

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) PARA A PREDIÇÃO DE NITROGÊNIO FOLIAR EM CAFEEIRO

Maísa Martins de Oliveira, João Victor Gomes Ramos, Lucas Antônio Galvão Lima, Vitor Barros Lima, Samuel de Assis Silva.

Universidade Federal do Espírito Santo/Departamento de Engenharia Rural, Alto Universitário, S/N - Guararema, Alegre - ES, 29500-000, maisamartins20@gmail.com, joaogomesr12@gmail.com, lucasgalvaolima80@gmail.com, contatovitorbarroslima@gmail.com, samuel.assilva@gmail.com

Resumo

O café tem grande relevância econômica no Brasil e o manejo do nitrogênio (N) é essencial para altas produtividades. Nesse contexto, o NDVI destaca-se como índice de sensoriamento remoto rápido, preciso e não destrutivo para avaliar o estado nutricional das plantas. Este trabalho teve como objetivo avaliar espacial e temporalmente o NDVI e estabelecer sua correlação com os teores foliares de nitrogênio em cafés. O estudo foi realizado em lavoura comercial de *Coffea arabica* no sul do Espírito Santo, com 100 pontos amostrais georreferenciados. O NDVI foi mensurado com sensor GreenSeeker e o N foliar determinado em laboratório. Os dados foram analisados por estatística descritiva, geoestatística, regressão e krigagem. Os resultados mostraram variabilidade espacial para todas as variáveis, com predominância do modelo gaussiano e dependência espacial moderada. A correlação significativa entre NDVI e nitrogênio ocorreu apenas em novembro, sendo negativa, e a regressão ajustada apresentou baixa acurácia preditiva. Conclui-se que, apesar da estabilidade temporal do NDVI, o índice não é eficiente para estimar o estado nutricional nitrogenado do café.

Palavras-chave: *Coffea arabica*. Índices de vegetação. Sensoriamento remoto.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias, Agronomia

Introdução

O café ocupa uma posição de destaque na economia brasileira, sendo o maior exportador do grão do mundo (Almeida *et al.*, 2017; G1, 2025). Entende-se que o equilíbrio nutricional é um fator importante para a obtenção de altas produtividades. Por isso, durante o ciclo produtivo, é necessário que haja o monitoramento e gerenciamento nutricional da lavoura.

A Agricultura de Precisão (AP) vem se tornando uma ferramenta importante para a avaliação nutricional das lavouras. Entre as técnicas da AP, o sensoriamento remoto (SR) permite a obtenção de informações das propriedades ópticas das folhas e da comunidade de plantas, como transmitância, refletância e fluorescência, que representa uma forma indireta de avaliar o estado nutricional de uma cultura (Turra, 2016).

O nitrogênio (N) é o nutriente que mais contribui para a produção de café porque é um constituinte de proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos, citocromos, cafeína e clorofila (De Souza *et al.*, 2023). Como o N está relacionado aos processos fisiológicos mais importantes que ocorrem nas plantas, a deficiência deste elemento pode afetar a estrutura celular e, consequentemente, a refletância no infravermelho próximo (Martins, 2016). Além disso, entender sua distribuição nas lavouras e como está a nutrição da lavoura ao longo do ciclo produtivo, é de extrema importância, já que é um elemento essencial para as diferentes fases do café (vegetativa, florescimento, chumbinho, chumbão, maturação).

As leituras de refletância do dossel usando duas ou mais bandas de ondas específicas são usadas para desenvolver índices de vegetação espectrais (SVI) (Da Silva, 2023). Os SVI são amplamente utilizados para definir zonas de manejo, monitorar a saúde das lavouras, além de serem utilizados como indicadores de biomassa, produtividade e manejo nutricional (Souza, 2022).

Entre os diversos índices de vegetação o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos índices fornecidos pelos sensores de vegetação que tem ganhado destaque na

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

utilização para avaliação da biomassa, conteúdo de clorofila e teor de nitrogênio nas plantas (Islam et al., 2021). Portanto, o NDVI se torna uma opção viável para o setor, uma vez que as avaliações são rápidas, precisas e não-destrutivas, podendo reduzir custos (Costa, 2023).

O objetivo do presente trabalho foi avaliar espacial e temporalmente o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e estabelecer a sua correlação espacial com os teores foliares de nitrogênio.

Metodologia

O estudo foi realizado, em uma lavoura comercial de café arábica localizada no sul do estado do Espírito Santo. O experimento foi conduzido em uma área inclinada. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (Santos et al., 2018).

Para atendimento dos objetivos propostos, os dados foram coletados em uma grade amostral irregular contendo 100 pontos amostrais. Cada ponto amostral é composto por três plantas de café, onde foram realizadas as mensurações das variáveis envolvidas no estudo. Os pontos amostrais foram georreferenciados utilizando-se aparelho DGPS, com correção pós-processada, para a obtenção do posicionamento vertical e horizontal.

O NDVI das plantas de café foi avaliado utilizando sensor ótico ativo, modelo GreenSeeker Portátil (Handheld Crop Sensor - TM). O GreenSeeker é um sensor portátil dotado de dois canais que emitem radiação ativa nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo. A luz refletida pelas plantas é capturada por um fotodiodo detector, identificando a resposta espectral das plantas. Na caixa de controle que acompanha o equipamento, os dados são processados, sendo calculado o valor do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), conforme Ntech Industries (2017). Para este estudo foram avaliados, independentemente, o terço superior, médio e inferior da copa dos cafeeiros. As informações foram levantadas ao longo das linhas de plantio, amostrando a copa das plantas nos lados voltados para as entrelinhas. As avaliações foram realizadas em cada estágio fenológico da cultura, num intervalo máximo de três meses entre cada medida.

Para a determinação do teor foliar de nitrogênio foram coletadas em cada planta de cada ponto amostral folhas do terceiro ou quarto par de ramos centrais, nos quatro quadrantes da copa dos cafeeiros. As folhas coletadas foram limpas com água destilada, acondicionadas em sacos de papel devidamente identificados e colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar em temperaturas variando de 65 a 70° C até peso constante. Após a secagem, as amostras de folha foram enviadas a laboratório particular para determinação dos teores foliares de nitrogênio.

Os dados de NDVI e os teores foliares de nitrogênio da cultura foram, inicialmente, analisados pela estatística clássica para determinação das medidas de posição, dispersão e forma da dispersão. Na sequência, os dados foram submetidos a análises geoestatísticas, a fim de verificar a existência e, neste caso, quantificar o grau de dependência espacial, a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de variogramas experimentais, conforme equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x)_i - Z(x_i + h)]^2$$

Em que: $N(h)$ = é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h .

No ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais, serão determinados os coeficientes efeito pepita, patamar, variância estrutural e alcance. Os modelos testados serão o esférico, exponencial, gaussiano e linear. A escolha seguirá o critério dos mínimos quadrados, optando-se pelo maior valor de coeficiente de determinação, menor soma de quadrado dos resíduos e maior valor do coeficiente de correlação obtido na validação cruzada. Comprovada a dependência espacial, serão construídos os mapas de distribuição espacial, utilizando-se a krigagem ordinária.

As correlações foram mensuradas através do coeficiente de Pearson ao nível de 5% de probabilidade. Os dados de NDVI foram correlacionados entre si para avaliar a estabilidade temporal do vigor vegetativo das plantas ao longo de um ciclo de cultivo.

Através de análise de regressão múltipla espacial, foram geradas equações para estimativa de produtividade e do estado nutricional das plantas a partir dos índices de vegetação. Essas análises

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

foram realizadas com o intuito de gerar meios de determinar modelos indiretos para a adoção de manejos localizados na cultura do cafeeiro.

Para avaliar a concordância espacial entre as diferentes variáveis, estudando a similaridade espacial entre elas, estas foram submetidas a uma classificação não-supervisionada utilizando o algoritmo K-means. A concordância entre classes dos agrupamentos foi avaliada a partir do coeficiente Kappa. O Kappa está alicerçado no número de respostas concordantes, ou seja, no número de casos cujo resultado é o mesmo entre as diferentes classes.

Resultados

Os modelos e parâmetros para os valores de NDVI mensurado em diferentes períodos e para o nitrogênio foliar (N) são apresentados na Tabela 1. O modelo que melhor se ajustou aos dados foi o gaussiano, com exceção do NDVI em novembro (linear com patamar) e o N para o esférico. A variável N foliar apresentou alta variabilidade. Lima et al. (2013) comentam que variáveis que apresentam elevado alcance tendem a produzir mapas temáticos de melhor qualidade, com menos desvios na interpolação por krigagem.

Tabela 1. Modelos e parâmetros dos variogramas médios para o NDVI e o nitrogênio (N) foliar.

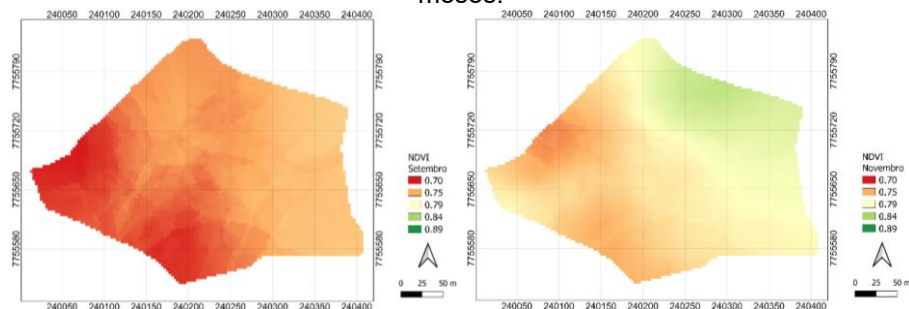
Variável	Modelo	C ₀	C ₀ + C	a	IDE	R ²	R ² (VC)
Setembro	Gaussiano	12.06	18.54	246	65.05	76	12.6
Novembro	L. Patamar	7.39	16.21	205	45.59	89	26.4
Dezembro	Gaussiano	5.56	15	238	37.07	93	38.9
Fevereiro	Gaussiano	3.01	4.34	247	69.35	61	8.80
N	Esférico	3.81	5.41	82	70.43	75	1.70

L. Patamar – linear com patamar; C₀ – efeito pepita; C₀+C – patamar; a – alcance (m); IDE – índice de dependência espacial (%); RSS – erro quadrático médio; R² – coeficiente de determinação (%).

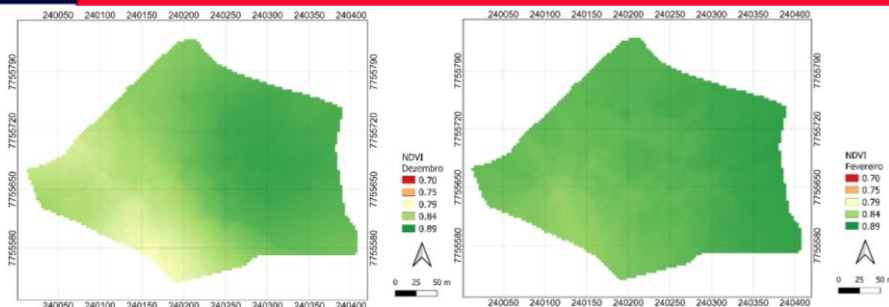
Para o índice de dependência espacial (IDE), conforme a classificação de Cambardella et al. (1994), todas as variáveis apresentaram dependência moderada, com valores próximos a 60%, com exceção do NDVI mensurado em dezembro. Os erros de ajuste dos modelos foram baixos, bem como o coeficiente de determinação foi de médio a alto.

Comprovada a dependência espacial os dados foram interpolados utilizando a krigagem ordinária. Os mapas de NDVI mensurados em diferentes períodos são apresentados na Figura 1. Em linhas gerais, é possível observar que, em todos os meses, o NDVI foi inferior na parte superior da área e superior na parte inferior da área, apesar dos valores absolutos terem sido diferentes. Em todos os meses o NDVI apresenta um gradiente com aumento nos valores à medida que se avança para cotas mais baixas no terreno.

Figura 1. Mapas temáticos do NDVI dos cafeeiros, medido a partir do Greenseeker em diferentes meses.



A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO



Fonte: Os autores (2022).

Analisando a correlação entre o NDVI e o N foliar (Tabela 2), esta foi significativa apenas para o mês de novembro (negativa). A ausência de correlação entre os demais meses com o N, porém com valores próximos, retrata a estabilidade temporal para o NDVI na área, haja vista que a distribuição desta é semelhante em diferentes períodos, conforme discutido.

Tabela 2. Correlação linear espacial entre NDVI e Nitrogênio (N) foliar.

Meses	N
Setembro	0.008
Novembro	-0.369
Dezembro	-0.118
Fevereiro	-0.047

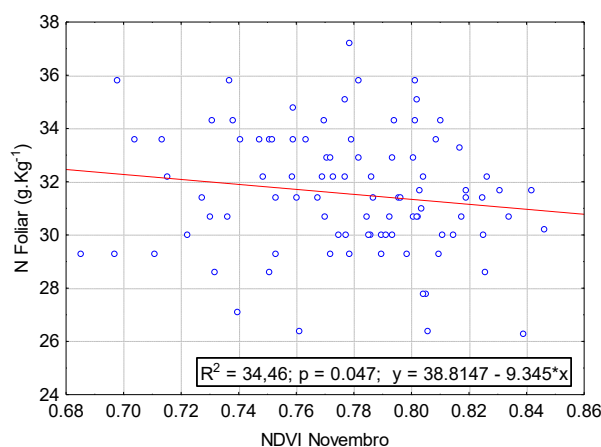
Fonte: Os autores.

A correlação linear espacial do NDVI e nitrogênio (N) para o mês de novembro foi negativa, significando que as variáveis em estudo, NDVI mensurado e os valores dos teores de nitrogênio (N), possuem distribuição inversa. Onde, o valor do teor de nitrogênio foliar decresce os valores do NDVI é crescente.

Visa prever os valores de N foliar foi ajustado um modelo de regressão linear. O modelo foi construído utilizando apenas as leituras de NDVI que se correlacionaram com a produtividade dos cafeeiros, haja vista que a ausência de correlação indica que a impossibilidade de envolver a variável pois esta tem distribuição não coincidente com a outra de interesse.

O modelo linear ajustado, bem como a dispersão, é apresentado na Figura 2. O modelo ajustado é significativo, bem como seus coeficientes. O valor do coeficiente de determinação do modelo foi mediano (38,8147%) o que indica instabilidade na predição do N no tecido foliar do cafeeiro.

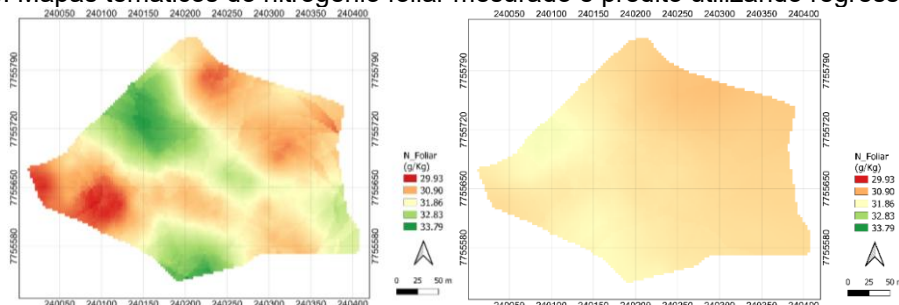
Figura 2. Regressão linear para a predição do nitrogênio (N) foliar e dispersão dos valores de N em relação ao NDVI mensurado no mês de novembro.



Fonte: Os autores.

A partir do modelo foram preditos valores de N foliar, sendo estes representados no mapa da Figura 3. Nos mapas da referida figura observa-se que a regressão não foi capaz de prever com exatidão os valores de N foliar e nem de descrever a sua variabilidade espacial. Apesar de o mapa predito indicar um crescimento nos valores de N à medida que as cotas do terreno aumentam, a amplitude de variação deste foi muito menor e, conseqüentemente, as mudanças nos valores foram mais suaves ao longo da área.

Figura 3. Mapas temáticos do nitrogênio foliar medido e predito utilizando regressão linear.



Fonte: Os autores.

Independentemente do mapa, os valores de N foliar para a lavoura em estudo ficaram entre 29,93 e 33,79 g.kg⁻¹, indicando que, em linhas gerais, as plantas não apresentavam deficiência nutricional para esse nutriente, sendo a quase totalidade da área classificada como alta. Apesar deste fato, os valores preditos ficaram mais próximos do limite inferior, não apresentando nenhum valor próximo ao limite superior, diferentemente dos valores advindos daqueles observados.

Discussão

Por apresentarem patamares bem definidos, fica comprovado o atendimento às hipóteses básicas e os pressupostos geoestatísticos, indicando, por exemplo, a não existência de tendência de distribuição nos dados (Morari *et al.*, 2009).

Comparando os diferentes meses, é possível observar que os valores de NDVI vão aumentando com o passar dos meses, sendo os menores observados em setembro e maiores em fevereiro. Os menores valores em setembro podem estar associados ao efeito de desfolha que o processo de derriça ocasiona, comprometendo a arquitetura da planta e a sua área foliar.

Silva *et al.* (2021) comentam que para ser utilizada na agricultura de precisão e digital é indispensável que o NDVI apresente estabilidade temporal, ou seja, mesmo que haja mudança nos valores absolutos, o comportamento espacial deve ser semelhante, independentemente do período em análise.

Conclusão

Todas as variáveis apresentaram variabilidade espacial, evidenciando a estabilidade temporal para o NDVI.

O modelo ajustado para a predição do N foliar não foi capaz de devolver valores confiáveis e com acurácia mínima, não sendo recomendado para a predição do estado nutricional nitrogenado de café arábica.

Referências

ALMEIDA, T. S.; SEDIYAMA, G. C.; DE ALENCAR, L. P. (2017). Estimativa da produtividade de cafeeiros irrigados pelo método zona agroecológica espectral. **Revista Engenharia Na Agricultura - REVENG**, 25(1), 1–11. <https://doi.org/10.13083/reveng.v25i1.727>

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society**

of **America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
DOI:10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.

COSTA, T. Ferramentas de sensoriamento remoto na agricultura. **Revista Cultivar**, 14 ago. 2023. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/ferramentas-de-sensoriamento-remoto-na-agricultura>. Acesso em: 5 ago. 2025.

DA SILVA, C.J.L. Comportamento espectral da soja e predição de produtividade com uso do NDVI. **Tecnologia e Inovação Em Ciências Agrárias e Biológicas Avanços para a Sociedade Atual**, p. 172. 2023.

DE SOUZA, T. L., DE OLIVEIRA, D. P., SANTOS, C. F., REIS, T. H. P., CABRAL, J. P. C., RESENDE, R. S., FERNANDES, C. J., SOUZA, T. R., BUILES, V. R., GUELFI, D.. Nitrogen fertilizer technologies: Opportunities to improve nutrient use efficiency towards sustainable coffee production systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 345, p. 108317, 2023.

G1, 2025. **Café, carne e outros produtos brasileiros ficam fora de isenção dos EUA**. G1 – *Economia*, 30 jul. 2025. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2025/07/30/principais-produtos-do-brasil-serao-tarifados-pelos-eua.ghtml>>. Acesso em: 02 de agosto de 2025

ISLAM, M., MATSUSHITA, S., NOGUCHI, R., AHAMED, T. Development of remote sensing-based yield prediction models at the maturity stage of boro rice using parametric and nonparametric approaches. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, Amsterdam, v. 22, [art.] 100494, 2021.

LIMA, J. S. S.; FIEDLER, N.C.; PASSOS, R.R.; ROCHA, W.S.D. **Variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo em povoamento de eucalipto**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.

MARTINS, J. A. **Dados hiperespectrais para predição do teor foliar de nitrogênio em cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 2016.

MORARI, F.; CASTRIGNANÒ, A.; PAGLIARIN, C. **Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors**. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 68, p. 97-107, 2009.

NTECH INDUSTRIES, Inc. *GreenSeeker Hand Held Optical Sensor Unit Operating Manual*. Modelo 505. Ukiah, CA: NTEch Industries, Inc.; 2017.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 436 p. ISBN 978-85-7035-817-2.

SILVA, S. A; LIMA, J. S. S.; SANTOS, N. T. Análise da variabilidade espacial e temporal. In: VILLAR, Flora Maria de Melo; ROSAS, Jorge Tadeu Fim; PINTO, Francisco de Assis de Carvalho (orgs.). **Agricultura Digital**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2021. p. 45–67.

SOUZA, J. L. Produtividade e estado nutricional e suas relações com a reflectância espectral do cafeeiro. 2022.

TURRA, M. A. Manejo do nitrogênio em cultivares de trigo baseado no índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.