





# AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE E TEXTURA DOS SOLOS NA ECUNHA (HUAMBO, ANGOLA) COM BASE EM DETECÇÃO REMOTA POR SATÉLITE

## SATELLITE-BASED REMOTE SENSING ASSESSMENT OF SOIL FERTILITY AND TEXTURE IN ECUNHA (HUAMBO, ANGOLA)

Isaú Alfredo B. Quissindo <sup>1\*</sup> ; Jorge Manuel Capanda <sup>1</sup>; Adriano Braga Bingobingo <sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade José Eduardo dos Santos, Angola.

\* Email: isau.quissindo@ujes.ao

### RESUMO

Este estudo utilizou técnicas de detecção remota e algoritmos de aprendizagem automática para mapear e caracterizar os solos agrícolas do município da Ecunha, com foco na textura e na distribuição dos macronutrientes primários (N, P, K) e secundários (Ca, Mg, S). A análise baseou-se em dados espectrais processados no *Google Earth Engine* e *Google Colab*, complementados por métodos estatísticos incluindo correlações de Spearman. Os resultados indicaram elevada fertilidade na camada superficial do solo, acompanhada de variações significativas em profundidade. Destacou-se a forte presença de potássio, a distribuição irregular de azoto e a escassez de fósforo. Verificaram-se diferenças claras entre camadas superficiais e profundas, com predomínio de solos arenosos nas superfícies. Além disso, foi observada correlação moderada entre o teor de silte e o azoto. O estudo também revelou forte interdependência entre os macronutrientes primários, assim como entre cálcio, magnésio e enxofre, enquanto o magnésio apresentou correlação inversa com o azoto. Esses padrões ressaltam a necessidade de estratégias de adubação diferenciadas por

### ABSTRACT

This study employed remote sensing techniques combined with machine learning algorithms to map and characterise the agricultural soils of the Ecunha municipality, with a focus on soil texture and the distribution of primary macronutrients (N, P, K) and secondary macronutrients (Ca, Mg, S). The analysis was based on spectral data processed using *Google Earth Engine* and *Google Colab*, complemented by statistical methods including Spearman correlations. The results indicated high fertility in the topsoil, accompanied by significant variations with depth. Notably, there was a strong presence of potassium, an uneven distribution of nitrogen, and a deficiency of phosphorus. Clear differences were observed between the surface and deeper layers, with sandy soils predominating at the surface. Additionally, a moderate correlation between silt content and nitrogen was observed. The study also revealed strong interrelationships among the primary macronutrients, as well as among calcium, magnesium, and sulphur, whereas magnesium showed an inverse correlation with nitrogen. These patterns highlight the need for depth-



profundidade, bem como a importância do zoneamento agrícola para o planeamento sustentável do uso do solo. Com base nos achados, recomenda-se a aplicação correctiva de fósforo em áreas deficitárias e a implementação de um zoneamento agrícola orientado pela variabilidade espacial da textura e dos macronutrientes do solo na região.

**Palavras-chave:** agricultura de precisão; *Google Colab*; *Google Earth Engine*; *iSDA soil*; macronutrientes.

specific fertilisation strategies and underscore the importance of agricultural zoning for sustainable soil use planning. Based on the findings, corrective phosphorus application is recommended in deficient areas, along with the implementation of agricultural zoning guided by the spatial variability of soil texture and macronutrients in the region.

**Keywords:** Google Colab; Google Earth Engine; iSDA soil; macronutrients; precision agriculture.

## Introdução

A agricultura constitui uma das principais bases económicas e sociais de Angola, desempenhando um papel essencial na segurança alimentar e na subsistência das populações rurais. No entanto, a sua produtividade ainda é fortemente condicionada pela limitação do conhecimento sobre os tipos e as condições dos solos agrícolas. Antes da Revolução Industrial, a prática agrícola era essencialmente de subsistência e exigia grande esforço humano, sendo pouco eficiente e tecnologicamente limitada (Akhter & Sofi, 2022). Com o avanço tecnológico e a mecanização, surgiram novas formas de gestão agrícola, culminando no conceito de agricultura de precisão, que visa otimizar a produção e reduzir o impacto ambiental (Penteado, 2014).

Este tipo de agricultura baseia-se na recolha e análise detalhada de dados, permitindo a aplicação precisa de insumos agrícolas conforme a necessidade da planta. Entre as tecnologias que sustentam essa abordagem, destacam-se o Sistema de Posicionamento Global (GPS), os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e, sobretudo, a Detecção Remota (DR). Esta última tem permitido monitorar e avaliar parâmetros biofísicos do solo e da vegetação, utilizando sensores aéreos e orbitais para captar informações sem contacto directo com o alvo (Sahoo *at al.*, 2015; Steven *at al.*, 2013).

No contexto africano, a DR tem ganho especial destaque como ferramenta para impulsionar a agricultura, uma vez que grande parte dos agricultores depende de pequenas propriedades com recursos limitados (Amusan & Oyewole, 2022; Nabil *at al.*, 2022). Em Angola, particularmente na província do Huambo, estudos recentes têm abordado o zoneamento agroecológico (FAO, 2023; Monteiro *at al.*, 2021), a digitalização de mapas de solo e a colecta de dados agrícolas de



campo (Quissindo *at al.*, 2021). Contudo, a caracterização dos solos agrícolas com base em elementos químicos predominantes e textura ainda permanece pouco explorada.

Assim, a presente pesquisa propõe aplicar técnicas de aprendizagem de máquina integradas às plataformas *Google Earth Engine* (GEE) e *Google Colab* para mapear a textura e os macronutrientes primários e secundários do solo. Essa abordagem permite processar grandes volumes de dados geoespaciais, explorando a sensibilidade espectral dos sensores remotos à composição físico-química dos solos (Kumar & Mutanga, 2018).

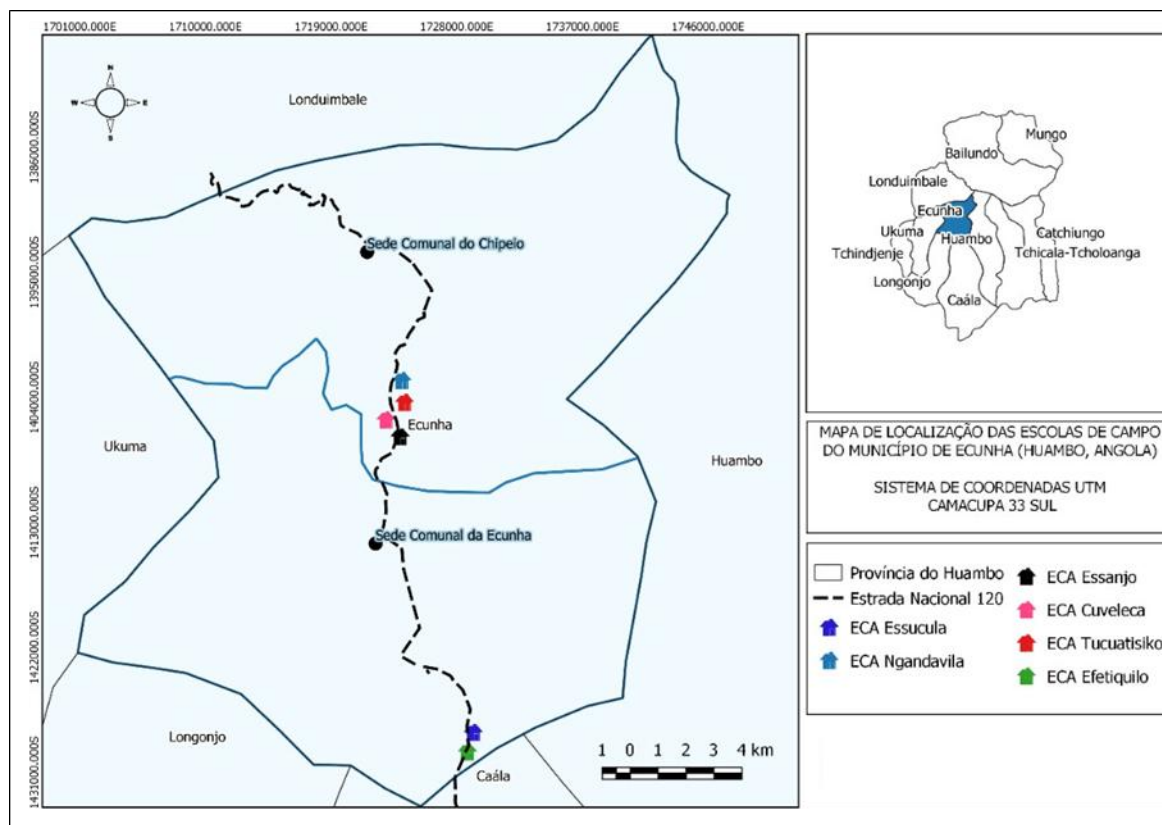
A sua relevância está na necessidade de obter informações actualizadas, acessíveis e espacialmente detalhadas sobre os solos da Ecuinha, contribuindo para a gestão sustentável do território, a redução de custos de produção e o aumento da produtividade agrícola. Além disso, a pesquisa visa apoiar políticas públicas e práticas de agricultura de precisão, promovendo o uso racional da terra e o desenvolvimento agrícola sustentável em Angola – estando alinhado com os Objectivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS 2: Fome Zero e Agricultura Sustentável, ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis – uso racional dos recursos do solo e ODS 15: Vida Terrestre – conservação e uso sustentável dos ecossistemas terrestres e solos.

## Material e Métodos

### *Caracterização da área de estudo*

*Área de estudo:* O estudo foi realizado no município da Ecuinha, que se localiza no Centro da província do Huambo. Tem como limites o município do Londuimbali ao Norte, ao Sul o município da Caála, a Leste o Huambo e a Oeste os municípios de Ucuma e Longonjo (Fig. 1). Suas coordenadas geográficas de referências (ponto central) são: Latitude: -12,6851303 Sul, Longitude: 15,5085695 Este (Diniz, 2006). Com uma área de 1.677 km<sup>2</sup>, o território do município está distribuído em duas comunas: Ecuinha a Sul e a Norte o Tchipeio. O município enquadra-se na zona agro-ecológica que engloba toda província do Huambo (Diniz, 2006).

O seu clima é do tipo temperado, com uma temperatura média anual geralmente inferior a 20°C. As quedas pluviométricas anuais rondam os 1.200 mm à 1.400 mm, com duas estações climáticas bem definidas, a estação chuvosa e a estação seca. A estação chuvosa tem chuvas concentradas de Outubro a Abril e a estação seca vai de Junho a Agosto. A humidade relativa (média anual) ronda à volta dos 65%, valores que pode oscilar entre 75 e 86% na época chuvosa e entre 20 e 30% durante o período de seca (Diniz, 2006).



**Fig. 1.** Localização da área de estudo

*Flora e fauna:* A vegetação neste município está principalmente composta de espécies consideradas dentro da formação vegetal denominada Miombo, constituída na sua totalidade por árvores naturais em forma de manchas florestais da formação de árvores dos géneros *Brachystegia*, *Julbernadia* e *Isoberlinea* (Ndjamba e Quissindo, 2021).

*Elementos sócio demográficos e outros:* O município é habitado por cerca de 92mil pessoas, fazendo três grupos étnicos, os huambos, bailundos e sambos, com pequenas comunidades de Ngangelas e Kiocos (Magalhães & Silva, 2023; INE, 2021). O município é marcado por uma grande vocação agrícola e verifica-se uma agricultura extensiva, principalmente nas culturas de batata, cebola, milho e feijão. A pecuária é outra actividade que caracteriza a população do município da Ecuinha (Quissindo *at al.*, 2021; Magalhães & Silva, 2023).

### **Dados e Plataforma**

Os dados de textura e macronutrientes do solo, com resolução espacial de 30 metros e período temporal de 2001 a 2017, foram obtidos na plataforma GEE. Segundo Akhter e Sofi (2022), o GEE é uma plataforma de análise geoespacial baseada em nuvem que permite visualizar e analisar imagens de satélite da Terra. De acordo com Misbah *at al.* (2022), a plataforma combina um vasto catálogo de imagens e dados geoespaciais com ferramentas de



análise em escala global, permitindo detectar mudanças, mapear tendências e quantificar diferenças na superfície terrestre.

Para o acesso aos dados de solo, utilizaram-se as linguagens de programação JavaScript e Python, que possibilitaram a escrita de scripts no ambiente do GEE para descarregar os conjuntos de dados com previsões de propriedades do solo produzidas pela *Innovative Solutions for Decision Agriculture Ltd* (iSDA). Conforme Hengl *et al.* (2021), a iSDA é uma iniciativa desenvolvida em parceria com o *African Soils Information Service* (AfSIS) e fundada por três instituições de pesquisa: *Rothamsted Research*, *World Agroforestry Centre* (ICRAF) e *International Institute of Tropical Agriculture* (IITA). Esta organização dedica-se à criação de conjuntos de dados de solo, combinando informações geoespaciais e amostras laboratoriais, com o objectivo de apoiar a investigação e contribuir para o aumento da produtividade dos pequenos agricultores africanos.

As bandas dos dados utilizados foram descritas e analisadas. Como exemplo, a tabela 1 apresenta as características espectrais do teor de argila nas profundidades de 0-20 cm e 20-50 cm, com as respectivas estatísticas de média aritmética e desvio padrão. Os resultados obtidos mostram que, devido às características das camadas raster, os valores de argila variam numa escala de 1 a 12, conforme Hengl *et al.* (2021): 1 = Argila, 2 = Argila siltosa, 3 = Argila arenosa, 4 = Franco-argiloso, 5 = Franco-argilo-siltoso, 6 = Franco-argilo-arenoso, 7 = Franco, 8 = Franco-siltoso, 9 = Franco-arenoso, 10 = Silte, 11 = Areia franca e 12 = Areia.

**Tabela 1.** Características das bandas espectrais do conjunto de dados de teor de argila

Medida estatística	Descrição	Min	Max	Unidade
<i>Média 0-20</i>	Teor de argila, média prevista a 0-20 cm de profundidade	0	84	%
<i>Média 20-50</i>	Teor de argila, média prevista a 20-50 cm de profundidade	0	78	%
<i>Desvio Padrão 0-20</i>	Teor de argila, desvio padrão a 0-20 cm de profundidade	0	90	%
<i>Desvio Padrão 20-50</i>	Teor de argila, desvio padrão a 20-50 cm de profundidade	0	90	%

## ***Metodologia***

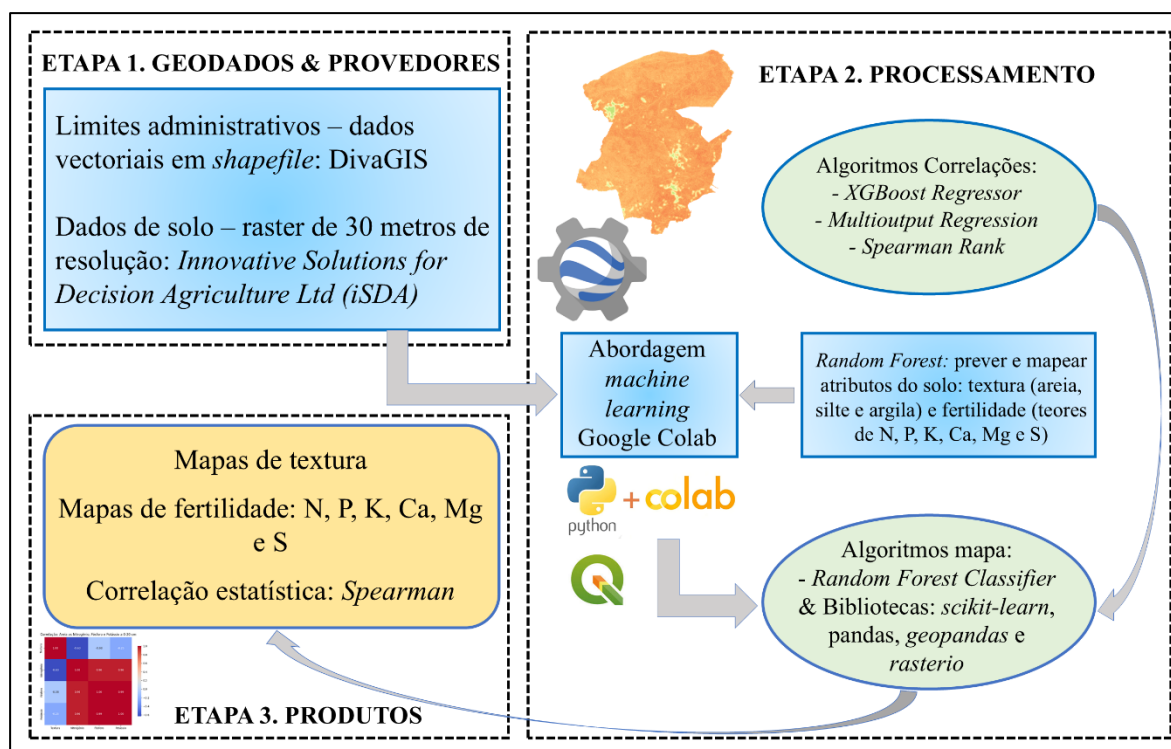
A metodologia deste estudo baseou-se na aplicação de técnicas de detecção remota e análise geoespacial para caracterizar os solos agrícolas do município da Ecuinha, na província do Huambo. Numa primeira fase, procedeu-se à aquisição e ao pré-processamento dos dados espaciais, assegurando a sua qualidade e adequação para as etapas seguintes. Este processo incluiu correcções geométricas e radiométricas, bem como a conversão dos dados para um sistema de coordenadas compatível com a área de estudo.

Em seguida, foram extraídos atributos espectrais relevantes para identificar as características do solo, com especial enfoque na textura e na distribuição dos macronutrientes primários e secundários. Para isso, foi adoptada uma abordagem baseada em aprendizado de máquina, que permitiu modelar e mapear as variáveis de interesse de forma automatizada e precisa. De acordo com Hengl *et al.* (2021), os dados geoespaciais utilizados são derivados de amostras de campo recolhidas pela FAO e interpoladas para apoiar investigações sobre solos em diferentes regiões do continente africano.

A avaliação dos modelos foi feita com base em métricas estatísticas, incluindo o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro médio quadrático (RMSE), indicadores que garantem a fiabilidade e a precisão dos resultados obtidos. A partir desse processo, foram gerados mapas detalhados representando a textura e a concentração de macronutrientes, possibilitando uma análise espacial e estatística das relações entre essas variáveis no contexto agrícola da Ecuinha.

O fluxo de trabalho metodológico consistiu nas seguintes etapas: delimitação da área de estudo com base em ficheiros de divisão administrativa (arquivos vetoriais do DivaGIS carregados no ambiente do Google Earth Engine), análise estatística utilizando medidas de tendência central (média aritmética) e de dispersão (desvio padrão), elaboração dos mapas temáticos e exportação dos resultados (Fig. 2). Todo o processamento foi realizado através de scripts desenvolvidos em linguagem de programação, utilizando uma abordagem de *machine learning* para otimizar a análise e a extração da informação espacial.





**Fig. 2.** Ilustração do fluxo de trabalho

Esta metodologia permitiu integrar dados espectrais, modelagem estatística e ferramentas computacionais avançadas, garantindo resultados consistentes e aplicáveis à gestão agrícola e ao planeamento do uso sustentável do solo na região em estudo.

Com o uso de códigos e scripts desenvolvidos em ambiente de programação, foram mapeadas a textura do solo e as concentrações dos macronutrientes primários (Azoto, Fósforo e Potássio) e secundários (Cálcio, Magnésio e Enxofre). Esta etapa metodológica permitiu extrair e analisar informações espaciais de forma automatizada e precisa.

Com os dados obtidos no GEE foram realizadas análises de correlação no *Google Colab* para compreender as relações entre as variáveis estudadas, como a textura do solo em relação à ocorrência de cada macronutriente e a interação entre macronutrientes primários e secundários. Na análise da correlação entre textura e concentração de macronutrientes, considerou-se a natureza das variáveis, sendo a textura do solo uma variável categórica ordinal (frações de areia, silte e argila), enquanto a concentração de macronutrientes, uma variável contínua. Assim, aplicou-se o coeficiente de correlação de Spearman, que é mais adequado para avaliar associações monotónicas entre variáveis ordinais e contínuas.

Da mesma forma, a correlação entre macronutrientes primários e secundários também foi avaliada com o método de Spearman, uma vez que os dados apresentaram distribuição normal

(Akhter e Sofi, 2022). Esta abordagem permitiu identificar o grau e a direcção das relações existentes entre as variáveis, sem assumir uma relação linear obrigatória.

Os resultados foram organizados em mapas temáticos e tabelas descritivas, facilitando a interpretação espacial e estatística dos dados. Os mapas, elaborados no ambiente Google Colab, mostraram a distribuição espacial da textura e das concentrações dos macronutrientes, destacando áreas com maior ou menor teor de nutrientes no município da Ecuinha. As tabelas complementares apresentaram estatísticas descritivas, como média, desvio padrão e coeficientes de correlação, proporcionando uma visão quantitativa das variações observadas.

Esta integração entre técnicas de detecção remota, aprendizado de máquina e análise estatística permitiu não apenas mapear e descrever as propriedades do solo, mas também compreender as relações existentes entre textura e fertilidade, fornecendo subsídios importantes para a gestão agrícola e o uso sustentável dos solos da região.

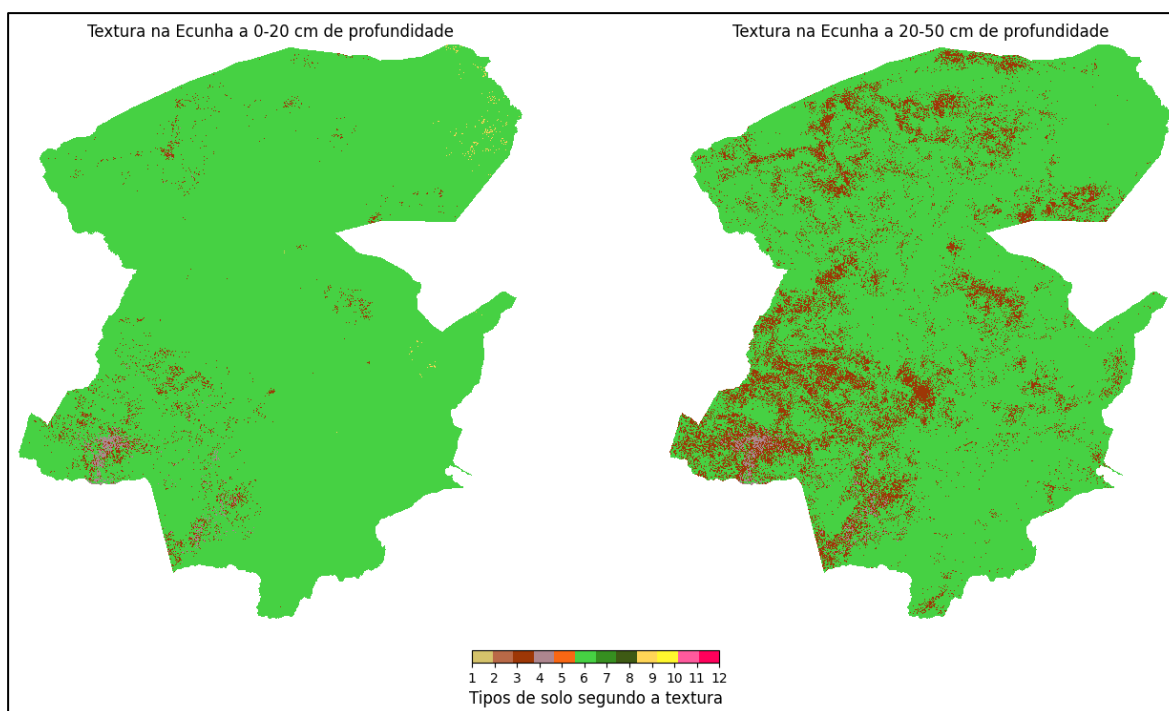
## Resultados e Discussão

### *Mapeamento da textura do solo agrícola da Ecuinha a 20 e a 50 cm de profundidade*

Na figura 3 pode-se observar dois mapas comparativos da textura do solo na Ecuinha, em duas profundidades diferentes. O mapa do lado esquerdo apresenta a textura do solo de 0–20 cm de profundidade (superficial) e a direita a textura do solo de 20–50 cm de profundidade (subsuperficial). Cada cor no mapa representa um tipo de solo diferente (com 12 categorias numeradas de 1 a 12). Neste mapa é possível avaliar a homogeneidade e a variabilidade textural do solo.

A análise dos mapas de textura do solo da Ecuinha evidenciou diferenças claras entre as duas profundidades estudadas. Na camada superficial (0–20 cm), verificou-se elevada homogeneidade textural, predominando a textura franco, que apresenta boas condições agronómicas para o cultivo mecanizado. Já na camada subsuperficial (20–50 cm), observou-se maior variabilidade, com presença de classes como argila arenosa e franco-argiloso, indicando alterações na composição com a profundidade. Essa variação influencia directamente a retenção de água, o desenvolvimento radicular e a disponibilidade de nutrientes, conforme apontado por Melo *at al.* (2021). Embora a uniformidade superficial seja favorável à agricultura, ela pode mascarar limitações em profundidade, reforçando a importância da amostragem vertical e do zoneamento agrícola (Silva & Santos, 2020; Cunha *at al.*, 2022).





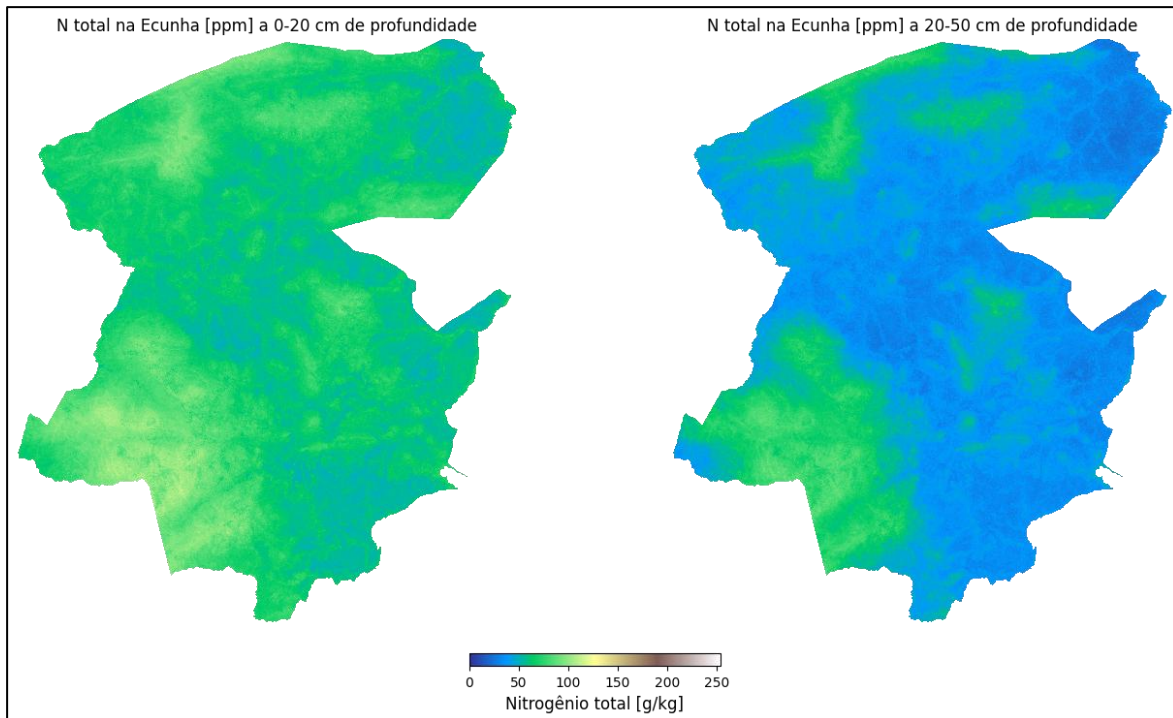
**Fig. 3.** Mapa de textura no solo agrícola da Ecuinha a 20 e a 50 cm de profundidade. Onde: 1 = Argila, 2 = Argila siltosa, 3 = Argila arenosa, 4 = Franco-argiloso, 5 = Franco-argilo-siltoso, 6 = Franco-argilo-arenoso, 7 = Franco, 8 = Franco-siltoso, 9 = Franco-arenoso, 10 = Silte, 11 = Areia franca, 12 = Areia.

Assim, a análise destaca a relevância de considerar a dimensão vertical do solo no planeamento agrícola, visando práticas de manejo e fertilização mais precisas e sustentáveis.

#### ***Mapeamento de azoto total no solo agrícola da Ecuinha a 20 e a 50 cm de profundidade***

A Figura 4 representa dois mapas comparativos da distribuição de azoto total (em ppm) no solo da região em estudo, nas mesmas profundidades do mapa anterior (0-20 cm e 20-50 cm). A legenda na parte inferior indica a concentração de azoto total (g/kg), com uma escala de cores que vai do azul (baixa concentração) ao branco (alta concentração), passando por alguns tons de verde.

Na camada superficial (0–20 cm), predominam valores moderados a altos de azoto, indicando boa fertilidade e possível influência de matéria orgânica e adubações recentes. Já entre 20–50 cm, os teores diminuem significativamente, com maior variabilidade espacial e predominância de valores baixos, possivelmente devido à lixiviação e menor actividade microbiana. Esse padrão, comum em solos tropicais, reflecte a concentração de azoto nas camadas superiores e a aplicação superficial de fertilizantes (Silva *at al.*, 2020). Embora a fertilidade superficial favoreça o crescimento inicial das culturas, a limitação em profundidade requer manejo diferenciado, como adubações localizadas e rotações culturais adequadas.



**Fig. 4.** Mapa de Azoto total no solo agrícola da Ecuinha a 20 e 50 cm de profundidade

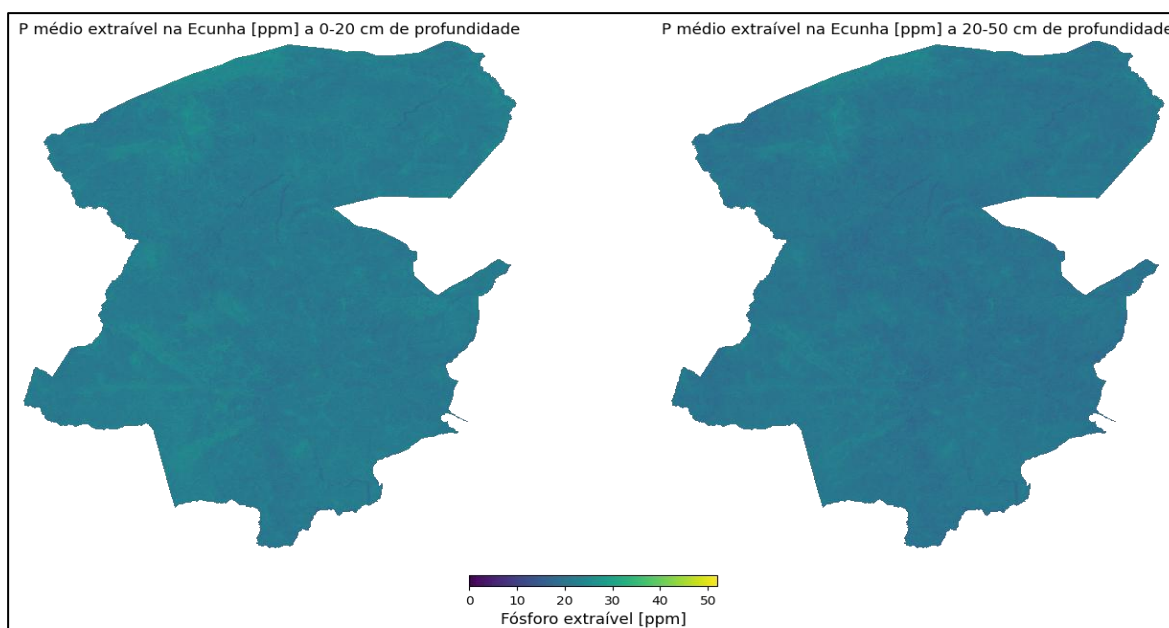
A heterogeneidade espacial observada destaca a importância da zonagem agrícola e da agricultura de precisão para otimizar o uso de insumos e promover uma produção sustentável (Cunha & Pereira, 2021).

***Mapeamento de fósforo extraível no solo agrícola da Ecuinha a 20 e a 50 cm de profundidade***

Na Figura 5 os mapas temáticos apresentam a concentração de fósforo extraível (P), em duas profundidades diferentes do solo (0-20 cm e 20-50 cm). A sua legenda na parte inferior indica os valores de fósforo extraível em ppm, variando de roxo (baixa concentração) a amarelo (alta concentração).

Em ambas as profundidades, a maior parte da área apresenta valores de fósforo extraível entre 10 e 30 ppm, com tons azulados-esverdeados predominando. As áreas com concentrações mais altas de fósforo (acima de 40 ppm), representadas em amarelo, são muito limitadas, quase inexistentes. A camada de 0-20 cm parece ter uma distribuição de fósforo ligeiramente mais intensa e heterogênea do que a camada mais profunda (20-50 cm), o que é esperado, já que o fósforo é pouco móvel no solo e tende a se acumular nas camadas superficiais devido à adubação e deposição orgânica. A profundidade de 20-50 cm apresenta uma distribuição mais homogênea e com menores concentrações, o que reforça a característica de fixação superficial do fósforo no solo.





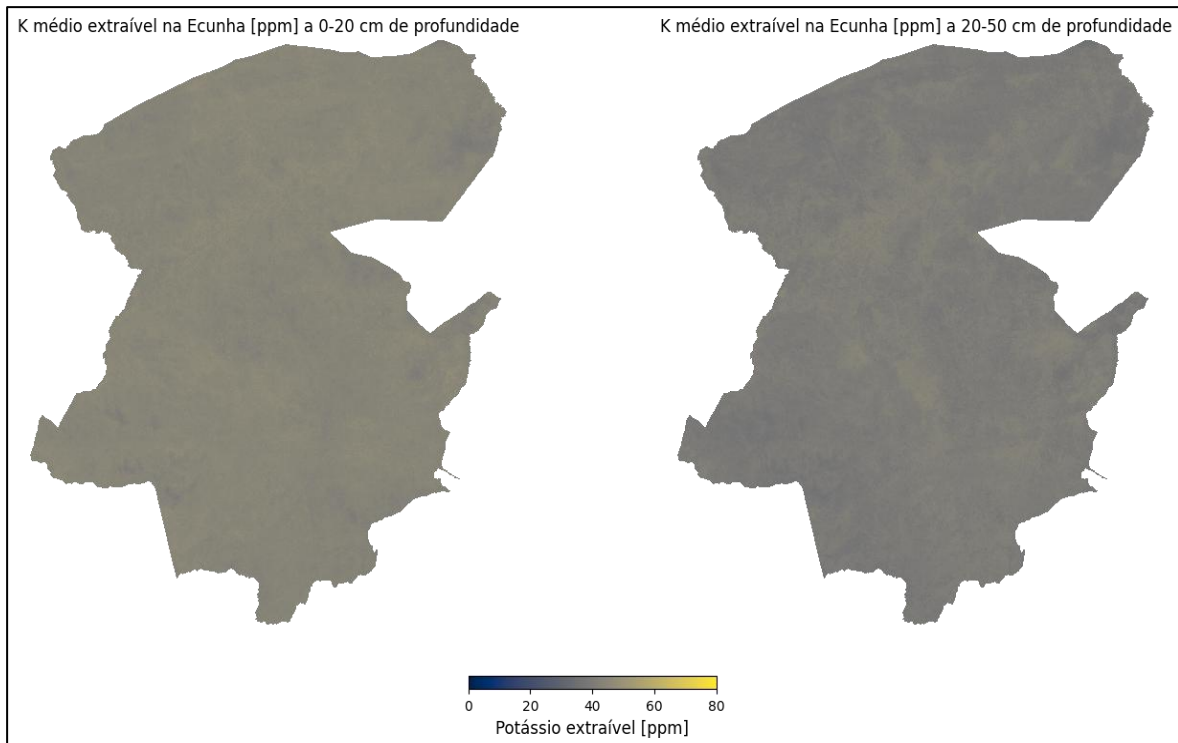
**Fig. 5.** Mapa de Fósforo extraível no solo agrícola da Ecunha a 20 e a 50 cm de profundidade

Este padrão confirma o comportamento clássico do fósforo nos solos tropicais, caracterizado por sua baixa mobilidade e forte tendência à fixação nas camadas superficiais (Withers *at al.*, 2018).

#### ***Mapeamento de potássio extraível no solo agrícola da Ecunha a 20 e a 50 cm de profundidade***

A Figura 6 apresenta dois mapas temáticos da mesma região (Ecunha), mostrando a distribuição espacial do potássio (K) extraível no solo em duas profundidades diferentes (0-20 cm e 20-50 cm). A escala de cores na parte inferior varia do azul (baixas concentrações) ao amarelo (altas concentrações), com valores de potássio extraível variando de 0 a 80 ppm.

De 0-20cm o mapa apresenta concentrações moderadas a ligeiramente elevadas de potássio, com algumas áreas em amarelo indicando maior disponibilidade. A variação espacial é visível, com algumas zonas de maior fertilidade, sugerindo influência de práticas agrícolas, fertilização ou características do solo mais heterogêneas na camada superficial. Na profundidade de 20-50 cm as concentrações de potássio aparentam ser mais homogêneas e geralmente mais baixas, com coloração mais escura dominando o mapa.



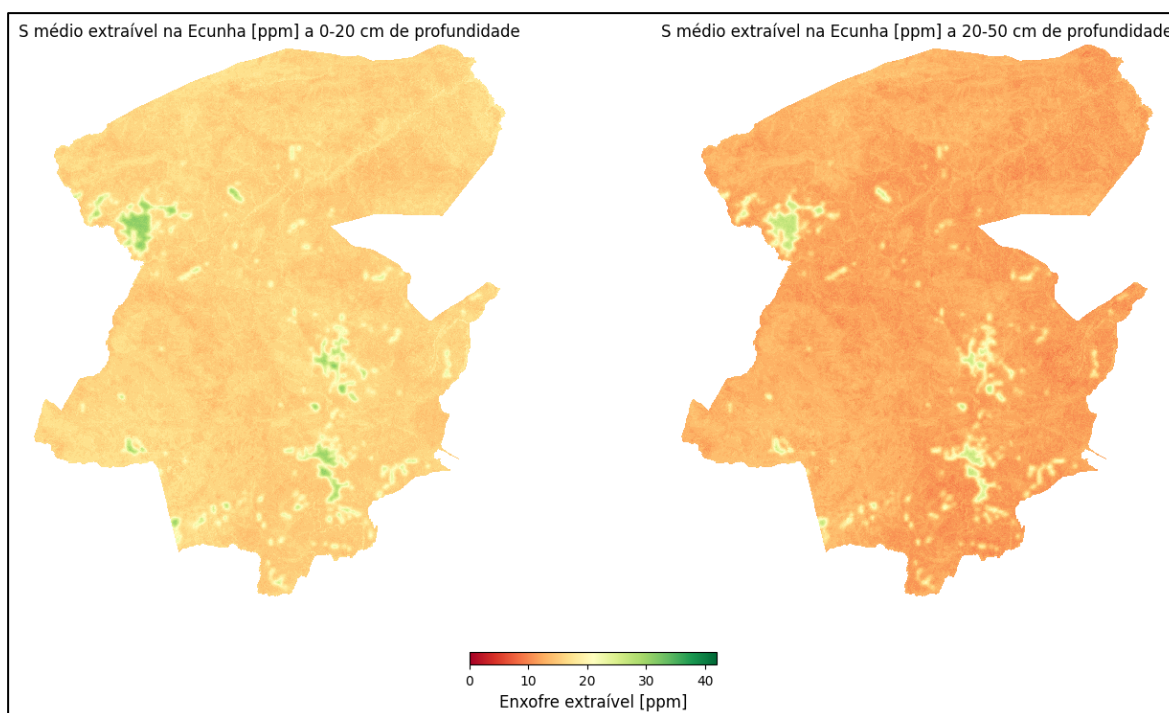
**Fig. 6.** Mapa de Potássio extraível no solo agrícola da Ecuinha a 20 e a 50 cm de profundidade

Isso sugere que o potássio está mais concentrado na camada superficial e diminui com a profundidade, o que é comum devido à menor lixiviação e maior aplicação de fertilizantes na superfície.

***Mapeamento de Enxofre extraível no solo agrícola da Ecuinha a 20 e a 50 cm de profundidade***

A Figura 7 apresenta dois mapas temáticos da região em estudo, mostrando a distribuição espacial do enxofre (S) extraível no solo, nas profundidades de 0-20 cm e 20-50 cm. A escala de cores na parte inferior vai de vermelho (baixas concentrações) a verde (altas concentrações), com valores variando de 0 a 40 ppm de S extraível.

Na camada superficial (0–20cm) nota-se a predominância de tons alaranjados e vermelhos, indicando baixa a moderada disponibilidade de enxofre, com algumas manchas verdes (valores > 30 ppm) em áreas específicas. Esta característica sugere que o enxofre pode estar concentrado em zonas específicas, possivelmente relacionadas a práticas agrícolas ou características do solo. Na camada profunda (20–50 cm) há distribuição relativamente semelhante à superficial, porém com área verde menos expressiva.



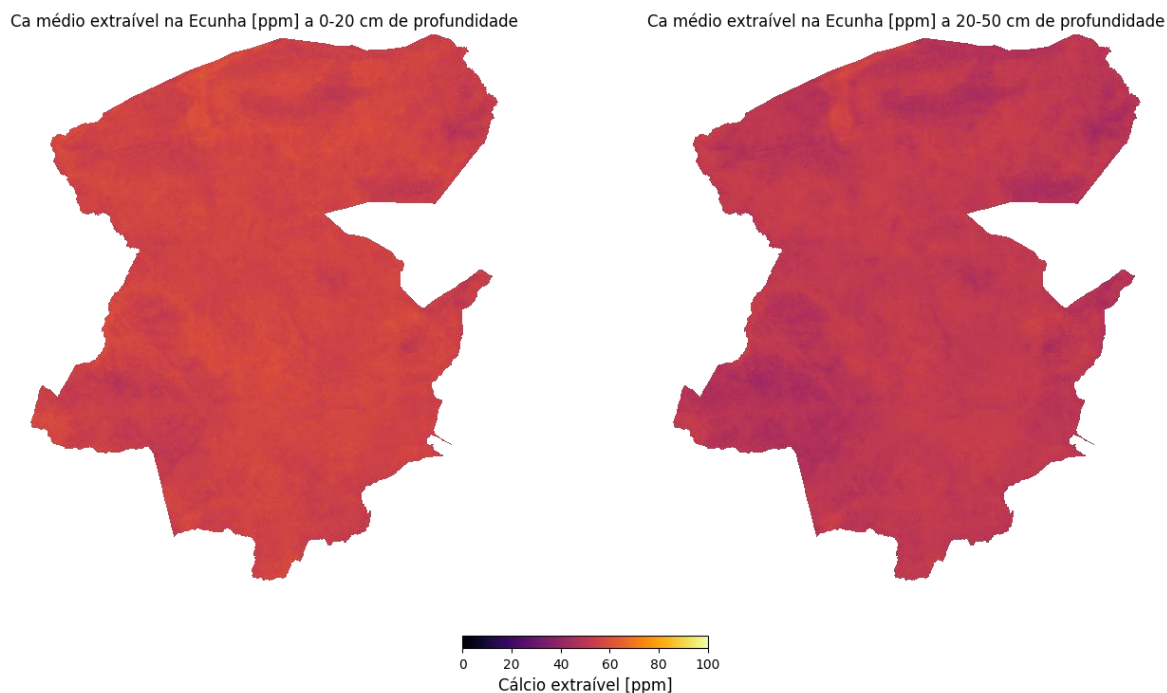
**Fig. 7.** Mapa de Enxofre extraível no solo agrícola da Ecuinha a 20 e a 50 cm de profundidade

O predomínio de baixos teores de enxofre em maior parte da área, sugere mobilidade limitada ou baixa concentração natural do elemento nessa profundidade.

#### ***Mapeamento de Cálcio extraível no solo agrícola da Ecuinha a 20 e a 50 cm de profundidade***

A Figura 8 apresenta dois mapas temáticos da concentração média de cálcio (Ca) extraível em ppm na região de Ecuinha, em duas profundidades diferentes do solo (0-20 cm e 20-50 cm). A legenda indica a concentração de cálcio extraível em partes por milhão (ppm), com cores variando de preto/roxo (valores baixos) a amarelo (valores altos).

Ambas as profundidades apresentam uma distribuição bastante homogênea da concentração de cálcio, com variações sutis entre áreas. As regiões centrais e nordeste mostram concentrações ligeiramente mais elevadas (tons mais claros) em ambas as profundidades. As regiões a sul e sudoeste apresentam menores concentrações (tons mais escuros). O mapa da camada superficial (0–20 cm) parece apresentar concentrações de cálcio ligeiramente mais elevadas do que a camada mais profunda (20–50 cm), sugerido pela presença de áreas mais claras no primeiro mapa, isso pode indicar que o cálcio é mais concentrado na camada arável, talvez devido a práticas agrícolas, como a calagem, ou deposição superficial.



**Fig. 8.** Mapa de Cálcio extraível no solo agrícola da Ecunha a 20 e a 50 cm de profundidade

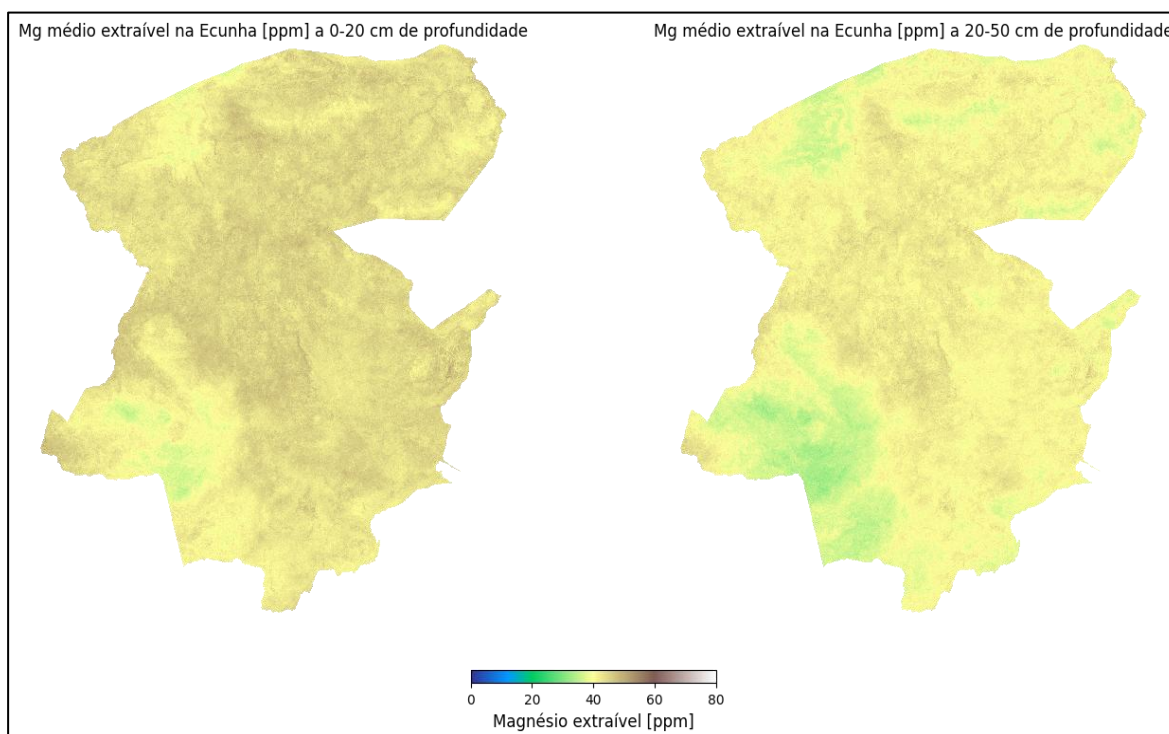
Nestes mapas pode-se ver que ambas profundidades são ricas em cálcio, podendo assim destacar que, solos ricos em cálcio oferecem diversas vantagens para as culturas agrícolas, pois esse nutriente desempenha papéis cruciais no desenvolvimento das plantas. Segundo Melo *et al.* (2021) e Silva & Santos (2020), essas características apresentam vantagens na melhoria da estrutura do solo, neutralização da acidez do solo, fortalecimento da parede celular, estímulo ao crescimento radicular, melhoria na absorção de outros nutrientes e aumento da produtividade e qualidade dos frutos.

### ***Mapeamento de Magnésio extraível no solo agrícola da Ecunha a 20 e a 50 cm de profundidade***

Na Figura 9 se pode observar dois mapas temáticos da concentração de magnésio (Mg) extraível no solo, representados em partes por diferentes profundidades (0-20 cm e 20-50 cm).

O mapa a esquerda representa o magnésio extraível médio na camada superficial do solo (0-20cm de profundidade). A maior parte da área apresenta coloração amarela-clara, indicando uma concentração de Mg extraível em torno de 40 ppm. Algumas áreas no sul e sudeste mostram tons mais esverdeados, sugerindo concentrações um pouco mais baixas de magnésio (entre 20-30 ppm). No mapa da direita representa-se o magnésio extraível médio em uma camada mais profunda (20-50 cm de profundidade). Também predomina o tom amarelado, mas

com maior presença de verde em várias partes da área, principalmente no centro-sul e sudoeste, indicando redução na concentração de magnésio em relação à camada superficial.



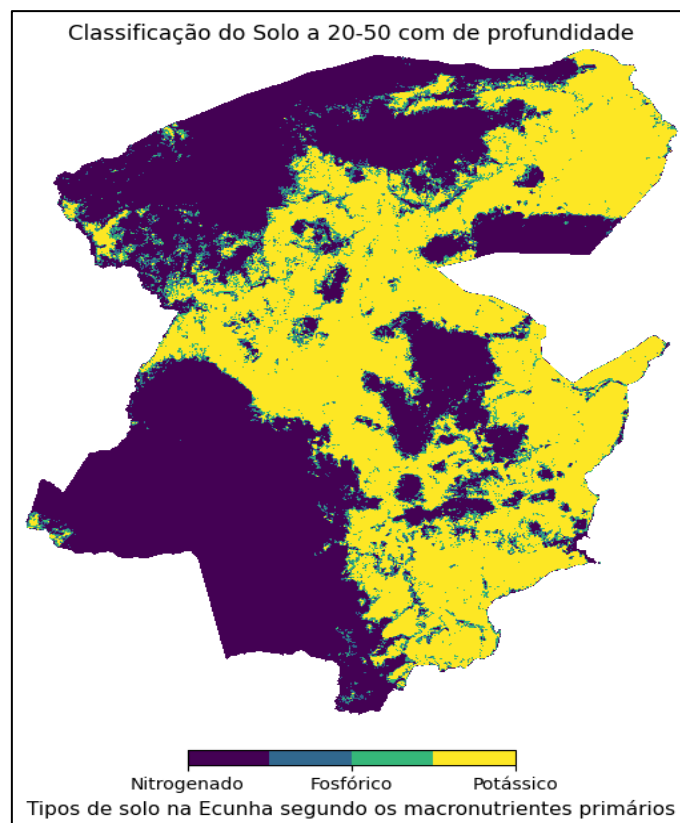
**Fig. 9.** Mapa de Magnésio extraível no solo agrícola da Ecuinha a 20 e a 50 cm de profundidade

Teores entre 20 e 40 ppm indicam a necessidade de atenção, principalmente para culturas com alta exigência nutricional e torna-se essencial monitorar a fertilidade do solo regularmente para garantir a sustentabilidade da produção agrícola. Em geral, pode-se dizer que a quantidade de magnésio em ambas as camadas é moderada, mas acessível para a absorção das culturas, principalmente na profundidade mais superficial. A boa disponibilidade de magnésio no solo é essencial para o bom desenvolvimento das culturas agrícolas (Cunha *at al.*, 2022).

#### ***Classificação dos solos agrícolas com base nos macronutrientes primários da área de estudo***

A Figura 10 representa a classificação dos solos da região da Ecuinha com base na predominância dos macronutrientes primários: azoto (N), fósforo (P) e potássio (K), numa profundidade entre 20 e 50 cm.

A classificação dos solos da Ecuinha entre 20 e 50 cm de profundidade mostrou predominância do potássio (K) na maior parte do território, sobretudo nas zonas central e sudeste, possivelmente devido à mineralogia local e a práticas agrícolas com adubações potássicas (Henriques *at al.*, 2018).



**Fig. 10.** Classificação do solo segundo os macronutrientes primários na Ecuinha a 50 cm de profundidade

O azoto (N) apresentou distribuição mais irregular, com maiores concentrações no oeste, noroeste e nordeste, associadas à acumulação de matéria orgânica e fixação biológica, indicando áreas de alto potencial produtivo para culturas exigentes em azoto. Já o fósforo (P) teve presença limitada e pontual, reflectindo a baixa mobilidade e alta fixação em solos tropicais intemperizados, o que constitui um factor limitante à fertilidade e exige adubações fosfatadas específicas (Withers *at al.*, 2018).

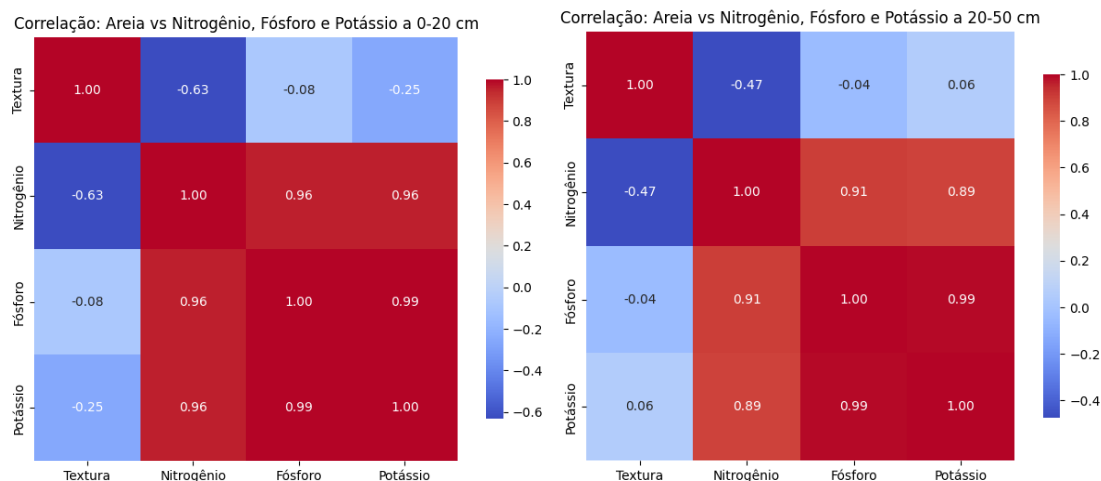
#### ***Correlações entre a textura (areia) vs macronutrientes primários***

Na Figura 11 pode-se observar dois quadros que apresentam a correlação entre a areia e os macronutrientes primários (NKP), em duas profundidades (0-20 cm e 20-50 cm).

Na profundidade de 0-20cm pode-se verificar as relações entre quatro variáveis relacionadas ao solo na camada de 0-20cm de profundidade: Textura (Areia), Azoto, Fósforo e Potássio.

A análise de correlação entre textura e macronutrientes (N, P e K) em duas profundidades (0–20 cm e 20–50 cm) revela que a fracção arenosa do solo tem influência negativa sobre o azoto, com correlação moderada na camada superficial (-0,63) e mais fraca em profundidade (-0,47). As relações entre textura e fósforo ou potássio são fracas, indicando pouca influência da textura sobre esses elementos.

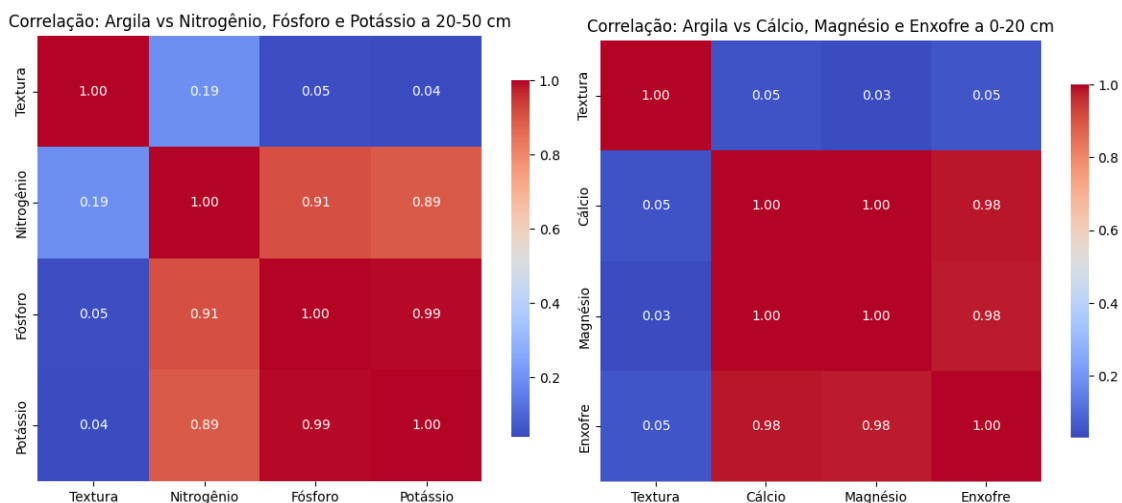




**Fig. 11.** Correlação entre areia e macronutrientes primários no solo agrícola a 20 e a 50 cm de profundidade. Em contrapartida, os nutrientes apresentam correlações muito fortes entre si ( $r > 0,89$ ), sugerindo comportamento conjunto, possivelmente decorrente de práticas de adubação combinada ou de condições químicas favoráveis do solo. No geral, os resultados indicam que solos arenosos tendem a ser menos férteis, sobretudo em azoto, enquanto N, P e K exibem forte interdependência, o que é relevante para o manejo integrado da fertilidade.

***Correlações entre a textura (argila) vs macronutrientes primários***

Na Figura 12 pode-se observar dois quadros que apresentam a correlação entre a argila e os macronutrientes primários (N, P e K), em duas profundidades (0-20 cm e 20-50 cm).

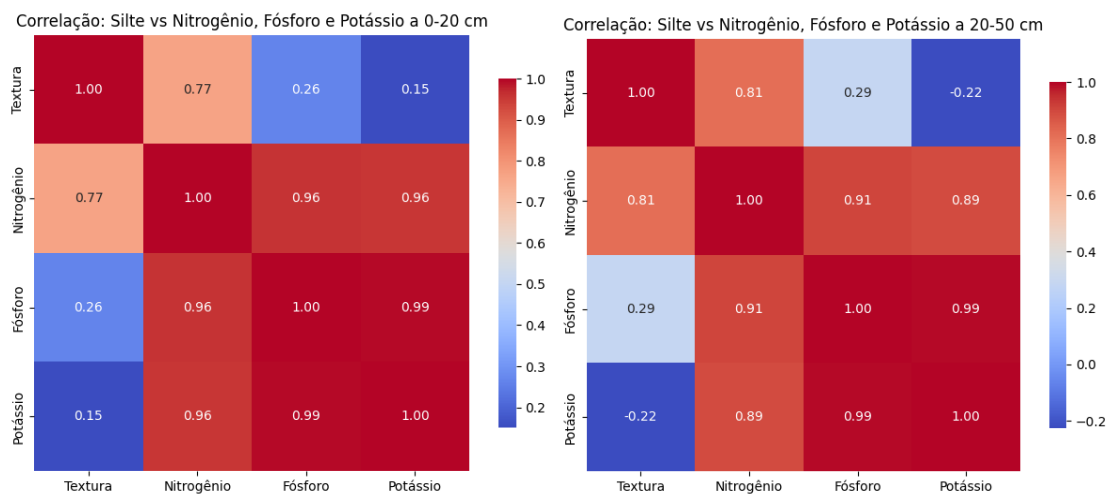


**Fig. 12.** Correlação entre argila e macronutrientes primários (50 cm) e secundários (20 cm) no solo agrícola da Ecuinha

A análise de correlação entre os atributos do solo revelou que, na profundidade de 20-50 cm, a textura (argila) apresenta pouca influência sobre os nutrientes, com correlações fracas ou inexistentes, enquanto azoto, fósforo e potássio mostram forte interdependência, especialmente entre fósforo e potássio ( $r = 0,99$ ). Já na camada de 0-20 cm, observou-se uma correlação muito forte entre cálcio, magnésio e enxofre ( $r \geq 0,98$ ), indicando comportamento conjunto possivelmente ligado à fertilização e dinâmica química do solo. Em ambas as camadas, a textura não se mostrou determinante na disponibilidade dos nutrientes, sugerindo maior relevância dos factores de manejo e processos químicos na fertilidade do solo.

**Correlações entre a textura (silte) vs macronutrientes primários**

Na Figura 13 pode-se analisar dois quadros que apresentam a correlação entre silte e macronutrientes primários no solo agrícola da Ecuilhas nas profundidades de 0-20 cm e 20-50 cm.



**Fig. 13.** Correlação entre silte e macronutrientes primários no solo agrícola da Ecuilha a 20 e a 50 cm de profundidade

A análise de correlação entre textura (silte) e macronutrientes (N, P e K) em duas profundidades (0–20 cm e 20–50 cm) revela que a textura influencia mais o azoto do que os demais nutrientes. Na camada de 0–20 cm há correlação moderada a forte entre silte e azoto ( $r = 0,77$ ), enquanto fósforo ( $r = 0,26$ ) e potássio ( $r = 0,15$ ) mostram associações fracas. Entre os nutrientes, as correlações são muito fortes (N–P = 0,96; N–K = 0,96; P–K = 0,99), indicando comportamento interligado, possivelmente devido à adubação combinada ou à matéria orgânica. Na profundidade de 20–50 cm, o padrão é semelhante, com destaque para a forte correlação entre fósforo e potássio ( $r = 0,99$ ) e para as correlações positivas entre azoto e fósforo ( $r = 0,91$ ) e entre azoto e potássio ( $r = 0,89$ ). A textura mantém relação forte com o azoto ( $r = 0,81$ ), mas

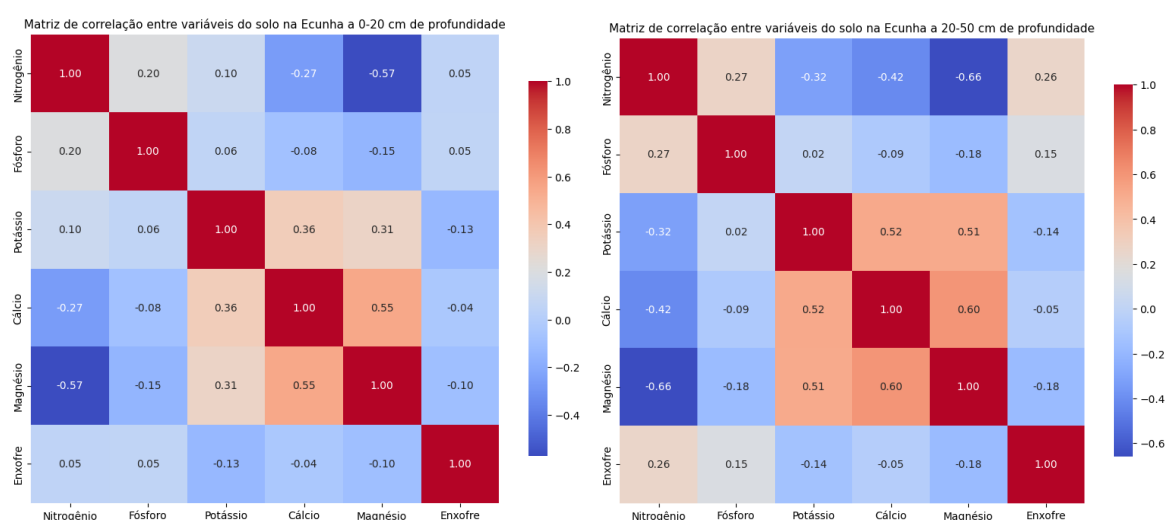


apresenta baixa correlação com fósforo ( $r = 0,29$ ) e fraca correlação negativa com potássio ( $r = -0,22$ ).

Contudo, a fracção silte mostra maior influência sobre o azoto, enquanto os nutrientes N, P e K exibem interdependência elevada, reforçando a importância de um manejo integrado da fertilidade. Essas relações indicam que a adição ou o aumento de um nutriente pode afectar positivamente os demais, sendo essencial considerar essa interação no planeamento da adubação e nas estratégias de manejo do solo.

### **Correlações entre os macronutrientes primários e secundários**

Na Figura 14 pode-se observar duas matrizes de correlação entre os macronutrientes primários e secundários nas profundidades usadas neste estudo, 0-20 cm e 20-50 cm.



**Fig. 14.** Matriz de correlação entre macronutrientes primários e secundários no solo agrícola da Ecuinha a 20 e a 50 cm de profundidade

A análise das correlações entre os nutrientes do solo na Ecuinha, nas profundidades de 0–20 cm e 20–50 cm, revela padrões consistentes e relevantes para o manejo da fertilidade. Na camada superficial (0–20 cm), destaca-se a forte correlação positiva entre o cálcio e magnésio ( $r = 0,55$ ) e entre potássio e enxofre ( $r = 0,50$ ), bem como a correlação negativa entre azoto e magnésio ( $r = -0,57$ ). Esses resultados indicam que cálcio e magnésio possuem origem mineral comum e comportamento conjunto, enquanto a relação inversa entre azoto e magnésio reflecte diferenças na mobilidade e na dinâmica desses elementos. As correlações moderadas entre fósforo, cálcio e enxofre sugerem acúmulo em áreas mais férteis, possivelmente influenciado por práticas de adubação.

Na camada mais profunda (20–50 cm), mantém-se a forte associação entre cálcio e magnésio ( $r = 0,89$ ), acompanhada de correlações positivas entre potássio e cálcio ( $r = 0,52$ ) e entre potássio e magnésio ( $r = 0,51$ ). O azoto apresenta correlações negativas marcantes com magnésio ( $r = -0,66$ ) e cálcio ( $r = -0,42$ ), sugerindo diferenças na absorção e disponibilidade. O enxofre e o fósforo mostram correlações fracas com os demais nutrientes, indicando comportamento mais independente em maior profundidade.

Estes resultados confirmam a forte ligação entre cálcio e magnésio (típica de solos bem estruturados) e evidenciam a necessidade de manejo integrado dos nutrientes, considerando as interações entre eles e suas variações com a profundidade, para promover um uso mais equilibrado e sustentável dos solos agrícolas da Ecunha.

### **Conclusões e Recomendações**

O estudo demonstrou que a integração entre técnicas de deteção remota e algoritmos de aprendizagem automática foi eficaz para mapear a textura e os macronutrientes dos solos da Ecunha, revelando boa fertilidade superficial e variação em profundidade.

Observou-se predominância de potássio, distribuição irregular de azoto e baixos teores de fósforo, indicando a necessidade de adubação fosfatada correctiva e manejo diferenciado por zonas.

Verificou-se ainda que a textura do solo influencia o teor de azoto e que há fortes correlações entre os macronutrientes (N, P e K) e entre os nutrientes secundários (Ca, Mg e S), com destaque para a correlação negativa entre magnésio e azoto.

Esses resultados reforçam a importância da adubação integrada e do zoneamento agrícola, visando otimizar a produtividade e promover o uso sustentável dos solos agrícolas da Ecunha. Por isso, recomenda-se implementação de um zoneamento agrícola baseado na variabilidade espacial da textura e dos macronutrientes do solo, de modo a permitir um manejo localizado e sustentável, otimizando o uso dos insumos agrícolas.

### **Referências Bibliográficas**

- Akhter, R., & Sofi, S. A. (2022). Precision agriculture using IoT data analytics and machine learning. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(8), 5602–5618.
- Amusan, L., & Oyewole, S. (2022). Precision agriculture and the prospects of space strategy for food security in Africa. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 1–12.



- Cunha, R. F., & Pereira, L. M. (2021). Precision nutrient management and spatial soil variability in tropical agroecosystems. *Agronomy Journal*, 113(4), 3032–3045. <https://doi.org/10.1002/agj2.20673>
- Cunha, R. F., Oliveira, G. C., & Fernandes, J. L. (2022). Soil spatial variability and site-specific management in agricultural systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 77(2), 115–124. <https://doi.org/10.2489/jswc.2022.00115>
- Diniz, A. C. (2006). *Características mesológicas de Angola* (2ª ed.). Lisboa: Instituto Português de Apoio ao Desenvolvimento.
- FAO. (2023). *Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v4)*. FAO NSL Geospatial Unit: Rome. Recuperado de <https://gaez.fao.org/>
- Hengl, T., Miller, M. A. E., Križan, J., Shepherd, K. D., Sila, A., Kilibarda, M., ... & Wheeler, I. (2021). African soil properties and nutrients mapped at 30 m spatial resolution using two-scale ensemble machine learning. *Scientific Reports*, 11, 6130. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85639-y>
- Henriques, I. C., Moreira, I., & Monteiro, A. (2018). Effects of nitrogen fertilization on maize crop in Huambo, Angola. *Revista de Ciências Agrárias*, 33(2). <https://doi.org/10.19084/rca.15903>
- INE – Instituto Nacional de Estatística. (2021). *Resultados definitivos do Recenseamento Geral da População e Habitação – Província do Huambo*. Luanda: INE.
- Kumar, L., & Mutanga, O. (2018). Applications of Google Earth Engine from the beginning: Usage, trends, and potential. *Remote Sensing*, 10(10), 1509.
- Magalhães, F., & Silva, M. (2023). Socio-demographic and infrastructural development in Huambo Province: Case studies from Ecuinha. *Angolan Journal of Regional Studies*, 7(1), 45–60.
- Melo, L. C. A., Faria, L. A., & Costa, D. A. (2021). Textural variability of soils and its impact on water retention and plant development. *Soil & Tillage Research*, 205, 104755. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104755>
- Monteiro, A., Silva, L., & Chilala, D. (2021). *Introdução ao geoprocessamento no zoneamento agroecológico (Módulo 1)*. Projeto UT-ZAEC. ISBN: 978-92-5-134426-2.
- Nabil, M., Abdelrahman, M., & Metwally, S. (2022). Constructing a 30m African Cropland Layer for 2016 by integrating multiple remote sensing, crowdsourced, and auxiliary datasets. *Big Earth Data*, 6(1), 54–76.
- Ndjamba, A. K. I., & Quissindo, I. A. B. (2021). Dinâmica florestal nas comunas do Cuima (Caála) e Chipeio (Ecuinha), Huambo-Angola entre 2009-2019. *Revista Angolana de Ciências*, 3(1), 45–60.
- Penteado, M. F. F. E. S. (2014). *Utilização de imagens de alta resolução de detecção remota na gestão do montado de sobre* [Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa].
- Quissindo, I. A. B., Kussumua, S. F., Fortuna, N. M., Matias, I. C. F. H., & Garcia, A. M. (2021). Metodologia de colecta de dados em campo e sua análise para avaliar o sector agrícola no Município da Ecuinha (Huambo). Projeto K2K. LABSIGDER & WUR: Huambo. ISBN: 978-989-33-1209-4.
- Silva, A. R., & Santos, D. C. (2020). Depth-based soil characterization and agricultural planning in heterogeneous landscapes. *Land Use Policy*, 99, 104972. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104972>
- Silva, A. R., Oliveira, G. C., & Santos, D. C. (2020). Nitrogen distribution and soil fertility in tropical regions: A depth-based approach. *Land Use Policy*, 94, 104543. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104543>
- Steven, M. D., & Clark, J. A. (Eds.). (2013). *Applications of remote sensing in agriculture*. Elsevier.
- Withers, P. J. A., Rodrigues, M., Soltangheisi, A., Carvalho, T. S., Guilherme, L. R. G., Benites, V. M., ... & Rosolem, C. A. (2018). Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. *Scientific Reports*, 8(1), 2537. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>