos realizados por Crusiol, Nanni, Furlanetto, Silva, Silva, Sibaldelli, Mertz-Henning, Nepomuceno, Neumaier e Farias (2017) e Silva, Vaz, Speranza, Galbieri, Esquero, Villela e Crestana (2019) apontam diferentes métodos de avaliação das paisagens, entre os quais destaca-se o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para analisar a condição de florestas naturais e plantadas.

O Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) constitui um método de avaliação da vegetação sem a interferência do solo (ALBA; MARCHESAN; MELLO; TRAMONTINA; SILVA; PEREIRA, 2017), isto é: sem o efeito que a alta reflectância do solo exerce sobre os alvos ao redor. Destaca-se ainda o Índice de água por diferença normalizada (NDWI) utilizado no monitoramento da vegetação podendo indicar o estado hídrico da vegetação conforme observado por Bertolin, Filgueiras, Venancio e Mantovani (2017) em estudo que comprovou a sensibilidade do NDWI às mudanças espectrais de áreas irrigadas e corroborou com Rodrigues, Morais e Paschoal (2017) na identificação de áreas secas e alagadas.

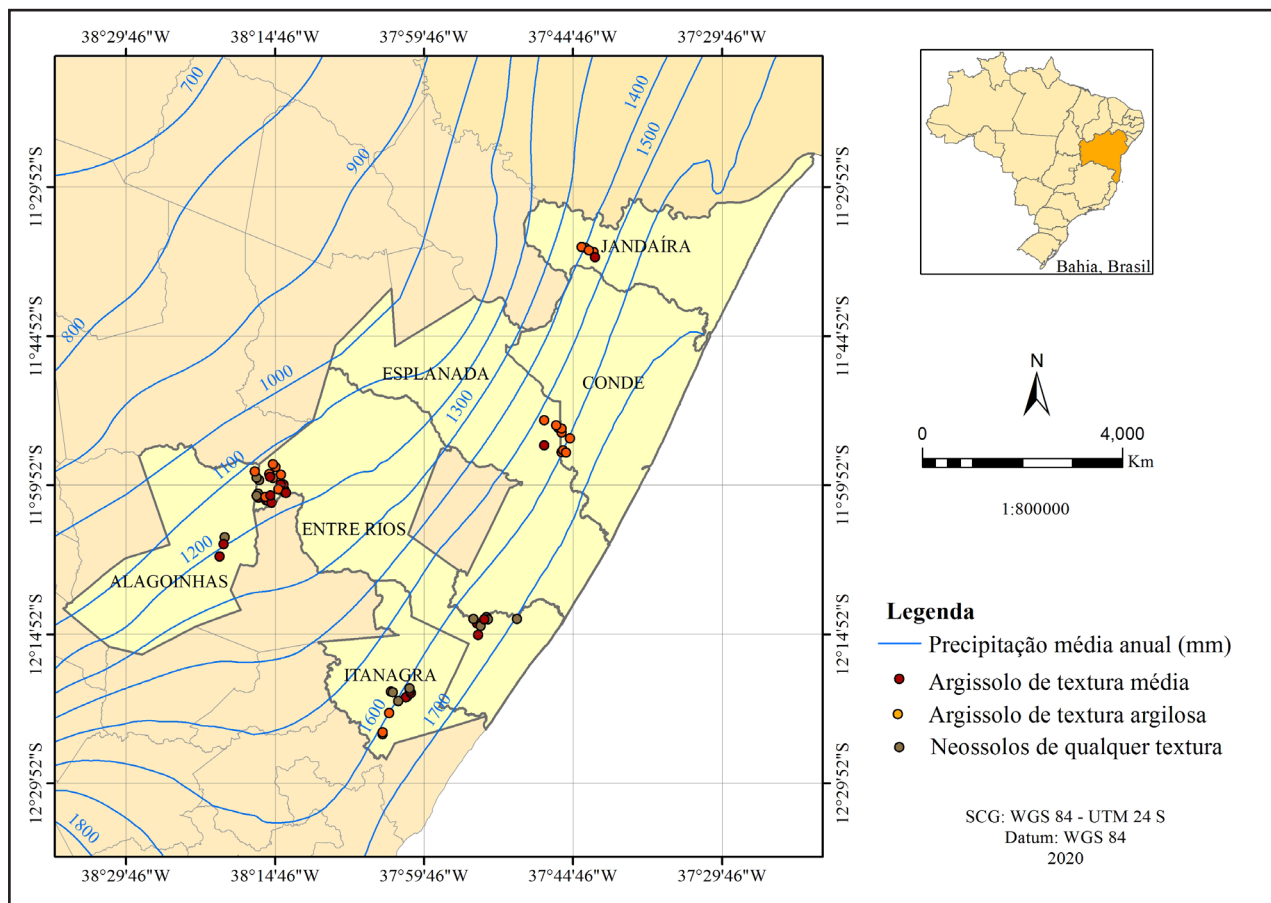
Para otimizar o monitoramento da sanidade florestal, objetivou-se com este trabalho aplicar índices de vegetação a partir de imagens de alta resolução espacial na diagnose nutricional de macronutrientes em povoamentos de híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake na região dos Tabuleiros Costeiros da Bahia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em 61 áreas de plantios homogêneos de híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, espaçamento 9 m² por planta, idade entre 1,3 e 1,8 anos, totalizando uma área de 490,48 hectares, localizadas nos municípios de Itanagra, Esplanada, Alagoinhas, Jandaíra, Conde e Entre Rios, no estado da Bahia, Brasil, na região dos Tabuleiros Costeiros (Figura 1).



Figura 1 – Mapa de localização das áreas cultivadas com híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake na região dos Tabuleiros Costeiros do estado da Bahia, Brasil



Fonte: CPRM (2006)

O clima da região foi classificado como “As” segundo Koppen-Geiger (ALVARES; STAPE; SENTELHAS; GONÇALVES; SPAROVEK, 2013), caracterizado por clima tropical com estação seca de verão e temperatura média anual de 24,3°C (CLIMATE-DATA, 2020). As áreas apresentaram relevo suave-ondulado onde predominam os seguintes tipos de solo: Argissolo amarelo, Argissolo vermelho-amarelo e Neossolo quartzarênico (EMBRAPA, 2018).

As áreas foram identificadas em campo de acordo com a possibilidade de ocorrência de deficiência nutricional (menor crescimento e deformidade nos fustes) e diferenciaram-se no regime pluviométrico, classe e textura de solo (Tabela 1). As



unidades de manejo foram definidas conforme o regime pluviométrico (classes M - mediano com variação de 1000 a 1300 mm ano⁻¹ e classe W - chuvoso com variação de 1300 a 1600 mm ano⁻¹) e três tipos de solo (1 - Argissolos de textura arenosa (0,0 a 0,2 m) e média (0,2 a 0,4 m); 2 - Argissolos coesos de textura média ou argilosa (0,0 a 0,2 m) e argilosa (0,2 a 0,4 m) e 3 - Neossolos de qualquer textura nas camadas de 0,0 a 0,4 m) (Tabela 1).

Tabela 1 – Classificação das unidades de manejo (UM) das áreas sob cultivo de híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake nos Tabuleiros Costeiros do estado da Bahia, Brasil

UM	Pluviosidade anual (mm)	Classe de Solo	Textura	n
			(0 - 0,2 / 0 - 0,4 m)	
M1	1000 - 1300	Argissolos	Arenosa / média	13
M2			Média ou argilosa / argilosa	19
M3		Neossolos	*	8
W1	1300 - 1600	Argissolos	Arenosa / média	6
W2			Média ou argilosa / argilosa	9
W3		Neossolos	*	7
Total				62

Fonte: Autores (2019)

Em que: M = regime pluviométrico “median” (mediano); W = regime pluviométrico “wet” (chuvoso); 1 a 3 = grupos de solo; Textura = classe granulométrica nas camadas superficiais (0 - 0,2 m) e subsuperficiais (0 - 0,4 m); n = número de áreas em cada unidade de manejo (UM); * Textura arenosa, média ou argilosa entre 0,0 e 0,40 m.

As imagens utilizadas foram referentes aos dias: 8 do mês de agosto de 2019 e aos dias 3, 6, 7 e 18 de setembro de 2019 do satélite *Planet* (<https://www.planet.com/>), correspondentes às datas mais próximas ao período de coleta foliar no campo. Os cálculos dos índices de vegetação (IV) foram feitos a partir da álgebra dos *rasters* utilizando o *software ArcGis 10.2*®. Características do sensor encontram-se descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características técnicas do sensor do satélite *Planet*

Resolução espacial* (m)	3,00
Resolução espectral (nm)	Azul: 464 – 517 Verde: 547 – 585 Vermelho: 650 – 682 NIR: 846 – 888
Resolução radiométrica (bits)	16
Resolução temporal (dias)	1
Horário de imageamento (hh:min)	09:30 a 11:30
Altitude de operação (m)	475000
Ortorretificação**	Sim
Correção atmosférica**	Sim
Correção radiométrica**	Sim

Fonte: Planet (2019)

Em que: *Em nadir; **As imagens do *Planet Ortho Scene* são ortorretificadas, redimensionadas para reflectância de superfície, apresentam projeção cartográfica (UTM/WGS84) e são adequadas para aplicações analíticas e visuais; NIR: *near infra-red* (infra-vermelho próximo).

Os valores nutricionais foram estimados por coleta foliar analisados em laboratório (testemunha) e por três índices de vegetação (IV). A coleta de dados para obter os valores foliares, testemunha, foi realizada no período de 26 de agosto a 20 de setembro para realização da diagnose nutricional determinada em laboratório.

A amostragem das folhas em laboratório foi realizada em três parcelas por área para composição de uma amostra composta. Em cada parcela, foram selecionadas 4 árvores de DAP dominante (diâmetro a altura do peito), considerando os ramos localizados nos quatro sentidos (norte, sul, leste e oeste) do terço médio superior das copas. Em cada ramo, foram coletadas a 5ª e a 6ª folha, totalizando 8 folhas por árvore (correspondendo a 32 folhas por parcela) e resultando em uma amostra composta por 96 folhas por área, totalizando 5856 folhas, considerando as 61 áreas de estudo.

As amostras de tecido vegetal foram analisadas para obtenção dos teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, no laboratório *TechSolo* de acordo com os padrões do Programa Interlaboratorial de Análise de Tecido Vegetal (PIATV) promovido pela ESALQ-USP (LIBRELOTTO; PAPPIS; BAUMANN; SANTOS; SANTOS; COSTA, 2019).



Os valores de referência para os teores de macronutrientes nas folhas de eucalipto (Tabela 3) foram adaptados de Librelotto, Pappis, Baumann, Santos, Santos e Costa (2019) e Wadt, Novais, Alvarez, Fonseca e Barros (1998) e referem-se ao padrão nutricional determinados a partir da metodologia *Kenworthy* (IKW), em que o teor ótimo do nutriente e sua variabilidade foram obtidos a partir de sítios florestais de alta qualidade e na metodologia DRIS utilizadas pelo *NuTreeLyptus*.

Tabela 3 – Valores médios do padrão de referência para os teores de macronutrientes nas folhas de híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake

Elemento	Valores adequados (g Kg ⁻¹)
N	23,23
P	1,35
K	8,02
Ca	6,00
Mg	2,24
S	1,43

Fonte: Adaptado de Librelotto, Pappis, Baumann, Santos, Santos e Costa (2019) e Wadt, Novais, Alvarez, Fonseca e Barros (1998)

Os IV avaliados foram: Índice de vegetação por diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) calculado pela Equação (1), Índice de água por diferença normalizada (*Normalized Difference Water Index* - NDWI) calculado pela Equação (2) e Índice de vegetação ajustado ao solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI) calculado pela Equação (3) (ROUSE; HAAS; DEERING; SCHELL, 1973; MCFEETERS, 1996; HUETE, 1988).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

$$NDWI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{NIR}}{\rho_{GREEN} + \rho_{NIR}} \quad (2)$$



$$SAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} * (1 + 0,5) \quad (3)$$

Em que: ρ_{NIR} = reflectância no *near infrared* (infra-vermelho próximo); ρ_{RED} = reflectância no vermelho; ρ_{GREEN} = reflectância no verde; $L = 0,5$ (fator de correção para médias densidades de vegetação).

As áreas estudadas foram vetorizadas para remoção do efeito de borda (faixa de 6 m) e obtenção de dados médios de NDVI, NDWI e SAVI representativos das áreas contendo apenas os *pixels* que não sofreram influência da mistura espectral com áreas externas (BERTOLIN; FILGUEIRAS; VENANCIO; MANTOVANI, 2017). Após o cálculo dos IV, foi feita a estatística zonal por meio da ferramenta *Zonal Statistic (Spatial Analyst)* do *ArcGis 10.2*® para obtenção dos valores médios de cada área estudada.

Os teores médios de macronutrientes foram avaliados pelo teste de média *Tukey* a 5% de significância no *software* R. Para a verificação do grau de associação entre os teores médios de macronutrientes nas folhas de híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e os índices de vegetação, aplicou-se a análise de Correlação Linear de Pearson e a análise de regressão múltipla no *software* SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da análise foliar (testemunha, determinados em laboratório como referência) indicou que não houve deficiência nutricional nos talhões avaliados dentro do intervalo de 95% de confiança, pois os teores de macronutrientes encontram-se acima do padrão nutricional de referência, conforme pode ser observado através do CV (Tabela 4) que demonstra baixa variação dentro da faixa de referência recomendada por Wadt, Novais, Alvarez, Fonseca e Barros (1998), exceto os teores de enxofre que encontraram-se abaixo de 1,43 g Kg⁻¹ nas unidades M1, M2 e W2.



Tabela 4 – Teores médios de macronutrientes obtidos na análise foliar em função das unidades de manejo dos povoamentos de híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake na região dos Tabuleiros Costeiros do estado da Bahia, Brasil

UM		Macronutrientes (g Kg ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Ref.		23,23	1,35	8,02	6,00	2,24	1,43
M1	Média	26,92	2,00	11,12	6,55	2,55	1,32
	CV (%)	14,04	13,07	16,64	8,35	16,24	21,69
M2	Média	28,13	2,14	10,65	7,49	2,70	1,39
	CV (%)	15,38	19,31	12,58	20,23	20,17	23,23
M3	Média	26,44	2,11	11,31	6,73	2,34	1,55
	CV (%)	13,48	11,44	12,14	11,32	15,67	22,61
W1	Média	26,87	1,75	10,12	7,10	2,62	1,63
	CV (%)	18,38	16,85	18,78	20,20	19,25	22,13
W2	Média	27,90	2,03	9,58	6,43	2,41	1,40
	CV (%)	17,25	20,13	28,74	16,40	17,16	29,01
W3	Média	25,07	2,04	10,44	6,64	2,51	1,71
	CV (%)	10,56	10,89	13,84	31,27	15,81	14,46

Fonte: Autores (2019)

Em que: Ref. = Padrão nutricional de referência para os teores de macronutrientes em folhas de híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake; N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; S = enxofre; UM = unidade de manejo; M1 = pluviosidade mediana, Argissolo arenoso ou médio; M2 = pluviosidade mediana, Argissolo argiloso; M2 = pluviosidade mediana, Neossolo arenoso, médio ou argiloso; W1 = pluviosidade chuvosa, Argissolo arenoso ou médio; W2 = pluviosidade chuvosa, Argissolo argiloso; W3 = pluviosidade chuvosa, Neossolo arenoso, médio ou argiloso.

Os teores médios foliares de P e K apresentaram valores mais baixos nas regiões chuvosas (1300 a 1600 mm ano⁻¹) para os três grupos de solo (Tabela 5), corroborando com Costa, Barros, Albuquerque, Moura Filho e Santos (2006) ao salientarem que em alguns solos tropicais os teores de P absorvidos pelas plantas podem ser menores mesmo em condições de alta umidade.

Além disso, o fluxo transpiratório também pode contribuir para o movimento do P nas plantas (PES; ARENHARDT, 2015). Assim, os maiores teores de P nas folhas em regiões com regime pluviométrico mediano (1000 e 1300 mm ano⁻¹) pode estar relacionado com taxas de transpiração superiores àquelas situadas em W1, W2 e W3.



O resultado revelou que apenas os teores médios de enxofre diferiram estatisticamente para os regimes pluviométricos e para os tipos de solo. As maiores médias ocorreram no regime pluviométrico chuvoso (1300 a 1600 mm ano⁻¹) onde o teor médio de enxofre foi de 1,56 g Kg⁻¹ e nos Neossolos (1,70 g Kg⁻¹).

Os teores médios dos demais macronutrientes não diferiram estatisticamente para o regime pluviométrico ou solo, visto que a pluviosidade anual média e os tipos de solo não exerceram influência significativa nos teores foliares de N, P, K, Ca e Mg para o híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake avaliado, demonstrando sua adaptação ao ambiente.

Os maiores valores de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foram observados em M1 e W1 (0,77 e 0,78, respectivamente), onde ocorrem Argissolos com textura arenosa ou média. Já o menor valor de NDVI foi observado em M2 (0,71) onde ocorrem solos argilosos sob regime pluviométrico médio inferior a 1300 mm ano⁻¹.

O valor mais baixo de NDVI em M2 pode ser explicado pela textura e pela pluviosidade média anual, tendo em vista que solos argilosos apresentam maior capacidade de retenção de água (BARBOZA SCHUMANN; WOJAHN; GONÇALVES; TERRA; COLLARES, 2019) e que a menor ocorrência de chuvas na região interfere na absorção de água e conseqüentemente na fotossíntese (PES; ARENHARDT, 2015).

Os valores de NDVI diferiram estatisticamente para o regime pluviométrico, sendo a maior média observada na região de regime chuvoso (NDVI = 0,78) e corroboram com Crusiol, Nanni, Furlanetto, Silva, Silva, Sibaldelli, Mertz-Henning, Nepomuceno, Neumaier e Farias (2017) em estudo no qual observou-se que as regiões de maior disponibilidade hídrica apresentaram maiores valores de NDVI. Portanto, considerando que as condições meteorológicas nos dias que antecederam a aquisição da imagem afetam diretamente a atividade fotossintética, entende-se que no presente estudo a frequência de chuvas na região de regime chuvoso explica a maior média de NDVI, visto que no período de seca tais valores podem variar. Para os tipos de solo, os teores médios de NDVI foram estatisticamente iguais.



Os valores de NDVI encontrados neste estudo corroboraram com Goergen, Kilca, Narvaes, Silva, Silva, Pereira e Adami (2016) em trabalho de mapeamento de áreas com plantios de híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake no segundo ano de plantio a partir de imagem de satélite.

O SAVI apresentou a mesma tendência do NDVI, isso é explicado pelo fato de que esse índice é resultante do ajuste do NDVI (ALBA; MARCHESAN; MELLO; TRAMONTINA; SILVA; PEREIRA, 2017) ao fator de correção do solo ($L = 0,5$) recomendado para médias densidades de vegetação. Assim, o SAVI também diferiu estatisticamente para o regime pluviométrico, sendo a maior média observada em região chuvosa ($SAVI = 1,17$), mas não diferiu estatisticamente para tipos de solo.

O NDWI apresentou valores negativos para todas as UM's, com valores entre -0,79 e -0,69, corroborando com os dados obtidos por Brenner e Guasselli (2015) em estudo onde as áreas classificadas como "não água" apresentaram valores abaixo de zero (-1,0 a -0,10) correspondentes às áreas de produção vegetal, assim como os plantios clonais de eucalipto deste estudo. Considerando o que foi estabelecido por Mc Feeters (1996) e exposto por Brenner e Guasselli (2015) a respeito da aplicação deste índice para o realce do contraste entre vegetação e corpos hídricos, constatou-se que o NDWI automatizou a delimitação dos povoamentos clonais de eucalipto proporcionada pelo uso das bandas do infravermelho próximo ao verde.

Os resultados da análise de correlação binária (Tabela 5) entre os macronutrientes indicaram que houve significância para enxofre (S), nitrogênio (N) e fósforo (P) com valores negativos, demonstrando que as variáveis são inversamente proporcionais, sendo -0,34 para enxofre com nitrogênio e -0,28 para enxofre com fósforo, com 5% e 1% de significância respectivamente. Tais correlações podem ser explicadas pela dinâmica de absorção dos nutrientes minerais pelas plantas, tendo em vista a importância do enxofre nos processos de assimilação do P e N e a deficiência de S causada pela adubação com NPK (OLIVEIRA; GATIBONI; BRUNETTO; MIQUELLUTI; VALICHESKI, 2017; ROCHA; GONÇALVES; GODINHO; SOUZA FILHO, 2015).



Tabela 5 – Tabela da análise de correlação binária de Pearson dos valores dos índices de vegetação dos macronutrientes em plantios de eucalipto no estado da Bahia, Brasil

	N	P	K	Ca	Mg	S	NDVI	NDWI	SAVI
P	0,12	1							
K	0,01	0,36**	1						
Ca	0,11	0,04	0,19	1					
Mg	0,14	0,22	0,03	0,32*	1				
S	-0,34**	-0,28*	-0,17	-0,19	0,06	1			
NDVI	-0,15	0,18	-0,05	-0,31*	0,15	0,07	1		
NDWI	0,17	-0,16	0,05	0,35**	-0,16	-0,13	-0,97**	1	
SAVI	-0,15	0,18	-0,05	-0,30*	0,15	0,07	1,00**	-0,97**	1

Fonte: Autores (2019)

Em que: * = 5% de significância; ** = 1% de significância; N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; S = enxofre. Σ = soma dos teores médios de todos os macronutrientes; NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index* (índice de vegetação por diferença normalizada); NDWI = *Normalized Difference Water Index* (índice da diferença normalizada da água); SAVI = *Adjusted Vegetation Index to Soil* (índice de vegetação ajustado ao solo).

Também houve correlação significativa para potássio com fósforo e cálcio com magnésio (Tabela 6) aos níveis de 1 e 5% de significância, respectivamente. Os valores positivos revelaram a relação proporcional entre os teores de macronutrientes, sendo altamente significativo para potássio com fósforo (0,36) e significativo para cálcio com magnésio (0,32). Porém, os graus de associação entre os teores foram baixos, o que pode ser explicado pela distinção entre as grandezas dos teores relacionados (Tabela 5).

Para todos os índices de vegetação avaliados, a análise de correlação binária revelou significância para os teores de cálcio (Tabela 6), sendo o NDWI o índice que apresentou maior correlação (0,35), com 1% de significância. Contudo, observou-se baixo grau de associação para os IV na determinação do estado nutricional do cálcio nas folhas de eucalipto.

A análise de correlação binária (Tabela 5) também demonstrou que houve significância nas correlações do NDVI com o NDWI e o SAVI. Para o NDWI, a correlação foi de -0,97 a 1% de significância, por serem índices inversamente proporcionais,



mas para o SAVI a correlação foi de 1,00, corroborando com Alba, Marchesan, Mello, Tramontina, Silva e Pereira (2017). Portanto, os resultados demonstraram o vigor do povoamento de eucalipto descrito pelo NDVI, tendo a influência da água no processo fotossintético na produção vegetal e produtividade (PES; ARENHARDT, 2015).

A análise de regressão múltipla para cálcio (Ca) e magnésio (Mg), com os índices de vegetação, demonstrou que o NDWI foi o índice que obteve maior R^2 (0,208). Apesar de apresentar R^2 muito baixo, a existência de correlação entre NDWI, Ca e Mg reforça que os índices de vegetação constituem uma importante ferramenta de precisão para o monitoramento de plantios florestais (ALBA; MARCHESAN; MELLO; TRAMONTINA; SILVA; PEREIRA, 2017; PONZONI; PACHECO; SANTOS; ANDRADES FILHO, 2015).

4 CONCLUSÕES

As 61 áreas avaliadas possuem valores de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) superiores a 0,70. Contudo, as UM localizadas em região chuvosa (1300 a 1600 mm ano⁻¹) apresentaram maiores médias.

O índice NDWI (índice de Água por Diferença Normalizada) apresenta maior correlação para os teores médios de Ca e Mg. Os índices NDVI, NDWI e SAVI (Índice de vegetação ajustado ao solo) apresentam forte correlação entre si (-0,97 a 1,00) e podem auxiliar no mapeamento do vigor e conseqüentemente na produtividade de eucalipto.

Os demais macronutrientes não apresentaram correlações significativas com NDVI, NDWI ou SAVI nas condições deste estudo para os povoamentos clonais de eucalipto no segundo ano de idade.

Recomendam-se estudos complementares considerando diferentes condições nutricionais (deficiência, teores adequados e toxidez) para investigação dos graus de correlação entre os índices NDVI, NDWI e SAVI e os teores médios de Ca no eucalipto.

A influência da água na correlação dos índices com as médias dos teores de macronutrientes se manifesta com as maiores médias de NDVI e SAVI nas regiões de regime pluviométrico chuvoso.



REFERÊNCIAS

- ALBA, E.; MARCHESAN, J.; MELLO, E. P.; TRAMONTINA, J.; SILVA, E. A.; PEREIRA, R. S. Uso de imagens de média resolução espacial para o monitoramento de dosséis de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 4, p. 1-8, 2017.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BARBOZA, G. dos S.; SCHUMANN, P. K.; WOJAHN, V. de S.; GONÇALVES, G. M. S.; TERRA, V. S. S.; COLLARES, G. L. Determinação das curvas de retenção de água no solo em diferentes topossequências de uma pequena bacia hidrográfica no sul do Brasil. In: XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2019.
- BERTOLIN, N. O.; FILGUEIRAS, R.; VENANCIO, L. P.; MANTOVANI, E. C. Predição da produtividade de milho irrigado com auxílio de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 4, p. 1627-1638, 2017.
- BONFATTI JÚNIOR, E. A.; LENGOWSKI, E. C.; REESE, E. Monitoramento da sobrevivência de *Eucalyptus* spp. por imagens obtidas por VANTS. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 3, p.220-226, 2019.
- BRENNER, V. C.; GUASSELLI, L. A. Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) para Identificação de Meandros Ativos no Leito do Canal do Rio Gravataí/RS - Brasil. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...** 2015.
- CEPEA. **Informativo Setor Florestal - Fevereiro 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/revista/pdf/0968381001585680770.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2020.
- CIPRIANI, H. N.; COSTA, M. F. G.; OTTONI, A. M.; VIEIRA, A. H.; MENDES, A. M.; MARCOLAN, A. L. Teores foliares de N, P e K em eucaliptos sob diferentes adubações em Porto Velho, Rondônia. I Reunião de Ciência do Solo do Núcleo Noroeste. **Anais...** Rolim de Moura - RO: 2016.
- CLIMATE-DATA. **Dados climáticos da Bahia**. 2020. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/bahia-207/>. Acesso em: 2 abr. 2020.
- COSTA, J. P. V.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 828-835, 2006.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Atlas pluviométrico do Brasil**. 2006.
- CRUSIOL, L.G.T.; NANNI, M.R.; FURLANETTO, R.H.; SILVA, G.F.C.; SILVA, M.C.; SIBALDELLI, R.N.R.; MERTZ-HENNING, L.M.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J.R.B. Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento do déficit hídrico na cultura da soja. In: **Embrapa Soja- Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, 12., 2017, Londrina. Resumos expandidos... Londrina: Embrapa Soja, 2017. p. 119-127., 2017.



EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018.

EMBRAPA. **Interpretação de Resultados de Análise Foliar**. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2005.

GOERGEN, L. C. G.; KILCA, R. V.; NARVAES, I. S.; SILVA, M. N.; SILVA, E. A.; PEREIRA, R. S.; ADAMI, M. Distinção de espécies de eucalipto de diferentes idades por meio de imagens TM/Landsat 5. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 1, p. 53-60, 2016.

HUETE, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. **International Agrophysics**, v. 4, n. 4, p. 367-376, 1988.

IBÁ. **Relatório 2019**. 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 18 maio. 2020.

KURIHARA, C. H.; MAEDA, S.; ALVAREZ, V. V. H. Interpretação de resultados de análise foliar. **Embrapa Agropecuária Oeste-Documentos (INFOTECA-E)**, 2005.

LIBRELOTTO, M.; PAPPIS, C.; BAUMANN, L.; SANTOS, R. B.; SANTOS, R. O.; COSTA, A. B. Preparo de amostras para análise foliar por decomposição ácida assistida por radiação micro-ondas. Seminário de Iniciação Científica. **Anais...** p. 173, 2019.

MARIN, D. B.; ALVES, M. C.; POZZA, E. A.; GANDIA, R. M.; CORTEZ, M. L. J.; MATTIOLI, M. C. Sensoriamento remoto multiespectral na identificação e mapeamento das variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro 1. **Revista Ceres**, v. 66, n. 2, p. 142-153, 2019.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**. v 17, 1425-1432, 1996.

MICHELON, D.; ZAMBERLAN, J. F.; OLIVEIRA NETO, D.; SAMPAIO, M. I. R. Uso do sensoriamento remoto com VANT's: possibilidade de aquisição de dados para agricultura. **Ciência & Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 23-35, 29 jul. 2019.

OLIVEIRA, R. J. P.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; MIQUELLUTI, D. J.; VALICHESKI, R. R. Resposta da beterraba a adubação com nitrogênio, enxofre e micronutrientes em um Cambissolo Háplico. **Horticultura Brasileira**, v. 35, n. 1, p. 63-68, 2017.

PES, L. Z.; ARENHARDT, M. H. **Fisiologia Vegetal**. 1. ed. Santa Maria - RS: Colégio Politécnico da UFSM, 2015.

PONZONI, F. J.; PACHECO, L. R. F.; SANTOS, S. B.; ANDRADES FILHO, C. O. Caracterização espectro-temporal de dosséis de *Eucalyptus* spp. Mediante dados radiométricos TM/Landsat5. **Revista Cerne**, v. 21, n. 2, p. 267-275, 2015.

ROCHA, J. H. T.; GONÇALVES, J. L. de M.; GODINHO, T. de O.; SOUZA FILHO, L. F. da S. **Nutrição e fertilização com enxofre e uso de gesso em plantações de eucalipto**. São Paulo - SP, 2015.

ROCHA, J. H. T.; DU TOIT, B.; GONÇALVES, J. L. de M. Ca and Mg nutrition and its application in eucalyptus and pinus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 442, n. January, p. 63-78, 2019.



RODRIGUES, W. B.; MORAIS, F. de; PASCHOAL, L. G. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) calculado para estações chuvosas e secas na bacia do Córrego Barreiro, Lagoa da Confusão – TO. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. **Anais...2017**.

ROUSE, J. W.; HAAS R. H.; DEERING, D. W.; SCHELL, J. A. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Texas A&M University Remote Sensing Center, p. 120, 1973.

SILVA, F. S.; VAZ, C. M. P.; SPERANZA, E.; GALBIERI, R.; ESQUERO, J. C. D. M.; VILLELA, J. M.; CRESTANA, S. Correlações da produtividade do algodoeiro com índices de vegetação obtidos por séries temporais de imagens de satélite. In: **Embrapa Instrumentação - Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 2019, São Carlos, SP. Ciência, inovação e mercado: anais. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2019. Editores: Paulino Ribeiro Villas-Boas, Maria Alice Martins, Débora Marcondes Bastos Pereira Milori, Ladislau Martin Neto. SIAGRO 2019, 2019.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; FONSECA, S.; BARROS, N. F. Valores de referência para macronutrientes em eucalipto obtidos pelos métodos DRIS e chance matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 685-692, 1998.

Contribuição de Autoria

1 Juliana Carvalho Barbosa Ramos

Engenheira Florestal, Mestranda

<https://orcid.org/0000-0002-4980-3619> • julianacarvalhoufrb@gmail.com

Contribuição: Pesquisa; Análise de dados; Redação do manuscrito original; Escrita – revisão e edição; Recebimento de financiamento

2 Elton da Silva Leite

Professor

<https://orcid.org/0000-0002-6541-287X> • elton@ufrb.edu.br

Contribuição: Validação de dados e experimentos; Supervisão; Escrita – revisão e edição

3 Everton Luís Poelking

Professor

<https://orcid.org/0000-0002-4531-8341> • everton@ufrb.edu.br

Contribuição: Validação de dados e experimentos; Supervisão; Escrita – revisão e edição



4 Luis Carlos de Freitas

Professor

<https://orcid.org/0000-0002-8448-0843> • luisfreitas@uesb.edu.br

Contribuição: Validação de dados e experimentos; Supervisão; Escrita – revisão e edição

5 Iago Nery Melo

Supervisor de Pesquisa e Desenvolvimento

<https://orcid.org/0009-0007-9481-9146> • iago_Melo@bracell.com

Contribuição: Disponibilização de ferramentas

6 Ricardo Previdente Martins

Pesquisador Florestal em Nutrição do Solo e Plantas

<https://orcid.org/0000-0003-2632-3433> • Ricardo_Martins@bracell.com

Contribuição: Disponibilização de ferramentas; Supervisão

7 João Albany Costa

Professor

<https://orcid.org/0000-0002-0539-0031> • albany@ufrb.edu.br

Contribuição: Validação de dados e experimentos

Como citar este artigo

RAMOS, J. C. B.; LEITE, E. S.; POELKING, E. L.; FREITAS, L. C.; MELO, I. N.; MARTINS, R. P.; COSTA, J. A. Índices de vegetação na diagnose nutricional de povoamentos híbridos de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 33, n. 2, e65702, p. 1-18, 2023. DOI 10.5902/1980509865702. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509865702>.