

***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Meio-Norte
Ministério da Agricultura e Pecuária***

SAÚDE DO SOLO

**EM AGROECOSSISTEMAS DA ZONA DE
TRANSIÇÃO CERRADO-CAATINGA**

***Luiz Fernando Carvalho Leite
Henrique Antunes de Souza***

Editores técnicos

***Embrapa
Brasília, DF
2026***

Embrapa

Parque Estação Biológica
Av. W3 Norte (final)
70770-901 Brasília, DF
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Responsável pelo conteúdo e editoração

Embrapa Meio-Norte
Av. Duque de Caxias, 5.650, Bairro Buenos Aires
Caixa Postal 01, 64008-780 Teresina, PI
www.embrapa.br/meio-norte

Comitê Local de Publicações

Presidente: *José Almeida Pereira*

Secretária-executiva: *Edna Maria Sousa Lima*

Membros: *Orlane da Silva Maia, Maria Eugênia Ribeiro, Kaesel Jackson Damasceno e Silva, Ligia Maria Rolim Bandeira, Alexandre Kemenes, Ana Lúcia Horta Barreto, Carlos Antônio Ferreira de Sousa, Carlos César Pereira Nogueira, Francisco de Brito Melo, Ricardo Montalvan Del Aguila, Robério dos Santos Sobreira, Sérgio Luiz de Oliveira Vilela e Valdemir Queiroz de Oliveira*

Edição executiva: *Ligia Maria Rolim Bandeira*

Revisão de texto: *Francisco de Assis David da Silva*

Foto da capa: *Luiz Fernando Carvalho Leite*

Diagramação: *Jorimá Marques Ferreira*

1ª edição

Publicação digital (2026): PDF

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

Embrapa Meio-Norte

Saúde do solo em agroecossistemas da zona de transição Cerrado-Caatinga / Luiz Fernando Carvalho Leite, Henrique Antunes de Souza, editores técnicos. – Brasília, DF : Embrapa, 2026.
PDF (365 p.) : il. color.

ISBN 978-65-5467-171-2

1. Agricultura Sustentável. 2. Tratamento do Solo 3. Manejo do Solo 4. Agroecossistema. 5. Cerrado. 6. Caatinga. I. Leite, Luiz Fernando Carvalho. II. Souza, Henrique Antunes de. III. Embrapa Meio-Norte.

CDD (21. ed.) 631.45

Orlane da Silva Maia (CRB-3/915)

© 2026 Embrapa

Capítulo 5

Fertilidade do solo e nutrição de planta em sistemas agrícolas do Piauí e do Maranhão

*Henrique Antunes de Souza
Francisco de Brito Melo
Ricardo Silva de Sousa
Mariléia Barros Furtado
Francineuma Ponciano de Arruda
Rosa Maria Cardoso Mota Alcantara
Julian Junio de Jesus Lacerda
Hilário de Almeida Júnior*

Introdução

A região Meio-Norte do Brasil, composta pelos estados do Maranhão e do Piauí, apresenta grande diversidade de biomas e regiões ecótonos, o que reflete na geração de distintos sistemas de produção agropecuários com variados níveis tecnológicos. Assim, considerando-se a região como principal fronteira agrícola brasileira, as pressões existentes para inserção de novas áreas para cultivo de grãos e aumento de produtividade e o histórico de processos de degradação e desertificação, é prioritário ampliar o uso de tecnologias pautadas por princípios conservacionistas.

Nesse contexto, a construção da fertilidade do solo da região deve ser observada de maneira segmentada, considerando-se os diferentes tipos de agricultura realizada, a capacidade de investimento, as janelas de plantio, as precipitações médias, os preços dos fertilizantes e a in-

fraestrutura disponível. De maneira geral, são reconhecidas as baixas concentrações de nutrientes e a elevada acidez do solo, o que oportuniza os estudos nessa área da ciência do solo com a geração de novos conhecimentos

O solo nem sempre fornece as quantidades de nutrientes necessárias para suprir a demanda das culturas, sendo imprescindível aplicar nutrientes, via fertilizantes, cujas quantidades aplicadas podem ser mais assertivas, caso sejam conhecidas as entradas e as saídas dos sistemas de produção, permitindo definir o balanço de nutrientes em agroecossistemas (Nava et al., 2023).

A calagem e as adubações (pré-plantio, plantio, crescimento, produção e foliar) podem adicionar nutrientes ao solo e parte deles pode ser absorvida, especialmente, pelas raízes; posteriormente, os nutrientes podem ser transportados das raízes pelos vasos condutores do xilema, na forma como foram absorvidos ou em outras formas, para órgãos da parte aérea, como folhas, ramos, flores, frutos e sementes (Nava et al., 2023). Além das entradas de nutrientes via aplicação de fertilizantes e corretivos, há a ciclagem de nutrientes que pode contribuir com aporte em razão da presença de plantas de cobertura, podas realizadas em pomares ou em outras culturas perenes pela decomposição do material vegetal. Contudo, parte dos nutrientes pode ser perdida, representando as saídas. As saídas podem acontecer por volatilização, lixiviação, escoamento superficial, desnitrificação ou pela exportação de frutos, sementes (grãos), toda a parte aérea de determinada cultura ou mesmo pelos ramos podados, caso sejam retirados das áreas produtivas (Nava et al., 2023; Souza et al., 2023).

Nesse contexto, é importante considerar que a fertilidade do solo na região Meio-Norte ainda carece de levantamentos e pesquisas, que permitam gerar recomendações seguras para correção do solo e adubação de culturas, considerando-se as particularidades das agroculturas realizadas. Neste capítulo, objetiva-se apresentar alguns trabalhos com fertilidade do solo, nutrição de plantas e adubação de culturas realizadas na região Meio-Norte, com ênfase nos principais resultados de pesquisa, considerando-se a diversidade de culturas agrícolas e ambientes de produção, mas sem a pretensão de esgotar a literatura existente.

Fertilidade do solo, nutrição de plantas e adubação de culturas na região Meio-Norte do Brasil

Semiárido piauiense

Ao realizar o mapeamento da aptidão agrícola das terras do estado do Piauí, a fim de oferecer uma visão sinóptica sobre o potencial agrícola de seus solos, Almeida et al. (2019) constataram que a diversidade climática e principalmente a baixa fertilidade interferem diretamente no uso dos solos piauienses, muitas vezes limitando-os a utilizações menos intensivas, independentemente do nível de manejo utilizado. Além disso, os solos do Semiárido são geralmente jovens e com poucos óxidos de ferro e de alumínio, o que provoca baixa fixação de fósforo (P). Diante dessa assertiva, Nobre et al. (2022) consideraram que o manejo da adubação fosfatada poderia influenciar a produção de gramíneas em solos arenosos do Semiárido piauiense. Nesse contexto, avaliaram doses e formas de aplicação de fósforo na cultura do capim-mombaça em solo arenoso e verificaram que a eficiência da adubação fosfatada a lanço em área total e localizada no sulco de plantio diminui com o aumento das doses aplicadas. Segundo os autores, após determinada dose (33 kg ha^{-1} de P_2O_5), a eficiência reduzia; verificaram que, quanto maior a dose de P, maiores eram as perdas, e concluíram que esse fato poderia estar associado à maior fixação de fósforo nos óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio ou à redução da precipitação com o cálcio presente na solução do solo. As condições extremas das regiões semiáridas, como precipitações irregulares, solos rasos e pedregosos e baixas concentrações de matéria orgânica, fazem com que esse ecossistema seja frágil, com solos suscetíveis à degradação e geralmente com baixos estoques de carbono.

Há poucos trabalhos que retratam a fertilidade do solo no Semiárido piauiense (Almeida et al., 2019; Barros et al., 2020). No entanto, a maior parte deles fortalece a premissa da viabilidade de se investir na melhoria da fertilidade do solo por meio do emprego de corretivos e fertilizantes, mesmo em cenários de incertezas sobre o clima. Na região, há predomínio de produção agrícola de subsistência com o cultivo frequente de milho, de feijão-caupi e de mandioca, contudo

há a presença de polos de produção, principalmente de fruteiras irrigadas, focados em sistemas de produção mais intensivos.

Portanto, em relação a outras regiões, como as áreas de produção de grãos, há menor número de trabalhos que retratem a fertilidade do solo, bem como ensaios de fertilização, pois o contexto climático em virtude da incerteza do regime hídrico da quadra chuvosa interfere no nível de investimento que poderia ser realizado pelo agricultor. Por outro lado, é incontestável a necessidade de se investir em levantamentos de fertilidade do solo e de manejos de suprimento de nutrientes das principais culturas exploradas na região semiárida, a fim de evitar áreas ou zonas de degradação do solo.

Região periurbana de Teresina

As áreas periurbanas são espaços de transição que combinam elementos urbanos e rurais, resultando em características, fragilidades e potencialidades específicas. Essa transição é evidente nos aspectos relacionados à paisagem, economia e meio ambiente (Pereira, 2013). Estima-se que até 2050 quase dois terços da população mundial viverão em áreas urbanas e periurbanas. Essa mudança pode levar a restrições no acesso a serviços essenciais, como saúde, energia e alimentos saudáveis, afetando aproximadamente mais de três bilhões de pessoas (ONU, 2019).

Nas áreas periurbanas, como no município de Teresina, PI, a pressão urbana e o crescimento populacional levam ao aumento da demanda por alimentos e ao adensamento urbano (Lima et al., 2021), o que pode causar impactos negativos na fertilidade do solo e na nutrição das plantas. Marques e Valladares (2021) realizaram um levantamento de indicadores da qualidade do solo em áreas verdes urbanas da capital piauiense. Os referidos autores constataram que os solos das áreas estudadas são favoráveis ao desenvolvimento vegetal e os teores de metais pesados estão na faixa da normalidade e não trazem risco de contaminação à população.

A fertilidade do solo e a nutrição das plantas desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de culturas saudáveis e no aumento da produção agrícola. Na região periurbana de Teresina, PI, a

realização de pesquisas assume um papel importante para impulsionar o desenvolvimento agrícola sustentável. Alguns trabalhos apresentados a seguir têm concentração na adubação de culturas anuais e hortaliças.

A produção de culturas anuais e hortaliças desempenha um papel crucial na segurança alimentar em áreas periurbanas, no entanto, o manejo intensivo dessas culturas pode comprometer a fertilidade do solo nessas regiões. Nesse contexto, um estudo conduzido por Sousa et al. (2017) avaliou o desempenho da cultivar de milho (*Zea mays*) AG-1051 para produção de milho-verde submetida a diferentes doses de nitrogênio e modos de disponibilização de micronutrientes. As doses de nitrogênio de 160 e 200 kg ha⁻¹ promoveram maiores rendimentos em relação ao número de espigas comerciais de milho. Além disso, a disponibilização de micronutrientes para as plantas de milho via adubação de semeadura mostrou-se a forma mais eficiente para aumentar o número de espigas comerciais.

As hortas urbanas fazem parte da paisagem da cidade de Teresina, PI, entretanto, poucos trabalhos têm focado na fertilidade do solo e na nutrição de hortaliças, principalmente de base ecológica, cuja principal fonte de suprimento de nutrientes são os adubos orgânicos. Belfort et al. (2023) conduziram um estudo para avaliar o efeito da aplicação foliar de ureia no desempenho e sensibilidade do coentro (*Coriandrum sativum*) cultivar Verdão, além da resposta à aplicação foliar de ureia e sulfato de amônio ao solo. A adubação nitrogenada, seja aplicada via foliar em diferentes concentrações, seja aplicada ao solo, não influenciou significativamente as características agrônômicas da cultivar. Entretanto, os pesquisadores observaram que a planta é sensível à aplicação foliar de ureia em concentrações superiores a 5,0%, o que pode ocasionar danos à folhagem. Com base nesses estudos, foi recomendada a colheita do coentro em torno dos 30 dias após a emergência para obter melhores resultados na produção.

Estudos, como o de Barbosa et al. (2023), confirmaram que resíduos orgânicos têm o potencial para melhorar os atributos químicos e microbiológicos do solo, bem como apoiar o desenvolvimento e o estado nutricional de plantas de *Capsicum chinense* Jacq. Os autores avaliaram os efeitos de diferentes doses de conteúdo ruminal bovi-

no compostado (CRB) e de cama de frango compostada (CFC) nos atributos do solo, crescimento e nutrição de plantas de *Capsicum chinense* Jacq. Os compostos orgânicos têm potencial para melhorar os atributos do solo, como pH, carbono orgânico, nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), sódio (Na), carbono da biomassa microbiana e respiração do solo. Além disso, as variáveis morfológicas foram afetadas positivamente pelos compostos, com aumento linear em resposta ao CRB (maior rendimento com a dose de 90 Mg ha⁻¹) e um aumento quadrático em resposta ao CFC (maior número de frutos por planta com a dose de 73,92 Mg ha⁻¹).

O uso de compostos orgânicos pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade do solo em áreas periurbanas. Estudo realizado por De Sousa et al. (2017) concluiu que a aplicação de lodo de curtume compostado (LCC) ao solo altera as propriedades químicas e microbianas ao longo do tempo. As propriedades químicas mais responsivas foram cromo (Cr), pH e Ca, enquanto em relação às propriedades microbianas, a fosfatase e a respiração do solo foram as mais responsivas. Ainda segundo os autores, o LCC aumenta o conteúdo de matéria orgânica e os nutrientes do solo, melhorando a fertilidade e o crescimento das plantas. No entanto, a aplicação do LCC resultou no acúmulo de Cr no solo. Apesar de um efeito positivo inicial do LCC nas propriedades microbianas do solo devido à entrada de matéria orgânica fresca, com o tempo as propriedades microbianas foram afetadas negativamente, à medida que a matéria orgânica diminuía e a disponibilidade de Cr aumentava. Isso indica que o uso de compostos orgânicos pode ser uma abordagem sustentável para melhorar a qualidade do solo nessas áreas, entretanto deve-se realizar o monitoramento do solo com as aplicações sucessivas.

Médio e Baixo Parnaíba maranhense e piauiense

O Médio e Baixo Parnaíba é uma grande região produtora de grãos, principalmente de soja e de milho, e recentemente passou a ser explorada também em segunda safra ou safrinha do milho, do feijão-caupi e do milheto, a depender da estação chuvosa. A porção maranhense é mais consolidada, enquanto a piauiense

vem apresentando boa expansão nos últimos anos. A região também apresenta pequenos produtores de milho e de feijão-caupi, os quais fazem uso tanto para produção de grãos verdes, vendidos em feiras e supermercados, como para grãos secos, utilizados em grande parte na alimentação animal (somente milho).

A região tem-se destacado na incorporação de novas áreas para produção de grãos em razão dos menores valores para aquisição de terras em relação a regiões mais consolidadas (sul do Maranhão e do Piauí), topografia que permite o uso de maquinário, proximidade com portos para escoamento da produção (por exemplo, porto de Itaqui, São Luís, MA) e melhor infraestrutura viária.

Nessa região, seja produtores de grãos que adotam elevado nível tecnológico, seja agricultores familiares, há carência de informações sobre adubação e nutrição de plantas, pois, como não há recomendação específica sobre as culturas de interesse econômico, na maioria das vezes, são utilizadas informações de outros estados, como as preconizadas no *Manual 5ª Aproximação* (Ribeiro et al., 1999) do estado de Minas Gerais e outras que não levam em consideração os tipos de solos da região.

Em pesquisa conduzida por Reis (2016), em um Latossolo Amarelo Distrófico, textura franco-arenosa, foi avaliado o parcelamento de 150 kg ha⁻¹ de nitrogênio em cobertura, em função das fases fenológicas da cultura do milho, como também o parcelamento e dose aplicada em função do índice e suficiência de nitrogênio (ISN), utilizando-se um clorofilômetro portátil (Tabela 1).

Dessa forma, o autor constatou que a adoção de três parcelamentos da adubação nitrogenada em cobertura, com aplicações de 50 kg ha⁻¹ de N nos estádios fenológicos de 3 a 4 folhas (V3-4), de seis a sete folhas (V6-7) e de nove a dez folhas (V9-10) completamente expandidas, promoveu maior produtividade de grãos de milho (8.634 kg ha⁻¹). Entretanto, quando a adubação em cobertura foi realizada em função do ISN, com aplicação de 37,5 kg ha⁻¹ nas mesmas fases fenológicas supracitadas, a produtividade máxima foi de 6.241 kg ha⁻¹ com 37,5 kg a menos de nitrogênio por hectare (Figura 1).

Tabela 1. Parcelamento de nitrogênio em cobertura em função da fase fenológica (F) e do índice de suficiência nitrogenada (ISN). Chapadinha, MA, 2016.

Época de aplicação de nitrogênio						
----- Dose de N em cobertura (kg ha ⁻¹) -----						
Tratamento	Semeadura	V3-4	V6-7	V9-10	V12-14	N cobertura
Testemunha	1	20	0	0	0	0
Referência	2	20	45	45	45	180
	3	20	75	75	0	150
	4	20	37,5	37,5	37,5	150
	5	20	50	50	0	150
	6	20	75	37,5	37,5	150
	3	20	37,5	0	37,5	112,5
ISN	4	20	37,5 ^(A)	37,5 ^(B)	0	112,5
	5	20	50 ^(A)	50 ^(B)	50 ^(C)	200
	6	20	50 ^(A)	50 ^(B)	50 ^(C)	200

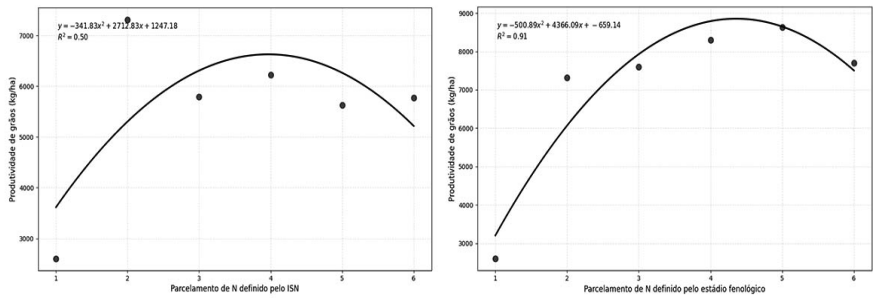
A: 1-sem N; **2**- referência; **3**- 75 kg ha⁻¹ de N em V₃₋₄ e V₆₋₇; **4**- 37,5 kg ha⁻¹ de N em V₃₋₄, V₆₋₇ e V₉₋₁₀; **5**- 50 kg ha⁻¹ de N em V₃₋₄, V₆₋₇ e V₉₋₁₀; **6**- 75 kg ha⁻¹ de N em V₃₋₄ e 37,5 kg ha⁻¹ de N em V₆₋₇ e V₉₋₁₀; **B:** **3**- 37,5 kg ha⁻¹ de N em V₃₋₄, V₆₋₇ e V₉₋₁₀; **4**- 37,5 kg ha⁻¹ de N em V₃₋₄, V₆₋₇ e V₉₋₁₀; **5**- 50 kg ha⁻¹ de N em V₃₋₄, V₆₋₇ e V₉₋₁₀; **6**- 50 kg ha⁻¹ de N em V₃₋₄, V₆₋₇ e V₉₋₁₀

^(A)27 DAE.

^(B)39 DAE.

^(C)57 DAE.

Fonte: Reis (2016).



A: 1-sem N; 2 - referência; 3 - 75 kg ha⁻¹ de N em V3-4 e V6-7; 4 - 37,5 kg ha⁻¹ de N em V3-4, V6-7, V9-10 e V12-14; 5 - 50 kg ha⁻¹ de N em V3-4, V6-7, e V9-10; 6 - 75 kg ha⁻¹ de N em V3-4 e 37,5 kg ha⁻¹ de N em V6-7 e V9-10. B: 3 - 37,5 kg ha⁻¹ de N em V3-4, V9-10 e V12-14; 4 - 37,5 kg ha⁻¹ de N em V3-4, V6-7 e V9-10; 5 - 50 kg ha⁻¹ de N em V3-4, V6-7, V9-10 e V12-14; 6 - 50 kg ha⁻¹ de N em V3-4, V6-7, V9-10 e V12-14.

Figura 1. Valores médios de produtividade de grãos em função do parcelamento de N, definido pelo estágio fenológico da planta (A) e pelo ISN (B). Chapadinha, MA.

Fonte: Reis (2016).

Para a cultura do milho, Chagas Júnior (2013) avaliou diferentes doses de nitrogênio em cobertura (0, 20, 40, 60, 80 e 100 kg ha⁻¹ de N) aos 15 dias após a emergência, utilizando como fonte de N a ureia (45% de N), e verificou que a dose de 80 kg ha⁻¹ proporcionou maiores produtividades de grãos em solo da região leste maranhense (Figura 2).

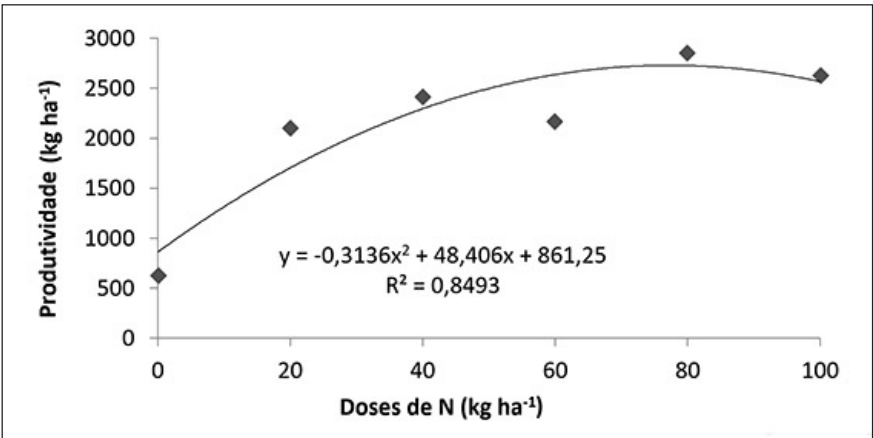


Figura 2. Produtividade de grãos de milho em função de doses de N em cobertura. Chapadinha, MA.

Fonte: Chagas Júnior (2013).

Em relação ao fósforo, Gaspar et al. (2018) avaliaram os impactos do fósforo residual na produção de feijão-caupi, em que foram avaliadas doses crescentes de fósforo (0, 60, 70, 80, 90 e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅) aplicadas à cultura antecessora de milho. Os autores constataram que a dose de P aplicada à cultura do milho, correspondente a 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅, promoveu maiores rendimentos de feijão-caupi, sendo viável o seu plantio em áreas previamente cultivadas.

Em um ensaio sobre a utilização de fontes alternativas de adubação na cultura do milho, Reis et al. (2015) avaliaram a produtividade de grãos em resposta à adubação orgânica com esterco bovino e cama de frango. Para isso, foram utilizadas adubações orgânicas com 4,0, 5,5 e 7,0 t ha⁻¹ de cama de frango; 10, 15 e 20 t ha⁻¹ de esterco bovino; adubação com fertilizantes solúveis com 273, 556 e 121 kg ha⁻¹ de ureia, de superfosfato simples e de cloreto de potássio, respectivamente. A dose de 7 t ha⁻¹ de cama de frango apresentou melhores resultados para a produção de milho em solo de baixa fertilidade (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios de altura de inserção de espiga (AIE), de comprimento de espiga (CE), de massa de mil grãos (MMG) e de produtividade de grãos (PG) de milho em função de adubações orgânica e mineral. Chapadinha, MA, 2015.

Tratamento	AIE (cm)	CE (cm)	MMG (g)	PG (kg ha ⁻¹)
T1	81,17 ab ⁽¹⁾	15,14 ab	298,60 a	6.087,00 ab
T2	89,62 a	13,99 ab	305,29 a	6.121,50 ab
T3	85,72 a	17,09 a	327,67 a	6.677,00 a
T4	67,20 bc	13,95 ab	296,00 a	3.858,25 b
T5	64,35 bc	13,76 ab	300,07 a	4.201,50 b
T6	57,65 c	12,36 b	283,95 a	4.767,50 ab
T7	76,12abc	15,93 ab	275,40 a	4.685,50 ab
CV%	11,20%	13,74%	9,08%	19,92%

⁽¹⁾Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si, estatisticamente, pelo método de Tukey. T1, T2 e T3 – 4,0, 5,5 e 7,0 t ha⁻¹ de cama de frango respectivamente; T4, T5 e T6 – 10, 15 e 20 t ha⁻¹ de esterco bovino respectivamente; T7 – Adubação mineral.

Fonte: Reis et al. (2015).

Araújo (2018) avaliou a influência da aplicação foliar de manganês nos componentes de produção da cultura da soja (cultivar FTS Paragominas RR) no leste maranhense, em que foram testadas cinco doses de Mn (0, 90, 180, 270 e 360 mL ha⁻¹), aplicadas em três estádios fenológicos (V5, R1 e R5). O autor constatou que a aplicação foliar de doses crescentes de manganês proporcionou aumento da produtividade da cultivar de soja avaliada, com o uso da maior dose testada (360 mL ha⁻¹) (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios dos componentes de produção da cultura da soja (PMS: peso de mil sementes, em gramas; NVP: número de vagens por planta; NSP: número de sementes por planta) submetida a aplicações foliares de manganês. Chapadinha, MA, 2018.

Tratamento	PMS (g)	NVP	NSP	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Testemunha	103,71 C ⁽¹⁾	48,77 B	103,62 B	2.478,39 B
T 1	116,30 B	57,15 A	127,46 A	2.929,48 AB
T2	103,81 C	60,54 A	132,46 A	2.564,81 AB
T3	122,94 B	44,85 BC	102,15 BC	2.958,90 AB
T4	132,56 A	37,85 C	81,77 C	3.052,27 A
CV %	8,83	21,20	24,28	23,75

⁽¹⁾Valores seguidos de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste LSD de Fisher (<0,05).

Fonte: Araújo (2018).

Com relação à correção do solo em feijão-caupi, Almeida et al. (2021) conduziram experimento em Argissolo Vermelho-Amarelo, com saturação por bases inicial de 26%, durante 2 anos agrícolas em Teresina, PI, usando calcário dolomítico (doses: 0,0; 1,3; 2,6; 3,9; e 5,2 t ha⁻¹) e duas variedades de feijão-caupi. A calagem aumentou a fertilidade do solo, proporcionando a elevação do pH, do cálcio, do magnésio e da saturação por bases e diminuição da acidez do solo. Doses de calcário entre 3,1 e 3,2 t ha⁻¹ promovem a máxima produtividade de grãos de feijão-caupi da cultivar BR 17 Gurgueia e entre 3,3 e 3,4 t ha⁻¹ da cultivar BRS Guariba, atingindo-se valores de saturação por bases médios de aproximadamente 48 e 55%, respectivamente.

Os solos tropicais apresentam baixas concentrações de fósforo (P) e de zinco (Zn), seja em função do material de origem, seja pela ausência de adubação, o que restringe a produtividade das culturas, e a deficiência de Zn se acentua em função da aplicação de fósforo (Melo et al., 2018a). Os mesmos autores observaram interação entre esses dois nutrientes e foram obtidas produtividades máximas de 1.376 kg ha⁻¹ e de 2.165 kg ha⁻¹ com aplicações de doses de 118 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e de 0,9 kg ha⁻¹ de Zn, à cultivar de feijão-caupi BRS Guariba e de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e de 3,1 kg ha⁻¹ de Zn à cultivar BRS Aracê, respectivamente, em Teresina, PI.

Embora o potássio (K) seja um nutriente extraído e exportado em grande quantidade pela cultura do feijão-caupi, a ausência de resposta a diferentes doses de potássio já foi observada por Melo et al. (1996) e, também raramente, observam-se respostas significativas à aplicação de potássio (Melo et al., 2015).

Melo et al. (2018a, 2018b) conduziram três experimentos de calibrações de doses de nutrientes e calcário nos municípios de Parnaíba, PI e de Brejo, MA, nos anos agrícolas 2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017, com o objetivo de estabelecer recomendações de doses de calcário, de potássio, de fósforo e de zinco para o feijão-caupi. Os resultados experimentais evidenciaram que a calagem deve ser feita para o cultivo do feijão-caupi sempre que a saturação por bases, indicada na análise do solo, for inferior a 50%. O produtor deve aplicar, preferencialmente, o calcário com mais de 12% de MgO (dolomítico) para fornecer o cálcio e o magnésio em proporções equilibradas, com antecedência de 30 dias da semeadura. O solo deve ter umidade suficiente para permitir a reação do insumo na camada arável do solo. A quantidade do calcário deve ser calculada para elevar a saturação por bases a 60%, corrigindo o PRNT para 100%.

Melo e Cardoso (2017) relataram que o cultivo de feijão-caupi em solos de textura arenosa e com teores de matéria orgânica menores que 10 g kg⁻¹ geralmente apresenta deficiência de nitrogênio. Nessas condições, recomenda-se fazer a inoculação com *Rhizobium* específico para a cultura ou fazer a aplicação de até 30 kg ha⁻¹ de N, em cobertura, aos 15 dias após a fase de emergência das plantas (Cruz et al., 2022).

Em relação aos demais micronutrientes, Melo e Cardoso (2017) destacaram que, além do zinco, o molibdênio exerce grande influência na nodulação e na fixação simbiótica do nitrogênio por meio das leguminosas associadas com bactérias do gênero *Rhizobium*. Segundo esses autores, a deficiência desses nutrientes ocorre, normalmente, em solos ácidos e arenosos. A dose de 20 g de molibdênio é suficiente para tratar 20 kg de sementes, quantidade necessária ao plantio de um hectare com a cultura.

Com o objetivo de avaliar as máximas produtividades técnicas e econômicas decorrentes da aplicação de doses crescentes de nitrogênio e de potássio, utilizando-se o híbrido simples transgênico (Pioneer 30F53VYHR®) de milho com alto potencial produtivo nas condições do Cerrado do leste maranhense, Melo et al. (2021a) concluíram que, com doses de nitrogênio de 145 kg ha⁻¹ e de 104 kg ha⁻¹, são obtidos, respectivamente, os maiores rendimentos de grãos, tanto para produtividade técnica (8.311 kg ha⁻¹), como para produtividade econômica de grãos secos de milho (8.051 kg ha⁻¹).

Alguns estudos indicaram, também, não haver resposta do milho em relação à produtividade de grãos quando da aplicação de potássio ao solo. Bastos et al. (2005) não observaram resposta produtiva do milho, híbrido BR 3123, ao avaliarem a aplicação de cinco doses de N (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹) e de K₂O (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹) em solo classificado como Latossolo Amarelo Álico, de textura arenosa a média. Segundo Melo et al. (1998), efeitos positivos da adubação potássica em milho têm sido verificados em solos arenosos e naqueles com concentração de K⁺ inferior a 0,23 cmol_c dm³ na camada de 0,0–0,2 m. Nessas condições, doses de até 60 kg ha⁻¹ de K₂O proporcionam as melhores respostas.

Há na literatura também trabalhos com olerícolas, principalmente na região de Chapadinha, MA. Garreto et al. (2016) trabalharam com as cultivares de cenoura Brasília, Alvorada e Tropical em Latossolo Amarelo Distrófico, textura franco-arenosa, cultivadas com doses crescentes de fósforo (0, 100, 200, 300 e 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Os autores observaram que a cultivar Brasília mostrou-se adaptada às condições do Cerrado maranhense por apresentar maior produtividade e menor percentagem de raízes não comerciais com a dose de

200 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Em trabalho realizado por Silva (2016) avaliaram-se doses crescentes de adubação potássica (0, 50, 100, 150, 200 e 250 kg ha⁻¹ de K₂O) na cultura do coentro, cultivar Verdão. Os autores constataram que a máxima produtividade (44 t ha⁻¹) foi alcançada com 97 kg ha⁻¹ de K₂O, sendo recomendada para solos com baixas concentrações de potássio na região do leste maranhense.

Sobre o cultivo de hortaliças-fruto, Silva et al. (2018) avaliaram doses de boro (B) (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; e 2,5 g por cova) em áreas com e sem calagem sobre a cultura da melancia. Os autores observaram que a adubação com boro aumentou a produtividade da cultura, quando a saturação por bases foi elevada a 70%. Os autores recomendam 2,4 kg ha⁻¹ de boro para se obterem maiores produtividades e frutos de melancias com melhor qualidade (maior teor de sólidos solúveis totais), quando cultivados em Latossolo Amarelo Distrófico.

Alto Parnaíba maranhense e piauiense

O Alto Parnaíba maranhense e piauiense representa a região cultivada por grãos mais consolidada, apesar de ainda apresentar áreas de abertura, as quais estão em expansão para o Médio e Baixo Parnaíba. Essa região ajudou a formatar o termo Matopiba (acrônimo das iniciais do Maranhão, do Tocantins, do Piauí e da Bahia), que vem-se destacando como fronteira agrícola baseada em tecnologias voltadas para alta produtividade (Miranda et al., 2014). Especificamente nos cerrados da região Meio-Norte (Maranhão e Piauí), a estimativa do potencial de áreas de cerrados aptas ao cultivo de grãos é de 5 milhões de hectares, dos quais 2 milhões no Maranhão e 3 milhões no Piauí (Klepker, 2014).

As principais espécies agrícolas cultivadas nos cerrados, dos estados do Maranhão e do Piauí são de baixa tolerância à presença de alumínio trocável do solo (Al³⁺), um elemento que causa a intoxicação das plantas. O Al³⁺ está presente em quantidade relativamente alta nos solos da região de cerrados dos dois estados. A presença do alumínio, em sua forma catiônica, causa a inibição do crescimento radicular e perturbação da morfologia radicular das plantas, o que gera redução da capacidade em absorver água e nutrientes (Ofoe et al., 2023).

Para se ter uma referência do deficit de Ca, de Mg e de K, entre a quantidade requerida pelas espécies agrícolas e os valores disponíveis no solo em condições naturais, o atributo químico saturação por bases do solo (V%) é amplamente utilizado. Marafon et al. (2020) observaram V% igual a 4% no solo de cerrado protegido de queimadas por 20 anos na Serra do Quilombo, em Bom Jesus, PI. Bressan et al. (2013) observaram valores de V% entre 12–13% no cerrado nativo, em Latossolo Amarelo Distrófico, situado no município de Loreto, MA, no povoado Ilha de Balsas. A Tabela 4 apresenta exemplos de análises de solo para fins de avaliação de fertilidade realizadas em áreas agrícolas e nativas nos dois estados. Essas constatações podem explicar a necessidade de investimentos em insumos como calcário, gesso e adubos no preparo do solo, quando se buscam maiores produtividades.

Por outro lado, as condições de relevo, textura do solo e clima favorecem o plantio em larga escala com a utilização de máquinas agrícolas em todas as etapas no processo produtivo. O preparo do solo dessas áreas tem recebido grandes investimentos, especialmente na aquisição de maquinário, calcário e fertilizantes fosfatados, com o incentivo do governo federal em linhas de crédito de bancos públicos. O calcário demandado pelas empresas produtoras de grãos nos dois estados é fornecido principalmente por jazidas locais, como das empresas Curimatá, Morro Cabeça no Tempo e Antônio Almeida, no estado do Piauí, complementado por negociações com mineradoras dos estados da Bahia, do Ceará e do Tocantins. No estado do Maranhão, o calcário está distribuído em quatro regiões: municípios em torno de Balsas, de Codó, de Primeira Cruz e no oceano, na Plataforma Continental Média (SEINC, 2023).

Na região, tem-se adotado a sugestão de correção do solo estabelecida no manual de correção do solo e adubação para a região do cerrado (Sousa; Lobato, 2004), baseado no método de saturação de bases, com atenção aos teores mínimos de Ca e de Mg no solo. No entanto, alguns consultores têm adotado o método do equilíbrio de bases na CTC potencial como parâmetro para se fornecer a quantidade de calcário (60–70% para Ca e 10–20% para Mg). Adicionalmente, têm-se constatações de aplicações baseadas em observações empíricas dos produtores, que estão sendo avaliadas pela Embrapa Meio-Norte e pela

Universidade Federal do Piauí quanto às doses muito acima das preconizadas pelos métodos tradicionais de estimativa, em torno de 10–15 t ha⁻¹. Os resultados da pesquisa ainda não foram disponibilizados ao público, mas apontam para melhoria dos atributos químicos do solo e alta capacidade de resposta em produtividade de grãos da cultura da soja nos primeiros anos de cultivo. A não utilização dessas quantidades pode não proporcionar produtividades compensatórias, principalmente quando o objetivo é preparar o terreno para culturas mais exigentes (Donagemma et al., 2016). A explicação está pautada no teor de alumínio e no baixo poder tampão do solo e por possíveis perdas de cátions em profundidade, pela lixiviação (Donagemma et al., 2016).

Além da baixa fertilidade natural dos solos, surgem alguns desafios como o diminuto aproveitamento de nutrientes pelas culturas, cuja justificativa são os manejos inadequados de corretivos e de fertilizantes (Francisco; Câmara, 2013; Matias et al., 2015). Um exemplo de manejo praticado na região dos cerrados pelos grandes produtores de grãos é a aplicação de fertilizantes a lanço; Francisco e Câmara (2013) mencionaram que nos últimos anos houve aumento da aplicação de fertilizantes fosfatados de fontes solúveis em área total, por exemplo na cultura da soja, e que alguns trabalhos na literatura subsidiam que a aplicação a lanço não compromete as produtividades (Sousa; Lobato, 2004; Oliveira Júnior et al., 2011). A fundamentação para essa prática reside no incremento do rendimento operacional de plantio (devido às grandes áreas), na antecipação de data de semeadura em função de problemas fitossanitários e para permitir maior janela de plantio da safrinha; no entanto, com a aplicação a lanço, há geração de gradiente de fósforo no solo e, mesmo em áreas de fertilidade construída, a aplicação no sulco proporciona maiores produtividades.

Uma situação praticada por agricultores na região Meio-Norte é a aplicação de doses de calcário acima de 6 t ha⁻¹, conforme já relatado. Mais um insumo que necessita de maiores investigações na região é o gesso, que consegue distribuir cálcio em várias camadas do solo, mas por outro lado pode lixiviar magnésio e potássio (Raij, 2008).

Tabela 4. Caracterização química e física de amostras do solo de áreas agrícolas e sob vegetação nativa nos estados do Maranhão e do Piauí, na camada de 0–0,2 m, 2013 a 2021.

Atributo químico e granulometria*	Área agrícola					Área nativa		
	Bom Jesus, PI	Santa Filomena, PI	Currais, PI	Brejo, MA	Loreto, MA	Bom Jesus, PI	Loreto, MA	
pH (H ₂ O)	5,4	4,9	6,4	5,4	4,7	4,4	3,5	
P (mg dm ⁻³)	3,3	18	20	33	22	0,9	0,8	
K (mg dm ⁻³)	54	62	61	20	138	23	39	
S-SO ₄ ²⁻ (mg dm ⁻³)	6,1	-	-	-	-	-	-	
Ca (cmol _c dm ⁻³)	3,3	3,0	2,5	1,5	4,9	0,2	0,4	
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,6	1,1	1,3	0,6	1,3	0,1	0,2	
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	1,0	0,6	
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	3,0	3,2	4	-	6,9	6,1	4,5	
CTC (cmol _c dm ⁻³)	7,9	7,4	7,9	-	13,6	6,5	5,2	
V (%)	62	58	50	-	49	6	13	
m (%)	2	0		7	0	74	-	

Continua...

Tabela 4. Continuação.

Atributo químico e granulometria*	Área agrícola					Área nativa		
	Bom Jesus, PI	Santa Filomena, PI	Currais, PI	Brejo, MA	Loreto, MA	Bom Jesus, PI	Loreto, MA	
MO (dag kg ⁻¹)	1,8	2,3	1,4	2,2	4,3	3,4	1,9	
Zn (mg dm ⁻³)	0,3	-	-	-	3,5	0,4	0,4	
Cu (mg dm ⁻³)	0,6	-	-	-	5	0,2	5	
B (mg dm ⁻³)	0,3	-	-	-	-	-	-	
Mn (mg dm ⁻³)	4,5	-	-	-	3	1,84	3	
Argila (g kg ⁻¹)	199	210	160	-	-	285	-	
Areia (g kg ⁻¹)	794	660	800	-	-	591	-	
Silte (g kg ⁻¹)	7	130	40	-	-	122	-	
Referência	Maciel (2019)	Santos (2018)	Rambo (2018)	Leite et al. (2010)	Bressan et al. (2013)	Marafon et al. (2020)	Bressan et al. (2013)	

P, K, Cu e Zn - Determinados pelo método Mehlich-1; MO - Método de digestão úmida; Ca, Mg, Al e Mn trocáveis - Extraídos com KCl 1M; H+Al - Método acetato de Ca; S-SO₄²⁻ - Extração BaCl₂; B - Método da água quente; Areia, silte e argila - Método da pipeta.

Com relação à cultura da soja, no Cerrado sul piauiense, Alcântara Neto et al. (2010) recomendaram o uso de 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 , trabalhando em solo de textura média. Ainda em relação à adubação fosfatada em avaliação de fontes de P_2O_5 em Balsas, MA, Oliveira Júnior et al. (2008) verificaram que a localização de aplicação do superfosfato triplo (a lanço ou na linha) não interferiu na produtividade de soja, porém, para fosfato natural reativo, a aplicação a lanço é superior em relação à aplicação no sulco de plantio. Além disso, os autores concluem que maiores incrementos na eficiência agrônômica relativa residual ocorrem quando as fontes são aplicadas a lanço. Em trabalho com fósforo na mesma região, Oliveira Júnior et al. (2011) comentaram que o uso conjunto das fontes de alta e baixa solubilidades de fósforo também é uma alternativa interessante, agronomicamente viável.

Borkert et al. (2005) apresentaram dados da adubação potássica na cultura da soja em Balsas, MA, e em Bom Jesus, PI, com rendimentos lineares em ambos os locais, com o incremento das quantidades aplicadas. Esses autores comentaram que a resposta da soja à adubação potássica está relacionada à capacidade de exploração do K do solo e às quantidades exportadas pelos grãos. Assim, mesmo em solos com baixo teor desse nutriente, como na região sul maranhense, o rendimento máximo foi observado com aplicações de K em quantidades equivalentes às das regiões tradicionais; porém, no sul piauiense, onde a disponibilidade inicial de K-trocável é baixíssima, há necessidade de aplicar maior quantidade de adubo.

Em trabalho com potássio na cultura da soja no sul piauiense, Petter et al. (2012) comentaram que a aplicação de K em cobertura proporciona maior eficiência agrônômica e de recuperação desse nutriente e que maiores índices de colheita de grãos, recuperação de K e produtividade foram verificados com a aplicação de 80 a 90 kg ha^{-1} de K_2O .

A adubação nitrogenada é dispensável na cultura da soja em razão da inoculação, porém o estresse hídrico, a acidez e temperatura do solo e a presença excessiva de nitrato de adubações anteriores podem reduzir os efeitos benéficos da inoculação, e a adubação foliar com N é um complemento para situações de estresse e com baixa efetividade da inoculação. Assim, em trabalho realizado no sul piauiense, Prochnow et al. (2017) não observaram diferenças na produtividade da soja, quando da aplicação de sulfato de amônio nos estádios R3-R5.

Com o objetivo de avaliar a influência de doses de nitrogênio e de diferentes densidades de plantas nos componentes de produção e no rendimento da cultura de milho no Cerrado sul maranhense, em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, textura argilosa, cultivado há 6 anos em sistema de plantio direto, Melo et al. (2011) concluíram que a máxima produtividade de grãos de milho foi obtida com 120 kg ha⁻¹ de N e 83.000 plantas por hectare.

Diante do exposto, novos estudos que avaliam o efeito de sistemas, associado a diferentes solos e tempo de uso de longo prazo, são importantes, sobretudo pela possibilidade de obtenção de resultados diferentes daqueles obtidos em outras regiões do País, tendo em vista as condições subtropicais úmidas de transição do Nordeste do Brasil.

Nesse sentido, com o objetivo de avaliar a disponibilidade de nutrientes e de conteúdo de matéria orgânica em diferentes profundidades do perfil do solo, em função do tempo de uso do sistema com rotação/sucessão de culturas, em manejo do solo com plantio direto, em áreas de cerrado no sudoeste do Piauí, Melo et al. (2021b) concluíram que, nas áreas de abrangência do estudo, existem duas estratégias de correção da acidez e de construção da fertilidade do solo na adoção do sistema de plantio direto: a primeira, utilizando-se a adição de calcários e fertilizantes de forma gradativa; a segunda, realizando-se a correção da acidez e a construção da fertilidade do solo, áreas com 2 a 6 anos de adoção, logo no primeiro ano (correção e adubação corretiva da acidez e dos nutrientes, principalmente fósforo e potássio).

Na primeira estratégia de correção da acidez e construção da fertilidade do solo, considerando-se as camadas 0,0–0,1 m e 0,1–0,2 m, será preciso o tempo de manejo de 12 anos para corrigir a acidez e construir a fertilidade do solo. A correção da acidez e a construção da fertilidade do solo, nas duas estratégias utilizadas na área de abrangência do estudo, são limitadas à camada de solo 0,0–0,2 m do perfil do solo (Melo et al., 2021b).

Nas áreas do cerrado da região Meio-Norte, os micronutrientes têm sido adicionados juntamente com os macronutrientes em algumas formulações, sem levar em consideração a análise de solo. Em trabalho que avaliou a disponibilidade de nutrientes em diferentes sistemas de uso e manejo no Cerrado piauiense, Lustosa Filho et al. (2017)handling and

time adoption of these can effectively alter the quantity of organic matter (OM verificaram que, na área de cerrado nativo, os teores de micronutrientes são baixos, com exceção do Fe^{2+} . Nas áreas em cultivo, foi verificado aumento de todos os micronutrientes, no entanto, em sua maioria ainda insuficiente para classificá-los como médio a alto (Tabela 5). Isso fica evidente no caso do B que, após repetidos anos de cultivo em diferentes usos e manejo, tem baixa disponibilidade, fato que requer manejo mais específico de adubação. Por outro lado, em solos de média/alta fertilidade, em trabalho no Cerrado piauiense, a aplicação de micronutrientes (B, Cu, Mn e Zn) via foliar na cultura da soja, especificamente, em R5.2 (formação de grãos), não houve incremento em produtividade de grãos; logo, a avaliação de micronutrientes é ponto que necessita de maior elucidação, principalmente em áreas de fertilidade construída (Ratke et al., 2020).

Tabela 5. Valores médios de boro (B), de cobre (Cu^{2+}), de ferro (Fe^{2+}), de manganês (Mn^{2+}) e zinco (Zn^{2+}) na profundidade de 0,0–0,4 m de um Latossolo Amarelo após anos de adoção de sistemas de uso e manejo do solo. Uruçuí, PI, 2017.

Sistema	Zn^{2+}	Fe^{2+}	Mn^{2+}	Cu^{2+}	B
	----- mg dm^{-3} -----				
	0–40 cm				
PD3	3,36	100,00	3,48	0,44	0,20
PD6	0,65	109,47	2,44	0,29	0,19
PD9	2,76	100,11	4,19	0,57	0,19
PA2	6,71	104,43	3,26	0,44	0,15
PA6	4,21	125,53	1,93	0,26	0,18
EU6	1,33	84,08	3,58	0,30	0,12
EU12	1,47	112,14	3,50	0,30	0,20
PC2	5,16	147,78	1,65	0,19	0,15
PC8	1,33	99,55	2,91	0,18	0,22
CN	0,87	82,54	0,61	0,12	0,16

PD3- Plantio direto há 3 anos; PD6- Plantio direto há 6 anos; PD9- Plantio direto há 9 anos; PA2-Pastagem há 2 anos; PA6-Pastagem há 6 anos; EU6- Eucalipto há 6 anos; EU12- Eucalipto há 12 anos; PC2- Plantio convencional há 2 anos; PC8- Plantio convencional há 8 anos; CN- Cerrado nativo. Cu, Fe, Mn e Zn – Método Melich1. B – Extração água quente.

Fonte: Lustosa Filho et al. (2017).

O principal manual de recomendação de aplicação de corretivos e fertilizantes empregado no Cerrado do Maranhão e do Piauí é o boletim *Cerrado: correção do solo e adubação* (Sousa; Lobato, 2004), entretanto é evidente a necessidade de atualização da referida publicação, diante dos novos sistemas de produção e cultivares empregadas ou mesmo da necessidade de customização, considerando-se as particularidades da região Meio-Norte do Brasil.

Exportação e balanço de nutrientes no Piauí e no Maranhão

Exportação de nutrientes das principais culturas agrícolas cultivadas na região Meio-Norte do Brasil

Conhecer a exportação de nutrientes das culturas agrícolas pode contribuir para o manejo adequado de corretivos e fertilizantes, bem como auxiliar na adoção de práticas mais conservacionistas e sustentáveis. Na Tabela 6, são apresentados valores de macro e micronutrientes exportados por tonelada de grãos das principais culturas cultivadas no Cerrado da região Meio-Norte, com valores obtidos de experimentação realizada na região.

Tabela 6. Exportação de nutrientes por grãos de culturas graníferas na região Meio-Norte do Brasil, 2017 e 2023.

Nutriente	Unidade	Milho ⁽¹⁾	Soja ⁽²⁾	Feijão-caupi ⁽³⁾	Milheto ⁽⁴⁾
N	kg t ⁻¹	20,5	52,3	34,7	17,7
P		4,5	4,6	4,9	3,4
P ₂ O ₅		10,3	10,5	11,2	7,8
K		16,9	21,6	17,0	2,2
K ₂ O		20,3	25,9	20,4	2,6
Ca		2,3	1,8	1,8	0,4
Mg		3,3	2,0	2,4	0,6
S		1,2	4,3	4,0	1,7

Continua...

Tabela 6. Continuação.

Nutriente	Unidade	Milho ⁽¹⁾	Soja ⁽²⁾	Feijão-caupi ⁽³⁾	Milheto ⁽⁴⁾
B	g t ⁻¹	16	24	16	4
Cu		14	9	19	5
Fe		49	112	72	19
Mn		42	22	22	4
Zn		48	38	54	28

⁽¹⁾Brejo, MA (Ferreira et al., 2023).

⁽²⁾Bom Jesus, PI (Pires et al., 2023).

⁽³⁾Teresina, PI (Vera, 2017).

⁽⁴⁾Henrique Antunes de Souza coletou os dados em campo na cidade de Teresina (em experimento) em junho de 2023.

Balanço de nutrientes na região Meio-Norte do Brasil

A elaboração de um programa de adubação para os principais cultivos agrícolas da região Meio-Norte é condição necessária para evitar altas taxas de desfrute (baseia-se na relação entre consumo e demanda de nutrientes por uma ou várias culturas em determinado espaço de tempo), comumente associadas à diminuição da fertilidade do solo, à diminuição de patamares produtivos e, conseqüentemente, a processos de degradação. Assim, levando em conta o levantamento realizado por Souza et al. (2023a), que considerou as exportações de nutrientes de um ano agrícola (2020) das principais culturas produzidas no Maranhão e no Piauí e as entradas de fertilizantes nesses estados, foi possível gerar um balanço aproximado dos saldos de nutrientes [= entradas (aplicação de fertilizantes minerais) – saídas (exportação de nutrientes pelas colheitas)].

No estado do Maranhão, Souza et al. (2023a) verificaram que, nas distribuições das exportações de nutrientes por grupos de culturas, considerando-se todos os macronutrientes, os maiores quantitativos foram observados em relação aos grupos cereais e leguminosas/oleaginosas (Tabela 7), ambos representando pelo menos 84% da exportação de macronutrientes (mais de 94% para N, de 93% para P, de 91% para K, de 89% para Ca, de 84% para Mg e de 85% para S). Contudo, a maior proporção é em relação ao grupo leguminosas e oleaginosas (80% para N, 59% para P, 80% para K, 77% para Ca, 66% para Mg e 81% para S).

Tabela 7. Distribuição em percentual dos nutrientes exportados por cada grupo de culturas no Maranhão, 2023.

Grupo de culturas	%					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Cereais	14,851	35,644	9,877	11,841	17,591	13,950
Especiarias	0,001	0,000	0,001	0,003	0,001	0,000
Estimulantes	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fibrosas	2,977	4,203	3,367	4,470	10,902	3,550
Forrageiras	0,472	0,433	0,741	1,299	0,846	0,116
Frutíferas	0,155	0,159	0,692	0,249	0,322	0,156
Hortaliças	0,043	0,054	0,123	0,080	0,087	0,034
Leguminosas e oleaginosas	80,210	57,924	80,802	77,466	66,562	81,492
Raízes e tubérculos	0,448	0,761	1,661	2,695	1,332	0,000
Outras espécies	0,843	0,821	2,736	1,897	2,358	0,701
Total	100	100	100	100	100	100
Total (kg)	201.842.449	25.890.058	86.766.460	10.056.643	11.717.935	15.326.856

Fonte: Souza et al. (2023).

As distribuições das exportações de nutrientes por grupo de culturas, no estado do Piauí indicaram que os grupos leguminosas/oleaginosas e cereais têm as maiores participações, em primeiro e segundo lugares, respectivamente, na exportação de nutrientes do solo piauiense quanto a todos os macronutrientes (Tabela 8). Esse resultado é próximo do verificado nos estados da Bahia e do Maranhão, que também apresentam o bioma Cerrado em sua geografia, o que configura a presença de agricultura de larga escala e intensiva, favorecida pelo clima, topografia e emprego de tecnologias (Souza et al., 2023a).

Os estados da Bahia, do Maranhão e do Piauí são responsáveis pela exportação de 86, 83 e 74% do N, do P_2O_5 e do K_2O do Nordeste brasileiro, respectivamente (Tabelas 9 e 10). Esse resultado é justificado pelo cultivo de grandes áreas de soja e de milho (grão), cujas culturas **são** responsáveis por 73, 67 e 67% da exportação de nitrogênio, de fósforo e de potássio, respectivamente (Souza et al., 2023a).

O manejo da fertilidade por balanço de nutrientes também necessita do desenvolvimento/aplicação de modelos de crescimento de plantas para integrar e prever os fluxos de nutrientes nos sistemas agrícolas (Nava et al., 2023). Maior atenção será demandada, considerando-se os sistemas mais intensivos, com emprego de rotação de culturas e inserção de plantas de cobertura.

Assim, práticas inteligentes de fertilização que aumentem a eficiência dos adubos (principalmente a entrada de nutrientes), minimizem o risco de perdas (saídas) e supram adequadamente as demandas das plantas para otimizar a produção e a qualidade dos produtos colhidos, podem ser desenvolvidas a partir do balanço de nutrientes (Nava et al., 2023).

Tabela 8. Distribuição percentual dos nutrientes exportados por cada grupo de culturas no Piauí, 2023.

Grupo de culturas	N ¹	P	K	Ca	Mg	S
	%					
Cereais	17,508	40,075	11,620	9,388	20,467	16,057
Especiarias	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Estimulantes	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fibrosas	2,355	3,194	2,663	3,677	8,583	2,821
Forrageiras	0,552	0,499	0,907	1,799	1,139	0,122
Frutíferas	0,366	0,350	1,099	0,316	0,996	0,279
Hortaliças	0,088	0,125	0,328	0,499	0,198	0,029
Leguminosas e oleaginosas	77,911	54,215	79,117	79,100	65,095	80,172
Raízes e tubérculos	0,591	0,957	2,203	3,729	1,757	0,000
Outras espécies	0,630	0,585	2,063	1,493	1,764	0,520
Total	100	100	100	100	100	100
Total (kg)	162.347.352	21.844.385	69.418.145	7.708.318	9.418.826	12.284.464

Fonte: Souza et al. (2023a).

Tabela 9. Quantidades exportadas, aplicadas, balanço e desfrute de nitrogênio dos principais grupos de culturas em estados da região Nordeste, 2023.

Estado	N _{Exportado}	N _{Fert} ⁽¹⁾	N _{FBN} ⁽²⁾	N _{Sis} ⁽³⁾	Balanço N ⁽⁴⁾	Desfrute N ⁽⁵⁾
			t			%
Alagoas	23.635	16.783	552	17.335	- 6.301	136
Bahia	464.168	125.061	317.802	442.863	- 21.305	105
Ceará	28.635	5.233	4.088	9.321	- 19.315	307
Maranhão	201.842	48.037	161.699	209.736	7.893	96
Paraíba	13.143	7.020	1.101	8.121	- 5.021	162
Pernambuco	24.228	16.792	1.764	18.556	- 5.672	131
Piauí	162.347	38.315	125.860	164.175	1.828	99
Rio Grande do Norte	8.733	4.633	700	5.333	- 3.400	164
Sergipe	27.482	10.241	92	10.333	- 17.149	266
NE	954.213	272.113	613.658	885.771	- 68.442	108

⁽¹⁾N proveniente de fertilizantes, correspondendo a 70% do que foi entregue ao mercado, conforme ANDA (2020), e fator de correção considerando-se possíveis perdas pelo uso de algumas fontes nitrogenadas.

⁽²⁾N proveniente da fixação biológica de nitrogênio. ⁽³⁾N sistema que é calculado pela soma do N-Fertilizante e N-FBN.

⁽⁴⁾Balanço N = $N_{Exportado} - N_{Sistema}$

⁽⁵⁾Desfrute N = $N_{Exportado} \div N_{Sistema} \times 100$.

Fonte: Souza et al. (2023a).

Tabela 10. Quantidades exportadas, aplicadas, balanço e desfrute de fósforo e potássio dos principais grupos de culturas em estados da região Nordeste, 2023.

Estado	P ₂ O ₅		P ₂ O ₅ ⁽¹⁾		Balanço		Desfrute		K ₂ O		K ₂ O ⁽⁴⁾ _{Fert}		Balanço		Desfrute	
	Exportado	t	P ₂ O ₅ ⁽¹⁾	P ₂ O ₅ ⁽²⁾	P ₂ O ₅ ⁽³⁾	%	t	Exportado	t	%	K ₂ O ⁽⁵⁾	K ₂ O ⁽⁶⁾				
Alagoas	7.503	13.081	5.578	57	34.489	25.072	-9.417	138								
Bahia	139.111	249.365	110.254	56	279.006	335.632	56.626	83								
Ceará	12.729	3.543	-9.186	359	27.273	8.341	-18.932	327								
Maranhão	59.288	129.605	70.317	46	104.120	104.294	174	100								
Paraíba	4.896	3.920	-976	125	18.753	12.287	-6.466	153								
Pernambuco	10.226	11.219	993	91	38.700	29.638	-9.062	131								
Piauí	50.024	75.355	25.331	66	83.302	60.103	-23.199	139								
Rio Grande do Norte	3.217	4.946	1.729	65	3.860	7.211	3.351	54								
Sergipe	12.355	12.551	196	98	21.489	6.661	-14.828	323								
NE	299.349	503.585	204.236	59	610.992	589.239	-21.753	104								

⁽¹⁾P₂O₅ proveniente de fertilizantes, correspondendo ao que foi entregue ao mercado, conforme ANDA (2020).

⁽²⁾Balanço P₂O₅ = P₂O₅^{Exportado} - P₂O₅^{Fert}

⁽³⁾Desfrute P₂O₅ = P₂O₅^{Exportado} ÷ P₂O₅^{Fert} x 100.

⁽⁴⁾K₂O proveniente de fertilizantes, correspondendo ao que foi entregue ao mercado, conforme ANDA (2020).

⁽⁵⁾Balanço K₂O = K₂O^{Exportado} - K₂O^{Fert}

⁽⁶⁾Desfrute K₂O = K₂O^{Exportado} ÷ K₂O^{Fert} x 100.

Fonte: Souza et al. (2023a).

Classes de interpretação de atributos da fertilidade do solo, faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes e sugestão de adubação para diferentes culturas agrícolas da região Meio-Norte do Brasil

Classes de interpretação e sugestão de adubação de fósforo e de potássio para as culturas de feijão-caupi e de soja por métodos de curvas de resposta

O uso de curvas de resposta para a elaboração de níveis críticos ou classes de interpretação de atributos do solo é ferramenta indispensável e consolidada para gerar informação técnica para tomada de decisão quanto à aplicação de fertilizantes para incremento, construção ou manutenção da fertilidade do solo. Nesse sentido, há iniciativas efetuadas, principalmente para as culturas do feijão-caupi e da soja para a região Meio-Norte, com foco na agricultura realizada no Cerrado.

Com relação ao fósforo, foram definidas funções de resposta (Figuras 3 e 4) para o estabelecimento das classes baixa, média, alta e muito alta do elemento no solo, com o intuito de recomendar, precisamente, as doses de P_2O_5 para obtenção de elevadas produtividades de grãos de feijão-caupi. Quanto menor o teor de fósforo no solo, tanto para solo de textura média como argilosa, menor a produtividade relativa de grãos. Assim, para solos de texturas arenosa e média (teor de argila menor que 350 g kg^{-1} de solo), que apresentem teor de fósforo menor que 9 mg dm^{-3} (classe baixa), sugere-se aplicar 80 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Evidentemente que, quanto maior a concentração de fósforo, menor deve ser o quantitativo de adubo fosfatado a ser aplicado. Com esse raciocínio, se o solo de texturas arenosa e média apresentar teor de fósforo maior que $17,1 \text{ mg dm}^{-3}$ (classe muito alta), o produtor deve aplicar apenas 20 kg ha^{-1} de P_2O_5 , empregando a filosofia de reposição de quantitativo exportado pelos grãos nas colheitas (Melo et al., 2018b).

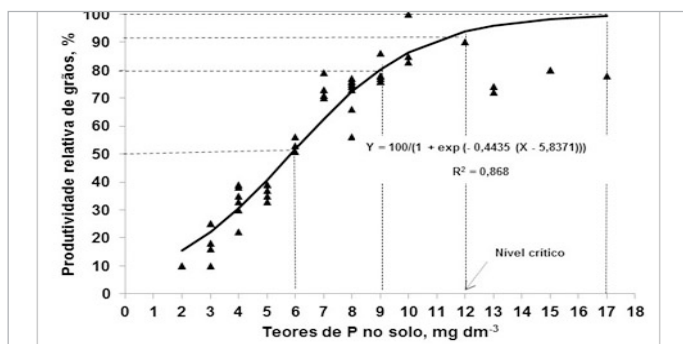


Figura 3. Resposta do feijão-caupi à aplicação de fósforo (Mehlich-1) em solos com teores de argila menores que 350 g kg⁻¹. Parnaíba, PI.

Fonte: Melo et al. (2018b).

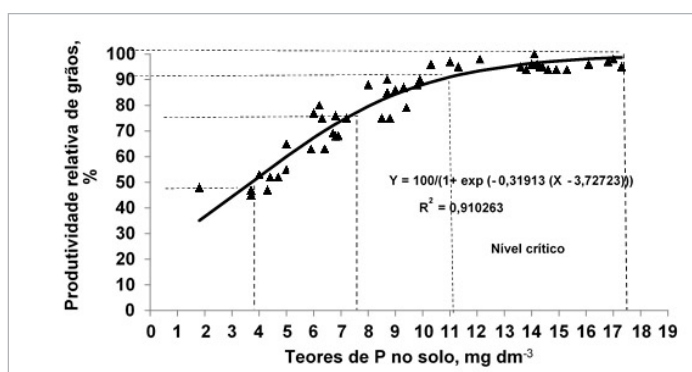


Figura 4. Resposta do feijão-caupi à aplicação de fósforo (Mehlich-1) em solos com teores de argila maiores ou iguais a 350 g kg⁻¹. Brejo, MA.

Fonte: Melo et al. (2018b).

Para a confecção das faixas de suficiência para o fósforo na cultura da soja (Figura 5), empregaram-se resultados de experimentos com a aplicação de P exclusivamente e trabalho de interação entre doses de fósforo e calagem, cujos dados de produção foram transformados em produção relativa (PR) (Tisdale et al., 1985; Souza et al., 2021).

A equação ajustada na Figura 6 foi usada para determinar os intervalos de concentrações de P disponível (extraível), além de servir para calcular as doses de fósforo em função da produtividade máxima agrônômica (Souza et al., 2021). Assim, para soja as faixas de suficiên-

cia de P no solo foram estratificadas em cinco classes de fertilidade: muito baixa, correspondente a $< 50\%$ (PR); baixa, $50\text{--}70\%$ (PR); média, $70\text{--}90\%$ (PR); adequada, $90\text{--}100\%$ (PR); e alta $> 100\%$ (PR), estabelecidas conforme Rajj (2011).

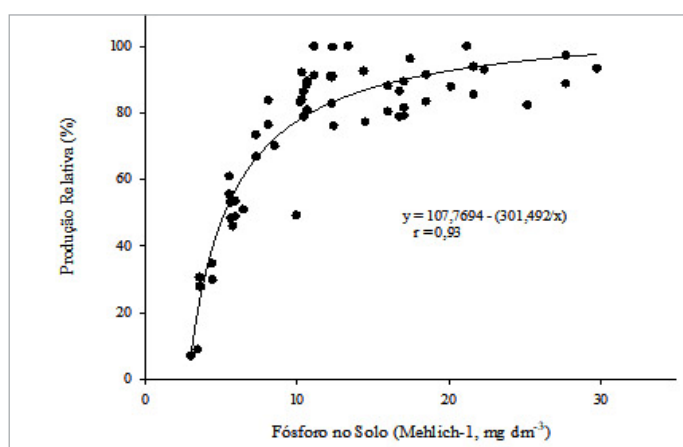


Figura 5. Rendimento relativo de grãos de soja em função do fósforo no solo (Mehlich-1). Bom Jesus, PI.

Fonte: Souza et al. (2021).

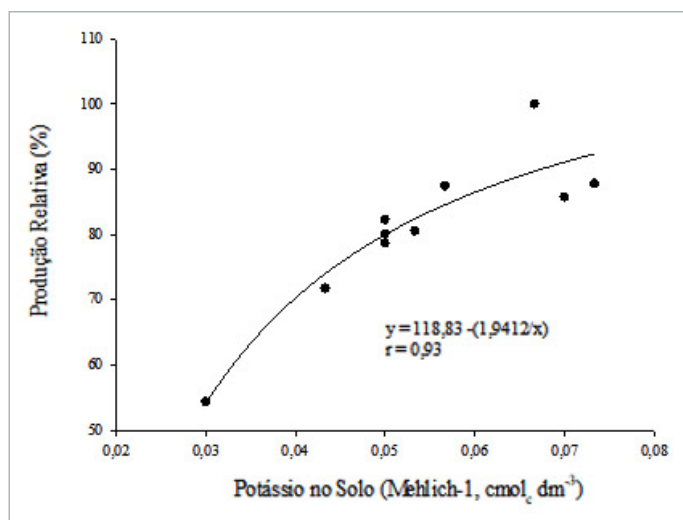


Figura 6. Rendimento relativo de grãos de soja em função da concentração de potássio no solo (Mehlich-1). Bom Jesus, PI.

Fonte: Souza et al. (2021).

Em relação ao potássio para feijão-caupi, foram definidas quatro classes de acordo com o teor de K^+ no solo, mas não houve influência da textura do solo sobre as recomendações desse nutriente (Melo et al., 2018b).

Para a geração das faixas de suficiência de potássio para a cultura da soja, utilizaram-se doses do nutriente referentes a dados de experimentação realizada no sul piauiense com a cultura da soja, empregando-se o modelo inverso de primeira ordem (Figura 6) (Souza et al., 2021). As classes de interpretação das concentrações de potássio no solo foram estratificadas em quatro classes de fertilidade: baixa, <70% (PR); média, 70–90% (PR); adequada, 90–100% (PR); e alta >100% (PR), conforme a equação da Figura 6.

Baseado em funções de resposta, foram definidas as recomendações de fósforo e de potássio para as culturas de soja e de feijão-caupi apresentadas nas Tabelas 11 e 12, respectivamente.

Considerando-se as sugestões de classes de interpretação de fósforo e de potássio no solo, foram estabelecidas sugestões de adubação (Tabela 13) para a cultura do feijão-caupi (Melo et al., 2018b).

Tabela 11. Classes de interpretação de P disponível (método Melich-1) para as culturas de soja e de feijão-caupi na região Meio-Norte do Brasil, 2018 e 2021.

Cultura	Teor de argila	Muito Baixa	Baixa	Média	Adequada	Alta
				mg dm ⁻³		
Soja	< 35% argila	< 5,2	5,3 a 8,0	8,1 a 17,0	17,1 a 38,7	≥ 38,8
		Baixa	Média	Alta	Muito alta	
Feijão-caupi	< 35% argila	≤ 9,0	9,1 a 12,0	12,1 a 17,0	≥ 17,1	
	≥ 35% argila	≤ 8,0	8,1 a 11,0	11,1 a 17,5	≥ 17,6	

Fonte: Melo et al. (2018b) e Souza et al. (2021).

Tabela 12. Classes de interpretação de K trocável (método Melich-1) para as culturas de soja e de feijão-caupi na região Meio-Norte do Brasil, 2018 e 2021.

Cultura	Baixa	Média	Adequada	Alta
		----- K (mg dm ⁻³) -----		
Soja ⁽¹⁾	< 15	15 a 26	27 a 40	≥ 41
		----- K (cmol _c dm ⁻³) -----		
	< 0,04	0,04 a 0,07	0,07 a 0,10	≥ 0,10
	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Feijão-caupi ⁽²⁾		----- K (mg dm ⁻³) -----		
	≤ 89	90 a 117	118 a 144	≥ 145
		----- K (cmol _c dm ⁻³) -----		
	≤ 0,23	0,24 a 0,30	0,31 a 0,37	≥ 0,37

⁽¹⁾Até 35% de argila.

⁽²⁾Texturas média e argilosa (Melo et al., 2018).

Fonte: Melo et al. (2018b) e Souza et al. (2021).

Tabela 13. Sugestão de adubação fosfatada para a cultura do feijão-caupi com base em classes de interpretação do nutriente no solo na região Meio-Norte do Brasil, 2018.

Nutriente	Textura do solo	Baixa	Média	Alta	Muito alta
----- kg ha ⁻¹ -----					
P ₂ O ₅	Média ⁽¹⁾	80	60	40	20
	Argilosa ⁽²⁾	100	80	60	40
K ₂ O	Média e Argilosa	65	55	45	35

⁽¹⁾Até 35% de argila.

⁽²⁾Igual ou maior que 35% de argila.

Fonte: Melo et al. (2018b).

Considerando-se a elevada exigência em fertilidade para a obtenção de retorno compensatório com o cultivo da soja, sugere-se o emprego do método da adubação corretiva, com o objetivo de se atingir concentração dos nutrientes no solo próxima ao nível crítico (Sousa; Lobato, 2004), apresentando-se duas opções para a adubação fosfatada corretiva: *a*) correção do solo com uma única aplicação; e *b*) correção gradativa (Tabela 14). Em ambos os casos, uma vez o solo corrigido, sugere-se a adubação de manutenção. Conforme Sousa e Lobato (2004), a adubação corretiva com aplicação única pode ser empregada a lance, incorporando-se o adubo à camada arável (0,00–0,20 m); nos casos em que a dose é inferior a 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, deve-se aplicar o fertilizante de forma localizada, no sulco de semeadura.

Quando o nível de P no solo estiver classificado como médio, adequado ou alto (Tabela 14), deve-se usar somente a adubação de manutenção, que corresponde a 20 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para cada 1.000 kg de grãos produzidos (Tecnologias..., 2013).

Rambo (2018) avaliou a resposta da soja às adubações fosfatada (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e potássica (0, 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ de K₂O) em áreas do Cerrado piauiense com teores iniciais de P e de K no solo considerados baixos, médios e altos. O autor concluiu que, nas áreas onde a interpretação dos teores iniciais é adequada ou média, a adubação de manutenção atende as necessidades da cultura; por outro lado, há a necessidade de fornecimento de maiores quanti-

dades dos elementos P e K nos solos com teores iniciais baixos. O autor observou resposta em produtividade de grãos na área com teores iniciais baixos e falta de resposta nas áreas com teores iniciais médios e altos, inclusive nos tratamentos onde foram aplicadas quantidades acima das sugeridas pelo manual de adubação do Cerrado (Sousa; Lobato, 2004).

Tabela 14. Sugestão de adubação fosfatada para a cultura da soja com base em classes de interpretação do nutriente no solo na região Meio-Norte do Brasil, 2013.

Teor de Argila	Adubação fosfatada (P_2O_5 , kg ha ⁻¹) ⁽¹⁾			
	Corretiva total ⁽²⁾		Corretiva gradual ⁽³⁾	
	P muito baixo ⁽⁴⁾	P baixo ⁽⁴⁾	P muito baixo ⁽⁴⁾	P baixo ⁽⁴⁾
g kg ⁻¹				
> 600	240	120	100	90
400 a 600	180	90	90	80
200 a 400	120	60	80	70
≤ 200	100	50	70	60

⁽¹⁾Fósforo solúvel em citrato de amônio neutro mais água, para os fosfatos acidulados; solúvel em ácido cítrico 2% (relação 1:100) para termofosfatos, fosfatos naturais e escórias.

⁽²⁾Adubação fosfatada corretiva a lanço; além da dose de correção total, usar adubação de manutenção.

⁽³⁾No sulco de semeadura, em substituição à adubação de manutenção.

⁽⁴⁾No sulco de semeadura, em substituição à adubação de manutenção.

Fonte: Tecnologias [...] (2013).

A recomendação das doses de adubo potássico está apresentada na Tabela 15, com sugestão de adubação corretiva para concentrações classificadas como baixa e média, similar ao procedimento adotado por Vilela, Sousa e Silva (2004). Para valores acima de 100 kg ha⁻¹ de K₂O, recomenda-se parcelar a adubação para evitar possíveis perdas por lixiviação ou lavagem superficial (Louza; Lobato, 2004).

Para as faixas adequada e alta na semeadura da soja, como manutenção, aplicar 20 kg de K₂O para cada 1.000 kg de grãos que se espera produzir (Tecnologias [...], 2013).

Tabela 15. Sugestão de adubação potássica para a cultura da soja com base em classes de interpretação do nutriente no solo na região Meio-Norte do Brasil

Adubação potássica corretiva		Adubação potássica corretiva gradual	
Baixa	Média	Baixa	Média
----- K ₂ O (kg ha ⁻¹) -----			
135	110	75	70

Fonte: Souza et al. (2021).

Classes de interpretação dos atributos do solo na cultura da soja pelo método da linha de fronteira

A geração de classes de interpretação dos atributos químicos pelo método da linha de fronteira permite o aproveitamento de banco de dados. O método consiste em traçar o rendimento como fator dependente contra um fator independente (atributos do solo), removendo-se alguns pontos e deixando-se apenas os pontos do limite de determinado atributo, ajustando-se a função polinomial de segundo grau para obter a faixa ótima do fator independente.

Assim, empregou-se um banco de dados proveniente de experimentações com soja cultivada em sucessão ao consórcio de milho com gramíneas forrageiras em Brejo, MA, e em Bom Jesus, PI, cujas amostras foram coletadas ao longo de 2 anos agrícolas e de 104 amostras de solo em parcelas experimentais na camada de 0,0–0,1 m para determinação de atributos químicos (pH_{H2O}, MO, P, K, Ca e Mg), bem como para determinar o rendimento de grãos de soja nas parcelas. Após a eliminação de *outliers* e gerando-se a curva quadrática, é possível produzir classes de interpretação por atributo a partir do ponto de máximo (Souza et al., 2022).

A média de rendimento foi de 3.208 kg ha⁻¹ (máximo: 4.169 kg ha⁻¹; mínimo: 2.040 kg ha⁻¹). O modelo quadrático apresentou significância em relação a cinco atributos do solo (pH, MO, P, K e Mg), utilizando-se cinco classes para pH (R²=0,87), K (R²=0,97) e Mg (R²=0,90), seis classes para P (R²=0,92) e sete classes para MO (R²=0,78) (Souza et al., 2022) (Figura 7). Para o cálcio, não foi possível gerar um modelo qua-

drático, o que é imprescindível para determinar a linha de fronteira. As classes de interpretação para o nível considerado adequado de pH, MO, P, K e Mg foram: 5,4–6,0; 2,5–4,1 dag kg⁻¹; 47,7–74,6 mg dm⁻³; 0,24–0,42 cmol_c dm⁻³; e 0,69–1,43 cmol_c dm⁻³, respectivamente (Souza et al., 2022). Na Tabela 16, é possível verificar as classes de interpretação baseadas em 95 e 80% da produtividade máxima, sendo derivadas as classes muito baixo, baixo, adequado, alto e muito alto.

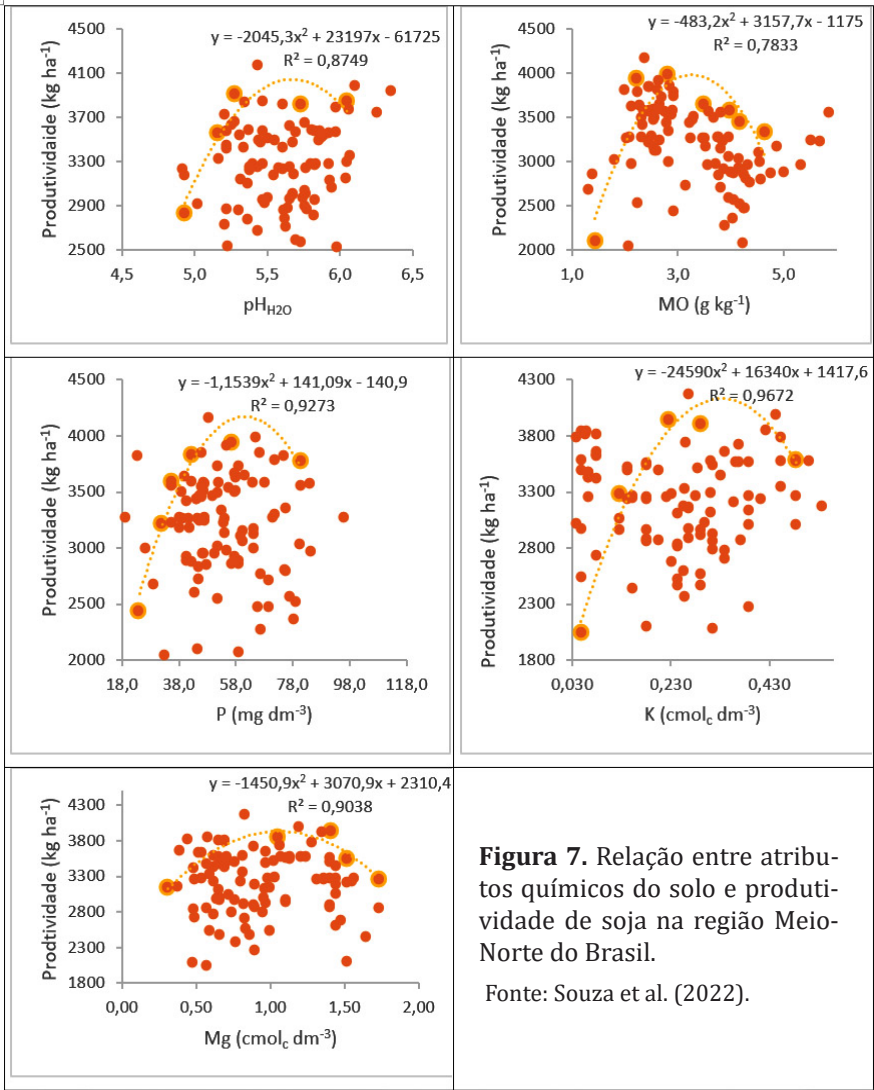


Figura 7. Relação entre atributos químicos do solo e produtividade de soja na região Meio-Norte do Brasil.

Fonte: Souza et al. (2022).

Tabela 16. Classes de interpretação de atributos químicos do solo (0,0–0,1 m) para a cultura da soja na região Meio-Norte do Brasil, 2022.

Atributo	Muito Baixo	Baixo	Adequado	Alto	Muito Alto
pH _{H2O}	<5,0	5,0-5,3	5,4-6,0	6,1-6,3	>6,3
MO (g kg ⁻¹)	<1,6	1,6-2,4	2,5-4,1	4,2-4,9	>5,0
P (mg dm ⁻³)	<34,2	34,2-47,6	47,7-74,6	74,7-88,0	>88,0
K (cmol _c dm ⁻³)	<0,15	0,15-0,23	0,24-0,42	0,43-0,52	>0,52
K (mg dm ⁻³)	<59	60-90	91-164	165-202	>202
Mg (cmol _c dm ⁻³)	<0,32	0,32-0,68	0,69-1,43	1,44-1,79	>1,79

Fonte: Souza et al. (2022).

Faixas de suficiência para avaliação da diagnose foliar em feijão-caupi e em soja

A avaliação do estado nutricional das plantas constitui-se em etapa importante do programa de adubação empregado, permitindo analisar a eficiência da fertilização empregada, bem como ajustes necessários à safra futura. Dessa maneira, a análise foliar constitui-se em ferramenta fundamental para tomada de decisão, sendo necessário usar padrões regionalizados para a correta interpretação do estado nutricional: i) deficiência – abaixo da faixa de suficiência; ii) adequado – dentro do intervalo da faixa de suficiência; e iii) excesso – acima da faixa de suficiência.

Na região Meio-Norte, há parâmetros definidos para as culturas do feijão-caupi e da soja, conforme apresentado na Tabela 16. Em ambas as culturas, define-se a coleta do terceiro trifólio de cima para baixo no período do florescimento da cultura; para o feijão-caupi, a coleta com o pecíolo (Melo et al., 2020; Cruz et al., 2022) e para a soja, sem o pecíolo (Souza et al., 2020; Souza et al., 2023b). Os métodos que permitiram gerar as faixas preconizadas (Tabela 17) foram os métodos da linha de fronteira para o feijão-caupi e para a soja e os métodos do DRIS e da CND para a soja.

Tabela 17. Faixas de suficiência de macro e micronutrientes para as culturas do feijão-caupi e da soja por diferentes métodos na região Meio-Norte do Brasil, 2020 e 2023.

Cultura	Método	g kg ⁻¹						
		N	P	K	Ca	Mg	S	
Soja	LF (95%)	34,2-50,2	2,8-4,0	16,9-22,2	8,2-12,5	3,9-5,9	1,7-3,1	
	LF (99%)	38,6-45,7	3,1-3,7	18,3-20,7	9,4-11,3	4,4-5,3	2,1-2,7	
	DRIS	41,7-50,9	3,2-4,1	17,4-20,9	9,1-12,3	4,9-6,4	2,2-3,0	
	CND	40,7-49,9	3,2-4,0	17,1-20,6	8,8-12,0	4,8-6,2	2,2-3,0	
Feijão-caupi	LF (95%)	34,4-44,7	1,7-2,9	18,6-23,6	8,8-13,7	2,3-3,5	-	
	LF (99%)	37,2-41,8	2,0-2,5	20,0-22,2	10,2-12,4	2,6-3,1	-	
Cultura	Método	mg kg ⁻¹						
		B	Cu	Fe	Mn	Zn		
Soja	LF (95%)	24-64	9-17	115-145	8-60	52-73		
	LF (99%)	35-53	10-14	131-159	23-46	58-68		
	DRIS	35-72	11-26	134-266	22-78	51-71		
	CND	35-71	11-25	133-266	12-68	53-74		
Feijão-caupi	LF (95%)	-	3,1-5,4	73-210	104-181	22-27		
	LF (99%)	-	3,7-4,7	110-173	120-160	23-26		

LF (95%) – Método da linha de fronteira com faixas geradas a partir de 95% da produtividade máxima. LF (99%) – Método da linha de fronteira com faixas geradas a partir de 99% da produtividade máxima. DRIS – Sistema integrado de diagnose e recomendação. CND – Diagnose da composição nutricional.

Fonte: Melo et al. (2020) e Souza et al. (2020, 2023b).

Outras ferramentas de avaliação do estado nutricional de plantas: Nutri Meio-Norte

O Nutri Meio-Norte foi criado para ser uma plataforma de avaliação do estado nutricional, por meio da diagnose foliar de culturas de interesse econômico nos estados do Maranhão e do Piauí. O primeiro módulo foi idealizado para a cultura da soja, assim como um banco de dados de lavouras comerciais nos cerrados do sul e leste maranhenses e do sul piauiense (Alto e Médio Parnaíba), os quais tinham resultados de análise foliar (macro e micronutrientes) e de produtividade de grãos das respectivas culturas. A partir desses dados, foi possível criar normas para avaliação do estado e balanço nutricionais pelos métodos do sistema integrado de recomendação e diagnóstico (DRIS) e da diagnose da composição nutricional (CND) (Souza et al., 2019).

O uso de ambas as ferramentas propicia, especialmente aos produtores da região, verificar o balanço de nutrientes de seus talhões, com possibilidade de diagnosticar os nutrientes em excesso, em deficiência ou em equilíbrio e, entre esses, qual se apresenta com maior desequilíbrio por excesso ou por deficiência. Adicionalmente, é possível mensurar os índices nutricionais IBN para o DRIS ou CND-r2 para o CND, os quais representam o índice de balanço nutricional ou de desequilíbrio nutricional (Souza et al., 2019).

- O software Nutri Meio-Norte: Soja está disponível:
- web (www.embrapa.br/meio-norte)
- aplicativos da Embrapa (<https://www.embrapa.br/aplicativos>)
- GooglePlay (<https://play.google.com/store/apps/developer?id=Embrapa>)
- Apple Store (<https://itunes.apple.com/br/developer/embrapa/id922604501?l=en>)

Considerações finais e perspectivas

A pesquisa científica é, portanto, aliada fundamental para o desenvolvimento de práticas agrícolas eficientes e sustentáveis, garantindo a segurança alimentar e preservando a fertilidade dos solos nas áreas agrícolas. O conhecimento adquirido por meio desses estudos pode contribuir para uma gestão mais adequada dos recursos naturais, possibilitando o crescimento responsável da produção agrícola e promovendo o bem-estar da população que vive nessas áreas.

Os trabalhos de fertilidade do solo, de nutrição de plantas e de adubação de culturas apresentados sugerem expressiva produção científica, focada principalmente nas culturas de maior interesse econômico, cultivadas no Cerrado da região Meio-Norte do Brasil, como soja, milho e feijão-caupi.

Há a necessidade de realizar trabalhos na temática de fertilidade do solo e nutrição de plantas para sistemas de produção de baixa capacidade de investimento, para sistemas agroecológicos e para agricultura familiar da região Meio-Norte do Brasil.

O manejo da fertilidade dos solos do Cerrado dos estados do Maranhão e do Piauí é de fundamental atenção para os aspectos de correção da acidez do solo e fornecimento de macronutrientes e micronutrientes, de acordo com a condição inicial do solo e a espécie cultivada ou sistema de culturas. Há de considerar também as dificuldades quanto ao transporte dos insumos, o que aumenta o custo de produção. Por outro lado, os preços relativamente baixos das terras, a possibilidade de acesso às linhas de crédito e aos resultados de pesquisa locais realizados pela Embrapa e pelas universidades têm favorecido os investimentos na fertilidade dos solos do Cerrado dos dois estados ao longo dos últimos anos.

Considerando-se a diversidade de sistemas agrícolas e condições específicas de solo e clima, há a necessidade de esforços multi-institucionais que capitalizem as informações existentes e proporcionem a reunião de informações em publicações técnicas para a recomendação de corretivos e fertilizantes para a região Meio-Norte do Brasil.

Referências

- ALCÂNTARA NETO, F. de; GRAVINA, G. A.; SOUZA, N. O. S.; BEZERRA, A. A. de C. Adubação fosfatada na cultura da soja na microrregião do Alto Médio Gurguéia. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 2, p. 261-271, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902010000200014>.
- ALMEIDA, K. N. S. de; SILVA, J. B. L. da.; NÓBREGA, J. C. A.; RATKE, R. F.; SOUZA, K. B. de. Aptidão agrícola dos solos do estado do Piauí. **Nativa**, v. 7, n. 3, p. 233-238, 2019. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i3.7119>.
- ALMEIDA, A. L. G. de; MINGOTTE, F. L. C.; COELHO, A. P.; LEMOS, L. B.; MELO, F. de B.; PRADO, R. de M. Agronomic performance of cowpea cultivars (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) under application of limestone doses. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 2, e8373, 2021. Disponível: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1131627/1/Agronomic-performance.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2026.
- ARAÚJO, G. L. de. **Adubação foliar de manganês na cultura da soja no cerrado maranhense**. 2018. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/2233>. Acesso em: 22 jan. 2026.
- BARBOSA, L. M. P. de; SANTOS, T. P. da S.; ROCHA, S. M. B.; SANTOS, T. O. da S.; OLIVEIRA, L. M. de S.; ALCÂNTARA NETO, F. de; ARAÚJO, A. S. F. de; SOUZA, H. A. de; NUNES, L. A. P. L.; SOUSA, R. S. de. Composts from bovine rumen and chicken litter improve soil fertility and promote the growth of pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) Research Square, 14 June 2023. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3046861/v1>.
- BARREIRA, H. M. **Inoculação foliar e adubação nitrogenada na cultura do milho**. 2015. Paginação irregular. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina. Disponível em: http://repositorio.ufpi.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/168/Dissertacao_hygor_pronta.pdf?sequence=1. Acesso em: 23 jan. 2026.
- BARROS, J. S.; HARIDASA, M.; FARIAS, R. R. S. de.; MENDES, M. R. de A.; CASTRO, A. A. J. F.; SOUSA, S. R. de; LOPES, R. N. Influência da geologia e fertilidade do solo nas fitofisionomias e estrutura da vegetação em área de transição edafoclimática da bacia do Parnaíba-Piauí, nordeste do Brasil. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, ano 1, n. 1, p. 6-19, jul./dez. 2020. DOI: <https://periodicos.ufpi.br/index.php/acipi/article/view/702/665>.
- BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B.; RIBEIRO, V. Q.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de. **Produtividade de grãos de milho sob diferentes doses de nitrogênio e potássio em solos de cerrado do sudoeste piauiense**. Teresina: Embrapa Meio-

Norte, 2005. 17 p. (Embrapa Meio-Norte. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 59). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/68844/1/BOLP59.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2026.

BELFORT, C. C.; SILVA, T. F.; NERY, E. B.; SOUZA NETO, F. A. de; COSTA FILHO, R. T. da; LIMA, T. R. de; BELFORT, R. E. de A. U. Respostas do coentro à aplicação do nitrogênio via foliar e no solo. **Revista Científica Multidisciplinar**, v. 4, n. 5, 2023. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i5.3094>.

BORKERT, C. M.; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; KLEPKER, D.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. de. O potássio na cultura da soja. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2., 2004, São Pedro, SP. Anais... Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fostato, 2005. p. 671-722. Editado por Tsuioshi Yamada, Terry L. Roberts.

BRESSAN, S. B.; NÓBREGA, J. C. A.; NÓBREGA, R. S. A.; BARBOSA, R. S.; SOUSA, L. B. Plantas de cobertura e qualidade química de Latossolo Amarelo sob plantio direto no cerrado maranhense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 4, p. 371-378, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400003>.

CHAGAS JUNIOR, F. P. S. **Teor de Clorofila e produtividade do milheto em função da adubação nitrogenada em cobertura**. 2013. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha.

CRUZ, G. dos S. da; VERA, G. de S.; SOUZA, I. M. de; FERREIRA, A. C. M.; SILVA, K. J. D. e; ALCANTARA, R. M. C. M. de; MELO, F. de B.; SOUZA, H. A. de. Optimal economical dose of nitrogen and diagnostic leaf to assess the nutritional status of cowpea. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 21, n. 1, p. 1-7, 2022. DOI: 10.5965/223811712112022001.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L. de; BALIEIRO, F. de C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C. de; SANTOS, F. C. dos; ALBUQUERQUE, M. R. de; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, set. 2016. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1055141/1/2016045.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2026.

FERREIRA, A. C. M.; SOUZA, H. A. de; SAGRILO, E.; SILVA JÚNIOR, G. B. da; NATALE, W.; SOBRAL, A. H. S.; VERA, G. de S.; SANTOS, S. F. C. B. dos. Absorption, partitioning, and export of nutrients by phenological stage in maize cultivated in Eastern Maranhão, Brazil. **Journal of Plant Nutrition**, v. 47, n. 2, p. 240-256, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2275072>.

FRANCISCO, E. A. B.; CÂMARA, G. M. de S. **Desafios atuais para o aumento da produtividade da soja**. *International Plant Nutrition Institute*, 2013. p. 11-16. (Informação agrônômicas, 143). Disponível em: [https://www.npct.com.br/publication/ia-brasil.nsf/0/3FD8739C10AC786083257BF80046F586/\\$FILE/Page11-16-143.pdf](https://www.npct.com.br/publication/ia-brasil.nsf/0/3FD8739C10AC786083257BF80046F586/$FILE/Page11-16-143.pdf). Acesso em: 26 jan. 2026.

GASPAR, J. C. da; FURTADO, M. B.; SILVA, W. J. dos S.; REIS, I. dos S.; MACHADO, N. A. F.; FARIAS, M. F. de; FURTADO, J. L. B.; ANDRADE, H. A. F. de; SOBRAL, R. da S.; PARRA-SERRANO, L. J.; RODRIGUES, K. de M.; SILVA-MATOS, R. R. S. Impacts of Residual Phosphorus on the Production of Cowpea in the Cerrado Region. *American Journal of Plant Sciences*, v. 9, n. 4, p. 645-658, 2018. DOI: 10.4236/ajps.2018.94051.

GARRETO, F. G. S.; FARIAS, M. F.; RODRIGUES, K. M.; FURTADO, M. B.; MENESES, K. C.; SOARES, F. A. Produtividade de cultivares de cenoura em função de doses de fósforo. In: FARIAS, M. F.; FURTADO, M. B.; PARRA-SERRANO, L. J.; FREITAS, J.R. B.; FERRÃO, G. E. **Tópicos em produção agrícola no leste maranhense**: livro comemorativo dos 10 anos do Curso de Agronomia CCAA/UFMA. São Luís: EDUFMA, 2016. p. 59-66.

KLEPKER, D. Desafios para melhoria da qualidade do solo no Cerrado das novas fronteiras agrícolas. In: LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; ARAÚJO, A. S. F. de (ed.). **Agri-cultura conservacionista no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 217-230.

LEITE, L. F. C.; FREITAS, R. de C. A. de; SAGRILO, E.; GALVÃO, S. R. da S. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos vegetais depositados sobre Latossolo Amarelo no Cerrado Maranhense. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, n. 1, p. 29-35, jan./mar. 2010. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/783247/1/RCAV41N129.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2026.

LEITE, L. F. C.; PETRESE, V. G.; SAGRILO, E. Sequestro de carbono em solos da região semiárida brasileira estimado por modelo de simulação em diferentes sistemas produtivos. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL: CLIMA, SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO EM REGIÕES SEMIÁRIDAS - ICID+18, 2., 2010, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza: BND-ETENE: MMA, 2010. Disponível em: www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1014822/1/ArtigoAnaisCongressoLuizFernando.pdf. Acesso em: 27 jan. 2026.

LIMA, S. M. S. A.; LOPES, W. G. R.; FAÇANHA, A. C. Changes in land coverage in Teresina City, Piauí State, Brazil. *Sociedade & Natureza*, v. 33, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v33-2021-58922>.

LUSTOSA FILHO, J. F.; NÓBREGA, J. C. A.; FURTINI NETO, A. E.; SILVA, C. A.; NÓBREGA, R. S. A.; PRAGANA, R. B.; DIAS, B. O.; GMACH, M. R. Nutrient availability and organic matter content under different soil use and management. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 12, n. 4, p. 475-483, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i4a5481>.

MACIEL, I. R. P. **Zinco e boro no solo e parâmetros produtivos do milho cultivado no cerrado Sudoeste piauiense**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus.

MARAFON, G.; BARBOSA, R. S.; LACERDA, J. J. de J; MARTINS, V.; SILVA, J. de D. F e; COSTA JÚNIOR, O. S. C and P pool restoration by a no-tillage system on Brazilian Cerrado Oxisol in Piauí State. **Environmental Monitoring Assessment**, v. 192, n. 254, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8221-6>.

MARQUES, R. G. G.; VALLADARES, G. S. Qualidade dos solos urbanos em áreas verdes de Teresina (PI). **Revista Equador**, v. 10, n. 1, p. 136-159, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpi.br/index.php/revistaequador/article/view/7682/5880>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MATIAS, S. S. R.; BAPTISTEL, A. C.; NÓBREGA, J. C. A.; ANDRADE, F. R.; SILVA, J. B. L da. Variabilidade espacial dos atributos do solo em duas áreas de manejo convencional no Cerrado piauiense. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 2, p. 217-227, 2015. DOI: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/rca.1687>.

MELO, F. de B.; CARDOSO, M. J.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de; ATHAYDE SOBRINHO, C. Efeitos de níveis de potássio na produção de matéria seca de feijão caupi. In: REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRICAÇÃO DE PLANTAS, 22., 1996, Manaus. Resumos expandidos... Manaus: UA / FCA / EMBRAPA / INPA, 1996. p. 312-313.

MELO, F. de B.; CARDOSO, M. J.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de. Nutrição e adubação. In: CARDOSO, M. J. (org.). **A cultura do milho no Piauí**. 2. ed. rev. e atual. Teresina: EMBRAPA-CPAMN, 1998. p. 46-67. (EMBRAPA-CPAMN. Circular técnica, 12).

MELO, F. de B.; CARDOSO, M. J.; SALVIANO, A. A. C. Fertilidade do solo e adubação. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. de A.; RIBEIRO, V. Q. (ed.). **Feijão-caupi: Avanços tecnológicos**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2005. cap. 6. p. 229-242.

MELO, F. de B.; CORÁ, J. E.; CARDOSO, M. J. Fertilização nitrogenada, densidade de plantas e rendimento de milho cultivado no sistema plantio direto. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 27-31, jan./mar. 2011. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/885332/1/FertilizacaoMilho-Brito.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MELO, F. de B.; CARDOSO, M. J. Solos e adubação. In: BASTOS, E. A. de (ed.). **Cultivo de Feijão-Caupi**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Versão eletrônica. (Embrapa Meio-Norte. Sistema de produção, 2; Embrapa Amazônia Ocidental. Sistema de produção, 2; Embrapa Agrobiologia. Sistema de produção, 4). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1071735/1/Sistema-ProducaoCaupiCapituloSolosAdubacao.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MELO, F. de B.; BASTOS, E. A. de; CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q. Cowpea response to phosphorus and zinc. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 1, p. 240-245, jan./mar. 2018a. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1084335/1/RevistaCaatinga31n1p240.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MELO, F. de B.; CARDOSO, M. J.; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q. **Recomendação de adubação e calagem para o feijão-caupi na Região Meio-Norte do Brasil**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2018b. 8 p. (Embrapa Meio-Norte. Comunicado Técnico, 249). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1101331/1/Comunicado249.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MELO, F. de B.; SOUZA, H. A. de; BASTOS, E. A. de; CARDOSO, M. J. Critical levels and sufficiency ranges for leaf nutrient diagnosis in cowpea grown in the Northeast region of Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 4, e20196954, 2020. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1125123/1/CriticalSufficiencyNutrientCowpeaRCA2020.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MELO, F. de B.; BASTOS, E. A. de; CARDOSO, M. J.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de. **Fertilizações nitrogenada e potássica e produtividades técnica e econômica de milho cultivado no Cerrado da Região Leste maranhense**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2021a. 21 p. (Embrapa Meio-Norte. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 130). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1133654/1/FertilizacoesNitrogenadaPotassicaMilhoCultivado.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MELO, F. de B.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de; SOUZA, H. A. de; SOUZA, M. O. **Disponibilidade de nutrientes e de matéria orgânica em função do tempo de uso do solo em plantio direto no Cerrado do Sudoeste piauiense**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2021b. 25 p. (Embrapa Meio-Norte. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 142). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1141176/1/DisponibilidadeNutrientesMateriaOrganicaBoletim142.2021.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MIRANDA, E. E. de; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. de. **Proposta de delimitação territorial do MATOPIBA**. Campinas: Embrapa, 2014. 18 p. (Embrapa. Nota Técnica GITE, 1). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1037313/1/NT1DelimitacaoMatopiba.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

NAVA, G.; SETE, P. B.; NACHTIGALL, G. R.; MOURA-BUENO, J. M.; BRUNETTO, G.; MULAZZANI, R. P.; CIOTTA, M. N.; TAGLIAVINI, M.; ZANOTELLI, D.; GALLI, G.; HAUSER, B. Balanço de nutrientes em pomares. In: BRUNETTO, G.; ROZANE, D. E.; LOSS, A.; NATALE, W. (ed.). Estratégias de manejo para melhorar o aproveitamento de nutrientes em frutíferas. Santa Maria: Palotti, 2023. cap. 3, p. 53-75.

NOBRE, R. S.; ARAÚJO, V. de S.; CARVALHO, A. C. C. de; SANTOS, C. de M.; SOUSA, T. K. R. de; REZENDE, J. S. Adução fosfatada na produção do capim Mombaça no semiárido. In: PESSOA, W. R. L. S.; GRANGEIRO, D. C.; AZAR, G. S. (org.). **Pesquisas no semiárido piauiense**. Teresina: EdUESPI, v. 7, 2022. p. 100-110. Disponível em: <https://editora.uespi.br/index.php/editora/catalog/view/102/94/512-1>. Acesso em: 28 jan. 2026.

OFOE, R.; THOMAS, R. H.; ASIEDU, S. K.; PRUSKI, G. W.; FOFANA, B.; ABBEY, L. Aluminum in plant: benefits, toxicity and tolerance mechanisms. **Frontiers Plant Science**, v. 13, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085998>.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. de; PROCHNOW, L. I.; KLEPKER, D. Eficiência agrônômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 5, p. 623-631, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000500010>.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. de; PROCHNOW, L. I.; KLEPKER, D. Soybean yield in response to application of phosphate rock associated with triple superphosphate. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 3, p. 376-385, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000300016>.

ONU. Department of Economic and Social Affairs Population Division. **World Population Prospects 2019: Highlights**. Disponível em: https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2019_Highlights.pdf. Acesso em: 28 jan. 2026.

PEREIRA, A. dos S. Análise das tendências de aplicação do conceito de periurbano. **Terr@ Plural**, v. 7, n. 2, p. 287-304, 2013. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/tp/article/view/4345/3947>. Acesso em: 29 jan. 2026.

PETTER, F. A.; SILVA, J. A. da; ALMEIDA, F. A.; PACHECO, L. P.; ALMEIDA, F. A. DE.; ALCÂNTARA NETO, F. de; ZUFFO, A. M.; LIMA L. B de. Desempenho agrônômico da soja a doses e épocas de aplicação de potássio no cerrado piauiense. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 55, n. 3, p. 190-196, jul./set. 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.4322/rca.2012.057>.

PIRES, M. de F. M.; SOUZA, H. A. de; MEDERIOS, J. C.; ROSA, J. D.; MARTINS, R. V. de S.; SOBRAL, A. H. S.; CARVALHO, S. P.; VERA, G. de S.; VIEIRA, P. F. de M. J.; SAGRILO, E. Nutrient uptake by soybean plants in succession of cover crops in Northeast of Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, n. 7, p. 945-963, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2137183>.

PROCHNOW, J. T.; SCHMID, L. P.; MEDEIROS, J. C.; MIELEZRSKI, F. Response to late foliar nitrogen application in soybean productivity. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 15, n. 1, p. 1-5, 2017. DOI: [10.9734/JEAI/2017/30258](https://doi.org/10.9734/JEAI/2017/30258).

RAIJ, B. van. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. 233 p. Disponível em: <https://biblioteca.iac.sp.gov.br/Resultado/Listar?guid=1769711250351>. Acesso em: 29 jan. 2026.

RAMBO, T. P. **Adubação fosfatada e potássica na cultura da soja no cerrado piauiense**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus, 2018.

RATKE, R. F.; ZUFFO, A. M.; SOUZA, H. A. de; MARTINS, R. V. de S.; LUZ, R. dos S.; PEREIRA, P. R. R. X. Micronutrientes via foliar na cultura da soja no Cerrado Piauiense. In: ZUFFO, A. M.; AGUILERA, J. G. (org.). **Agronomia: Avanços e Perspectivas**. Pantanal: Nova Xavantina, 2020. cap. 7, p. 81–90. DOI: 10.46420/9786599120862cap7.

REIS, I. dos S. **Produção de milho em função da adubação nitrogenada pela quantificação do teor de clorofila**. 2016. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/1268/1/IsaiasReis.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2026.

REIS, I. dos S.; FURTADO, M. B.; SANTOS, K. R.O. dos; ALMEIDA, H. M. S.; AMORIM, D. J. Produtividade do milho em resposta à adubação orgânica com esterco bovino e cama de frango. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal. **Resumos [...]** Natal: SBCS, 2015. Disponível em: <https://eventossilos.org.br/cbcs2015/arearestrita/arquivos/252.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2026.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ V. V. H. (ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5. Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p. Título da capa: Recomendacoes para o uso...

SANTOS, A. G. **Doses de map, defensivos, micronutrientes e inoculantes no tratamento de semente na nutrição nitrogenada, fosfatada e produtividade de grãos de soja**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Agrônoma) – Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus.

MARANHÃO. Secretaria de Estado de Indústria e Comércio. **Mineração**. Disponível em: <https://seinc.ma.gov.br/mineracao#:~:text=Calc%C3%A1rio,ultrapassam%2070%20milh%C3%B5es%20de%20toneladas>. Acesso em: 28 jul. 2023.

SILVA, A. R. A.; FURTADO, M. B.; NASCIMENTO, S. S.; FARIAS, M. F.; FURTADO, J. L. B.; PARRA-SERRANO, L. J. Rendimento do coentro, cultivar verdão, em função da adubação potássica em Latossolo Amarelo Distrófico. In: FARIAS, M. F.; FURTADO, M. B.; PARRA-SERRANO, L. J.; FREITAS, J. R. B.; FERRÃO, G. E. **Tópicos em produção agrícola no leste maranhense**: livro comemorativo dos 10 anos do Curso de Agronomia CCAA/UFMA. São Luís: EDUFMA, 2016. p. 67-74.

SILVA, R. S. da; FURTADO, M. B.; MACHADO, N. A. F.; ANDRADE, H. A. F. de; OLIVEIRA, A. R. F.; FARIAS, M. F. de; PARRA-SERRANO, L. J.; FURTADO, J. do L. B.; SILVA-MATOS, R. R. S.; LEITE, M. R. L. Effect of Boron (B) and lime on production of watermelon in dystrophic yellow latosol soil. **Australian Journal of Crop Science**,

v. 12, p. 1975-1982, 2018. DOI: <https://search.informit.org/doi/epdf/10.3316/informit.360535065691498>.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUSA, I. M. de; ROCHA, D. R. da; CUNHA, C. S. M.; GONÇALVES, I. C. S.; CASTRO, J. I. A. Adubação nitrogenada e modos de disponibilização de micronutrientes na produção de milho verde. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 13, n. 1, p. 15-21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.30969/acsa.v13i1.762>.

SOUSA, R. S. de; SANTOS, V. M.; MELO, W. J. de; NUNES, L. A. P. L.; BRINK, P. J. van den; ARAÚJO, A. S. F. Time-dependent effect of composted tannery sludge on the chemical and microbial properties of soil. *Ecotoxicology*, v. 26, p. 1366-1377, 2017. DOI 10.1007/s10646-017-1861-9.

SOUZA, H. A. de; ROZANE, D. E.; VIEIRA, P. F. de M. J.; PESSOA, B. L. de O.; CHAVES, F. R. **Nutri Meio-Norte**: Soja. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2019. 13 p. (Embrapa Meio-Norte. Comunicado técnico, 251). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1113947/1/Comunicado251NutriMeio-NorteAINFO11.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

SOUZA, H. A. de; VIEIRA, P. F. de M. J.; ROZANE, D. E.; SAGRILO, E.; LEITE, L. F. C.; FERREIRA, A. C. M. Critical levels and sufficiency ranges for leaf nutrient diagnosis by two methods in soybean grown in the Northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0190125, 2020. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1124296/1/CriticalLevelsSufficiencyRangesSoybeanRBCS2020.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

SOUZA, H. A. de; RATKE, R. F.; BOGIANI, J. C.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; NATALE, W.; BORIN, A. L. D. C.; CARVALHO, M. da C. S.; FERREIRA, G. B. Manejo da fertilidade do solo em sistemas intensivos de produção de grãos e fibras no bioma Cerrado do Nordeste Brasileiro. In: SOUZA, H. A. de; LEITE, L. F. C.; MEDEIROS, J. C. (ed.). **Solos sustentáveis para a agricultura no Nordeste**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Parte 2, cap. 2, p. 213-250. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1133410/1/SolosSustentaveisPt2.Cap2.P213-250.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

SOUZA, H. A. de; BRITO, L. de C. R. de; SILVA, A. A.; SAGRILO, E.; ANDRADE, H. A. F. de. Faixas de suficiência de atributos químicos do solo para a cultura da soja na região Meio-Norte empregando-se a linha de fronteira. In: REUNIÃO NORDESTINA DE CIÊNCIA DO SOLO, 7.; WORKSHOP DE TECNOLOGIAS DE INSUMOS AGRÍCOLAS, 1., 2022, Mossoró. Saúde do Solo, Sustentabilidade e Avanços na Agricultura do Nordeste – **Anais**. Mossoró: SBCS, 2022. p. 276.

SOUZA, H. A. de; SILVA, A. A.; CLARK, M. V. G.; FERREIRA, A. C. M.; BRITO, L. de C. R. de; SAGRILO, E.; LEITE, L. F. C.; NATALE, W.; ARRUDA, F. P. de; SOUZA FILHO, L. F. da S. **Exportação e balanço de nutrientes de culturas agrícolas do Nordeste brasileiro**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2023a. 89 p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 288). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1153863/1/ExportacaoBalancoNutrientesCulturasAgricolas-Doc288.2023-1.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

SOUZA, H. A. de; ROZANE, D. E.; VIEIRA, P. F. de M. J.; SAGRILO, E.; LEITE, L. F. C.; BRITO, L. C. R. de; CONCEIÇÃO, M. P.; FERREIRA, A. C. M. Accuracy of DRIS and CND methods and nutrient sufficiency ranges for soybean crops in the Northeast of Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 45, e59006, 2023b. DOI: 10.4025/actas-ciagron.v45i1.59006.

TECNOLOGIAS de produção de soja: região central do brasil 2014. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 265 p. (Embrapa Soja. Sistemas de produção, 16). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/975595/1/SP16online.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

THOMAZ, E. L. Interaction between ash and soil microaggregates reduces runoff and soil loss. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 1257- 1263, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.046>.

VERA, G. de S. Marcha de absorção de nutrientes e crescimento do feijão-caupi em sistemas convencional e mínimo. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Piauí, Teresina. Orientador: Antônio Aécio de Carvalho Bezerra; Coorientador: Henrique Antunes de Souza e Kaesel Jackson Damasceno e Silva.

VILELA, L.; SOUSA, D. M. G. de; SILVA, J. E. da. Adubação potássica. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p. 169-184. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/555355>. Acesso em: 30 jan. 2026.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. 4. ed. New York: MacMilan, 1985. 754 p.