1 INTRODUÇÃO

O Cerrado brasileiro ocupa a segunda maior posição entre os biomas do Brasil (2.045.064 km^2) em extensão territorial (Sano *et al*., 2010; IBGE, 2012), com presença significativa em diversos estados do país, a exemplo da Bahia, Maranhão e Piauí no Nordeste do Brasil, que juntamente com o estado do Tocantins formam a fronteira agrícola conhecida popularmente como Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia).

Nessas áreas, a agricultura tem apresentado crescimento constante, com destaque para culturas como soja (*Glycine max* L. Merrill), milho (*Zea mays*) e algodão (*Gossypium hirsutum* L.) (IBGE, 2012). Esse avanço está diretamente associado à adoção de práticas como a correção da acidez do solo, a fosfatagem corretiva e o uso estratégico de fontes fosfatadas, visando contornar as restrições químicas típicas dos Latossolos (Alvares *et al*., 2013).

Dentre as culturas cultivadas na região do Cerrado, a soja atualmente ocupa cerca de 23 milhões de hectares (CONAB, 2024), sendo a principal cultura agrícola em termos de área cultivada. Para que a soja atinja seu máximo potencial produtivo, é essencial o uso de manejos adequados e a busca por fontes de fertilizantes que promovam uma melhor disponibilização de nutrientes para as plantas.

O fósforo (P) é um nutriente essencial para a nutrição vegetal, contribuindo diretamente para a energia, crescimento e o aumento da produtividade das culturas (Cui *et al*., 2019; Luo *et al*., 2021). Sua contribuição está relacionada à participação em processos fisiológicos fundamentais, como a transferência de energia, através da molécula de adenosina trifosfato - ATP, e o metabolismo de carboidratos e lipídios (Marschner, 2012; Raij, 2019).

Devido à sua importância, e considerando as características dos solos do Cerrado, geralmente ácidos e com alta capacidade de adsorção de P, faz-se necessário a aplicação anual de fertilizantes fosfatados (Sousa; Lobato, 2004; Novais *et al*., 2007), para suprir as exigências da cultura e a manutenção dos níveis de P no solo.

No solo, o P pode ser classificado em frações lábeis (facilmente disponíveis, presentes na solução do solo e fracamente adsorvidos), moderadamente lábeis (associados a óxidos de ferro e alumínio ou a compostos orgânicos mais estáveis) e não lábeis (fortemente retidos em minerais ou precipitados com cálcio, ferro e alumínio). Fatores eletroquímicos, como pH, capacidade de troca catiônica (CTC) e o tipo de argila, interferem diretamente nas reações de adsorção e disponibilidade desse nutriente para as plantas (Roy *et al*., 2017).

A perda de P por adsorção é um dos principais fatores que afetam a produtividade das culturas no Cerrado (Shen *et al*., 2011). Por isso, é essencial identificar fontes de fertilizantes que apresentem menor adsorção no solo e maior eficiência agronômica, especialmente em solos altamente intemperizados como os do Cerrado.

A disponibilidade de P no solo, considerado um dos nutrientes mais limitantes na região do Cerrado, é severamente afetada pelas condições edáficas (Fink *et al*., 2014; Ara *et al*., 2018; Maluf *et al*., 2018), principalmente devido à rápida adsorção pelos coloides do solo, seguida por adsorção específica, diminuindo a disponibilidade para as plantas (Menezes-Blackburn *et al*., 2018). No solo, o P pode estar presente tanto em formas inorgânicas (fosfatos de cálcio, ferro e alumínio) quanto em formas orgânicas (fosfatídios, nucleotídeos etc.), sendo estas últimas mineralizadas gradualmente pela atividade microbiana.

No geral, a baixa eficiência dos fertilizantes fosfatados minerais tem impacto direto nos custos de produção em culturas como a soja, visto que os fertilizantes representam, em média, cerca de 30% dos custos totais de produção (USDA, 2016). Além disso, o desempenho dos fertilizantes varia de acordo com a região, tipo de solo e condições climáticas (Resende *et al*., 2011). Com isso, uso de fontes alternativas de fertilizantes, como os fosfatos naturais e reativos ou fertilizantes organominerais, têm sido adotadas como estratégias para melhorar a disponibilidade de P nos solos do Cerrado (Menezes-Blackburn *et al*., 2018).

Os fertilizantes fosfáticos naturais são resultados da moagem direta da rocha, envolvendo apenas tratamentos físicos para melhor desempenho em campo, e compreendem fertilizantes cujo teor mínimo de P_2O_5 deve ser 5%, e desse total, cerca de 15% devem ser solúveis em ácido cítrico. Em contrapartida, os fertilizantes fosfáticos reativos são obtidos a partir da moagem da rocha e adição de tratamentos químicos para melhorar a eficiência em relação aos fertilizantes fosfáticos naturais. Este tem exigências mínimas de 27% de P_2O_5, e mínimo de 30% do teor total solúvel em ácido cítrico (BRASIL, 2018).

O uso de fertilizantes fosfáticos naturais e reativos se mostram como alternativa viável aos altos preços por kg de P_2O_5 no mercado, fator importante a ser considerado no manejo da adubação fosfatada corretiva e de manutenção em áreas de Cerrado no Brasil, devido a elevada capacidade de adsorção aos óxidos de ferro e alumínio, que reduz a disponibilidade do P as culturas nos solos da região. Este trabalho parte da hipótese de que os fertilizantes fosfatados naturais reativos são eficientes para suprimento produtivo da soja em solo do Cerrado.

Fontes mais reativas ou de liberação lenta, bem como estratégias que aumentam a eficiência agronômica do P (como manejo do solo e uso de insumos biológicos), podem reduzir as perdas por fixação e melhoram a disponibilidade do nutriente às plantas (Hinsinger *et al*.,

2011; Ibrahim *et al*., 2022). Esse aumento na eficiência contribui para a racionalização do uso de recursos naturais finitos, como as reservas de fosfato, além de mitigar impactos ambientais associados à eutrofização, alinhando a intensificação agrícola à sustentabilidade (Hou *et al*., 2018).

Nos solos do Cerrado, com predomínio de Latossolos altamente intemperizados, a mineralogia é marcada pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Alleoni; Casagrande; Camargo, 2014), além de argilominerais de baixa atividade, como a caulinita. Essa composição confere elevada capacidade de adsorção de P, promovendo sua retenção em formas pouco lábeis e reduzindo sua disponibilidade às plantas (Beutler *et al*., 2016). Como consequência, a dinâmica do P nesses solos é fortemente controlada por interações de superfície, tornando a adsorção um dos principais processos responsáveis pela limitação nutricional nesse ambiente (Roy *et al*., 2017).

Neste sentido, objetivou-se entender, no primeiro momento, o impacto das fontes de fertilizantes fosfatados na adubação corretiva sobre a dinâmica do P em um Latossolo Amarelo e, no segundo momento, o efeito das fontes e doses de fertilizantes fosfatados na adubação de semeadura da soja sobre a disponibilidade de P no solo e nos parâmetros de crescimento, estado nutricional e produtividade da cultura no Cerrado maranhense.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Bioma Cerrado

O bioma Cerrado é considerado o segundo maior bioma do Brasil, com área de aproximadamente dois milhões de km^2, perfazendo um total de 25% do território brasileiro (IBGE, 2012). Localiza-se na parte central do Brasil (Myers *et al*., 2000; Castro *et al*., 2008, BRASIL, 2022), com ocorrência nos estados do Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia, Paraná, São Paulo e Distrito Federal. Em menor proporção ocorre também nos estados do Amapá, Roraima e Amazonas (IBGE, 2004).

Devido suas características edafoclimáticas, este bioma expressa uma grande diversidade vegetativa, composta por florestas fechadas, com árvores de altura de 12 a 15 m, mas com predomínio de pequenos arbustos (Sano *et al*., 2010; BRASIL, 2022), e com solos em relevo considerados adequados ao cultivo agrícola.

Em relação ao desenvolvimento e caracterização dos solos do Cerrado brasileiro, a maioria é caracterizado como solos com baixa declividade, altamente intemperizados, ácidos, com baixos teores de nutrientes e elevadas concentrações de alumínio presentes. Embora esses solos apresentem baixa fertilidade natural, possuem relevo, condições físicas e climáticas adequadas ao cultivo de diversas culturas, a exemplo da soja, milho e algodão (Sousa; Lobato, 2004; Seixas *et al.,* 2020).

A fim de tornar os solos do Cerrado aptos quimicamente ao cultivo agrícola, pesquisas têm sido realizadas nas últimas décadas (Sousa; Lobato, 2004; Cruz *et al*., 2025; Lustosa Filho *et al*., 2025) com objetivo de definir manejos e recomendações de adubação adequados aos solos da região, a exemplo das práticas de correção e de adubação, visando a melhoria das condições químicas dos solos (Cruz *et al*., 2025).

Embora estudos dessa natureza tenham sido realizados em solos do Cerrado com maiores teores de argila e óxidos de Fe e Al, a exemplo dos Latossolos dos estados do Centro Oeste e Sudeste do Brasil, há poucos estudos em Latossolos com menores teores de argila e de óxidos, a exemplo dos solos na região do Matopiba (formado pelas regiões do Sul do Maranhão, Norte de Tocantins, Sul do Piauí e Oeste da Bahia) em que predominam os solos denominados de fração leve, cuja areia é predominante na constituição (Rodrigues *et al*., 2016; Cruz *et al*., 2025). Neste bioma, a maior parte do nutriente permanece em frações não lábeis, tornando o P um dos principais fatores limitantes à produtividade agrícola nesses solos.

2.2 Fósforo no solo: implicações e manejo

O P é considerado um dos nutrientes mais limitantes a produtividade agrícola em solos de clima tropical (Novais *et al*., 2007; Rodrigues *et al*., 2016), que apresentam avançado estádio de intemperismo, e como consequência dessa evolução são considerados solos pobres em nutrientes para as plantas. Para isso são necessárias aplicações de adubação de manutenção, conforme as exigências do solo e planta, ou fontes de P para suprir a demanda das culturas agrícolas a cada ano (Maranguit *et al*., 2017).

O suprimento de P às plantas pode ser realizado através de fontes minerais, orgânicas ou organomineral. Entre as fontes de origem mineral de comum utilização, pode se incluir o superfosfato simples, superfosfato triplo, fosfato monoamônico, fosfato natural, fosfato natural reativo e fosfato reativo, podendo as mesmas possuir reações e tempos de disponibilização no solo em período e formas diferentes (Novais *et al*., 2007; Raij, 2019).

Solos em avançado estágio de intemperismo tem como presença marcante elevados teores de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, bem como argilas do tipo 1:1 (Melo; Alleoni, 2019), fato que proporciona elevada capacidade de adsorção do P, diminuindo sua disponibilidade às plantas (Hou *et al*., 2018; Oliveira *et al*., 2022).

O P presente no solo ou adicionado via adubação fosfatada, tem como principais fontes de reservas as rochas formadas em idades geológicas passadas, a exemplo da apatita e fosforita (Novais *et al*., 2007; Raij, 2019). Logo, devido sua origem esse nutriente é considerado finito, com isso, o desenvolvimento de estratégias que visem o melhor desenvolvimento e aproveitamento do P presente no solo deve ser estudado e recomendado com base em critérios técnicos (Kruse *et al*., 2015).

Devido a complexa dinâmica do P no solo, estudos foram realizados visando entender como estes processos ocorrem e os fatores que interferem. Dentre estes fatores, a elevada temperatura e o regime hídrico sazonal intensificam os processos de intemperismo químico, favorecendo a formação de óxidos de Fe e Al, que exercem papel determinante na sorção do P, a exemplo da região do Cerrado (Novais *et al*., 2007; Rodrigues *et al*., 2016; Oliveira *et al*., 2022).

Entre estes trabalhos, Rodrigues *et al*. (2016), em estudo realizado em diversas áreas de solos do Cerrado, observaram que, mesmo em solos com longos períodos de cultivo, e adoção de medidas corretivas, a capacidade de adsorção e necessidade de adição de fertilizantes é recomendada a cada safra, em resposta a baixa disponibilização desse nutriente para as plantas e alta capacidade de adsorção dos solos.

Para os solos do Cerrado, a calagem é uma prática crucial para a disponibilização de P, pois estes são solos consideravelmente ácidos, com baixa disponibilidade nutricional, baixa saturação de bases e capacidade de troca catiônica (Melo; Alleoni, 2019). Com isso, a calagem que tem como objetivos principais a elevação da saturação de bases e a correção do pH do solo na camada arável assume grande importância (Sousa; Lobato, 2004), uma vez que essa camada se encontra ativa a atuação do sistema radicular das plantas. Para Yang *et al*. (2019), esta é uma prática corriqueira, e necessária para solos com avançado estádio de intemperismo.

Entre todos os nutrientes requeridos pelas plantas, o P é considerado um nutriente limitante em solos do Cerrado, devido os processos de sorção no solo, e assim, dependendo do pH do meio pode se adsorver com Fe, Al ou complexar com Ca, esse último em pH básico devido, normalmente, a doses elevadas de calcário. No entanto, quando realizada de forma adequada, a calagem contribui de forma efetiva para redução de perdas de P no solo, atuando na correção do pH para níveis adequados, onde diminui a adsorção do P no solo com pH aproximadamente de 5,5 a 6,5 (Sousa; Lobato, 2004), sendo este também o ideal para o desenvolvimento da maioria das culturas de interesse agrícola.

No solo, o P encontra-se como ânion, e pode ser facilmente adsorvido as cargas positivas dos minerais do solo. Em pH ácido, os solos do Cerrado possuem grandes quantidades de cargas positivas (Rodrigues *et al*., 2016), provenientes da quebra de arestas dos minerais de argila, as quais adsorvem o P. Com isso, a realização da calagem nestes solos atua de forma dinâmica, elevando o pH do meio para níveis aceitáveis (Yang *et al*., 2019), e com isso tornando o P em composto disponível, e assimilável pelas plantas.

Considerando as características dos solos do Cerrado, o adequado desenvolvimento da cultura da soja requer a realização de adubação fosfatada de manutenção anual, respeitando a faixa de suficiência da cultura. À medida que a produtividade aumenta, há maior extração de nutrientes pelos grãos, o que pode comprometer o desempenho das safras subsequentes caso não haja reposição adequada. Estudo recente demonstra incrementos significativos de produtividade com o aumento das doses de P. Avaliando Latossolos do Cerrado, Gotz *et al*. (2023), observaram aumento contínuo da produtividade da soja e dos teores de P disponível no solo com a aplicação de doses de até 250 kg ha^{-1} de P_2O_5.

2.3 Matéria orgânica no solo e seu efeito na dinâmica e disponibilidade do fósforo no solo

A matéria orgânica do solo (MOS) se encontra distribuída no solo em diversas frações, variando de acordo com seus estágios de decomposição e recalcitrância (Yang *et al*., 2019), proporcionada pela composição do material que a compõe. No solo, esta pode ser encontrada como ácidos húmicos, fúlvicos e humina, em que os dois primeiros correspondem a 70% da MOS e são os principais responsáveis pelas suas ligações com os cátions (Olk *et al*., 2019). A MOS atua na sorção de cátions no solo e controla a mobilidade e biodisponibilidade destes em solução do solo. Para Audette *et al*. (2020), a dinâmica da MOS está diretamente relacionada com a calagem, tendo em vista que em pH básico auxilia o P na formação de compostos com o Ca, tornando assim essa complexação mais instável.

Estudos relatam forte relação entre os teores de P total e MOS (Cherubim *et al*., 2016; Rodrigues *et al*., 2016; Fu *et al*., 2020), além de sua participação na conversão de P orgânico em P inorgânico e disponibilidade para as plantas (Nesper *et al*., 2015). No geral, a MOS pode ser considerada a maior fonte de P do solo, chegando a participar com intervalo de 30 a 65% do P total nos solos tropicais (Shen *et al.,* 2011; Rodrigues *et al*., 2016). Contudo, em trabalhos realizados por Lustosa Filho *et al*. (2025), em um estudo em Latossolo Amarelo no Cerrado observou se que o P orgânico compreende 43% do P total lábil de área com vegetação nativa e até 72% em área de plantio direto.

Nos solos tropicais bastantes intemperizados, a MOS exerce papel crucial no fornecimento de P (Maranguit *et al*., 2017), através da ciclagem do P absorvido pelas plantas. Isso pode ser observado em trabalhos onde a redução/remoção da MOS foi acompanhada pela diminuição do P orgânico do solo (Maranguit *et al.,* 2017; Hou *et al*., 2018). Segundo Hiradate; Uchida (2004), a remoção da MOS proporciona também uma maior quantidade de P adsorvido, sendo esse efeito justificado pela ocupação competitiva do P e MOS nos pontos de ligação no solo. Por outro lado, Debicka *et al*. (2016) demonstraram efeito contrário, em que a remoção de MOS de diversos solos diminuiu a adsorção do P.

Para um melhor entendimento da dinâmica do P no solo, o seu fracionamento em frações orgânicas e inorgânicas, constitui uma forma de predizer como será sua disponibilidade para as plantas (Novais *et al*., 2007; Yang *et al*., 2019). Entre os métodos de fracionamento, os mais utilizados são de Chang e Jackson (1957), considerado um método simples e eficaz para obtenção das frações de P, e é caracterizado por extrações sucessivas das formas inorgânicas do P, extraídas por substâncias químicas capazes de dissolver compostos específicos de P inorgânico. Neste método é possível realizar a determinação de frações de P solúvel em água

(P-H_2O), ligada ao alumínio (P-Al), ligada ao ferro (P-Fe) e ao cálcio (P-Ca) e, também o P ocluso (P-ocluso).

Em solos do Cerrado piauiense, o fracionamento de P indica que o P ocluso constitui uma fração importante do P inorgânico, estando predominantemente associado aos óxidos de ferro e alumínio. Em Latossolo Amarelo, Lustosa Filho *et al*. (2025) observaram que o avanço do uso agrícola promove redução das frações lábeis e maior participação de formas menos disponíveis, sugerindo a transferência do P inicialmente ligado a Fe e Al para formas oclusas. De forma complementar, Silva (2021) verificou predominância de P-Al e P-Fe, enquanto a fração P-Ca apresentou baixa contribuição, confirmando o papel dos óxidos de Fe e Al como principais compartimentos de estabilização do P nesses solos.

Já o método de Hedley *et al*. (1982), faz o fracionamento do P no solo considerando as frações lábeis, pouco lábeis e não lábeis do P do solo, e tem como principal vantagem a capacidade de fornecer informações a curto e longo prazo dos valores das frações de P no solo e sua disponibilidade para as plantas.

A fração do P lábil está intimamente ligada as condições de acidez do solo, enquanto as frações de P moderadamente lábil e P não lábil tem relação direta com os teores de carbono orgânico e de argila no solo, conforme relata Cherubin *et al*. (2016), ao observar estas correlações em área de vegetação nativa, pastagem e cana de açúcar no Brasil.

Em estudo realizado por Rodrigues *et al*. (2015) foi relatado que adição de fertilizantes com fosfato promoveu aumento das frações inorgânicas lábil e moderadamente lábil de P em Latossolos do Cerrado brasileiro. Contudo, Riskin *et al*. (2013) mencionam que o uso contínuo de fertilizante fosfato em área de soja proporcionou aumento do teor de P lábil inorgânico, bem como à diminuição do P lábil orgânico em comparação ao solo de vegetação nativa. Já Hou *et al*. (2018), trabalhando em área com aplicações em longos de períodos de fontes de P orgânica e mineral, observaram que com a aplicação de fertilizantes minerais, os valores de P inorgânico foi consideravelmente maior em profundidade de 30-60 e de 60-90 cm, em relação a área superficial. Contudo, ao observar o P orgânico, observaram redução deste em profundidade, fato já esperado, tendo em vista que as maiores concentrações de matéria orgânica se encontram na parte superior do solo.

Em estudo realizado por Fu *et al*. (2020), em manejo do solo, com floresta de pinus, eucalipto, mata nativa e floresta secundária foram encontrados valores médios de P estável com variação de 71% na floresta secundária e 81% na floresta de pinus e floresta nativa. Em relação aos percentuais de P lábil, com exceção da floresta nativa que apresentou apenas 1%, os demais apresentaram valores de 2% do P total, e os demais espaços foram preenchidos com P orgânico,

sendo a floresta secundária com maior percentual. Lustosa Filho *et al*. (2025), ao avaliarem a dinâmica do P em Latossolo Amarelo do Cerrado piauiense, observaram que, em área de vegetação nativa, 30% do P moderadamente lábil é inorgânico e 70% orgânico. Após 12 anos de cultivo agrícola, essa distribuição passou para 47% e 53%, respectivamente, indicando maior participação relativa das formas inorgânicas. Em contraste, para o P lábil, houve redução da fração inorgânica com o tempo de cultivo, passando de 57% no Cerrado nativo para 46%, enquanto a fração orgânica aumentou de 43% para 54%.

2.4 Fontes de fósforo e disponibilidade no solo

O P é um nutriente adicionado ao solo por meio de fontes orgânicas (matéria orgânica) e inorgânicas (fosfatos naturais e superfosfatos). Em relação as fontes inorgânicas, estas geralmente possuem altas concentrações deste nutriente, contudo, apenas pequena parte é realmente disponibilizada para as plantas. Para este nutriente, a dinâmica e disponibilidade no solo é dependente de alguns fatores, como os ambientais, que podem ser bióticos ou abióticos (Resende *et al*., 2011), adubação química e MOS que exercem ações diretas e indiretas no P, seja através do processo de dissolução, ocupando os ligantes dos óxidos ou pela alteração de cargas no solo (Beutler *et al*., 2016).

A partir da interação com esses fatores, o P passa por reações e modificações que o tornam menos disponível, como a adsorção aos coloides do solo ou a formação de complexos com o Ca, este considerado uma forma mais difícil de disponibilizar o P para a planta (Bezerra *et al*., 2015).

Entre as formas presentes no solo, o P inorgânico (Pi) pode ser subdividido em P mineral primário (apatita), e em precipitados secundários, em que estes formam compostos com o Fe amorfo e cristalino, Al e Ca, e em P adsorvido aos coloides do solo (Shen *et al*., 2011). Já nas formas orgânicas, estas abrangem a biomassa microbiana e compostos em diferentes estágios de decomposição formados pela MOS, podendo ser fosfomonoésteres, fosfodiésteres ou polifosfatos orgânicos (Novais *et al*., 2007; Nash *et al*., 2014).

O P orgânico moderadamente lábil é afetado pelas fontes de P, ocorrendo o processo de adsorção de forma diferenciada (Rodrigues *et al*., 2015; Foltran *et al*., 2019). Inicialmente o processo de adsorção ocorre de forma contínua e lenta no solo. Estudos realizados por Foltran *et al*. (2019), observaram que com adição de superfosfato simples o P não lábil não mudou, contudo, na fração moderadamente lábil houve um aumento significativo dos teores. Estes

mesmos autores observaram que após 36 meses os fosfatos de rocha apresentavam maior teor de P lábil, e isso seria proveniente da presença de fosfato de Ca, de liberação lenta na rocha.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado em campo na safra agrícola de 2021/2022, em área experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), localizada na Serra do penitente, no município de Tasso Fragoso, região sul do estado do Maranhão, nas coordenadas (S 8º 33’ 29.49”; W 46º 05’ 19,67’’). O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo Aw tropical, caracterizado por ser quente e úmido com temperatura média anual entre 23 e 31ºC.

A região apresenta precipitação média anual em torno de 1.200 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a março. O solo sob estudo é um Latossolo Amarelo Distrófico (Santos *et al*., 2025), caracterizado como profundo, bem drenado, ácido, de baixa fertilidade, e em cuja mineralogia destaca-se a presença de caulinita, óxidos de ferro e alumínio em diferentes proporções. O solo em que o experimento foi conduzido apresenta classificação textural média, com 613 g kg^{-1} de areia, 126 g kg^{-1} de silte e 261 g kg^{-1} de argila, na profundidade de 0-0,10 m, sendo a descrição de alguns atributos químicos do solo descritas na tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química e granulométrica do Latossolo Amarelo Distrófico nas profundidades 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, em área sem cultivo do Cerrado do Maranhão, Brasil.

Prof.	pH	MO	P	K^+	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H^+	H +Al	SB	CTC	V	m
		dag kg	mg dm^3		----------				cmol$_c$ dm^3		----------		---- %	----
0,00-0,10	4,00	4,50	1,50	0,06	0,04	0,40	0,20	0,40	9,80	10,20	0,70	10,90	6,00	36,36
0,10-0,20	3,90	2,80	1,40	0,05	0,04	0,40	0,20	1,10	8,20	9,30	0,69	9,99	7,00	61,45
0,20-0,30	4,00	3,10	1,00	0,04	0,03	0,40	0,10	0,90	6,60	7,50	0,57	8,07	7,00	61,22
0,30-0,40	4,10	2,10	1,10	0,02	0,02	0,40	0,10	0,70	4,70	5,40	0,64	5,94	9,00	56,45

	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Silte	Argila
	----------	mg dm^{-3}	----------		--------	g kg^{-1}	--------
0,00-0,10	0,10	93,00	3,00	1,30	613,00	126,00	261,00
0,10-0,20	0,10	130,00	1,50	0,40	680,00	107,00	213,00
0,20-0,30	0,10	200,00	0,50	0,30	606,00	212,00	182,00
0,30-0,40	0,10	190,00	0,50	0,20	579,00	189,00	232,00

Prof. Profundidade, pH $CaCl_2$ (Potencial de hidrogênio em cloreto de cálcio), MO (Matéria orgânica), P (Fósforo), K (Potássio), Mg (Magnésio), Al (Alumínio), H + Al (Hidrogênio + alumínio), SB (Soma de bases), V (Saturação por bases), m (Saturação por alumínio), B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês), Zn (Zinco).

3.2 Delineamento experimental

No trabalho foram consideradas três etapas de coletas e avaliações realizadas no decimo ano de condução/cultivo do experimento (2022). A primeira avaliou o efeito das fontes de P na adubação fosfatada corretiva, realizada a lanço nos anos agrícolas de 2012/2013 e 2016/2017, sobre a dinâmica do P no solo (P-Al, P-Fe, P-Ca e P disponível) nas profundidades de 0,0 – 0,10; 0,10 – 0, 20 e 0,20 – 0,40 m.

O experimento foi realizado em esquema fatorial (5 x 3), considerando como primeiro fator a testemunha e quatro fontes de P utilizadas na fosfatagem corretiva do solo: Testemunha (Test - 0 kg ha^{-1} P_2O_5); superfosfato simples (SSP – 200 kg ha^{-1} P_2O_5), superfosfato triplo (TSP - 200 kg ha^{-1} P_2O_5), fosfato reativo natural Bayovar (Bayovar - 200 kg ha^{-1} P_2O_5) e fosfato reativo natural Itafós (Itafós - 200 kg ha^{-1} P_2O_5) aplicados a lanço nos anos agrícolas de 2012/2013 e 2016/2017, e como segundo fator, as três profundidades de amostragem do solo (0,0 – 0,10; 0,10 – 0, 20, 0,20 – 0,40 m). O histórico de correção da acidez e da adubação fosfatada corretiva encontra se na tabela 2, conforme recomendações (Sousa; Lobato, 2004) e considerando também as doses médias de adubação corretiva fosfática utilizadas em abertura de área na região de 200 kg ha^{-1} P_2O_5.

As parcelas experimentais foram compostas 60 m^2, com dimensões de 10 m de comprimento por 6 m de largura, e área útil de colheita de 16,2 m^2 por parcela experimental, compreendendo 6 m de comprimento e 2,7 m de largura. Todos os tratamentos foram repetidos três vezes, totalizando com isso 45 unidades experimentais.

Tabela 2 - Períodos de realização da correção da acidez do solo e da adubação fosfatada corretiva em Latossolo Amarelo Distrófico do Cerrado do Maranhão, Brasil.

Tratamentos	1º ano (2012/2013)		5º ano (2016/2017		9º ano (2020/2021)
	Calagem	Fosfatagem	Calagem	Fosfatagem	Calagem
	(ton ha^{-1})	(kg P_2O_5 ha)	(ton ha^{-1})	(kg P_2O_5 ha^{-1})	(ton ha^{-1})
Test - 0,0	4,00	0,00	2,00	0,00	2,00
SSP - 200	4,00	200,00	2,00	200,00	2,00
TSP - 200	4,00	200,00	2,00	200,00	2,00
Bayovar - 200	4,00	200,00	2,00	200,00	2,00
Itafós - 200	4,00	200,00	2,00	200,00	2,00

Test 0,0: Testemunha (0,0 kg ha^{-1} P_2O_5); SSP – 200: (200,0 kg ha^{-1} P_2O_5); TSP – 200 (200,0 kg ha^{-1} P_2O_5); Bayovar – 200 (200,0 kg ha^{-1} P_2O_5); Itafós – 200 (200,0 kg ha^{-1} P_2O_5).

A segunda etapa compreendeu a avaliação de doses de adubação de manutenção e as profundidades. O experimento foi realizado em esquema fatorial 3 x 3, correspondendo ao primeiro fator as três doses de fertilizantes fosfatados na adubação de semeadura (0; 60 e 120 kg ha^{-1} P_2O_5), e o segundo fator as três profundidades (0 - 0,10; 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m), com três repetições.

A terceira etapa do estudo avaliou o efeito das fontes e doses de fertilizantes fosfatados na adubação de plantio da soja sobre a disponibilidade de P no solo e nos parâmetros de crescimento, estado nutricional e produtividade da cultura. O experimento foi realizado em esquema fatorial 5 x 3, tendo como primeiro fator as áreas do primeiro estudo com histórico de adubação fosfatada corretiva (Test - 0 kg ha^{-1} P_2O_5; SSP – 200 kg ha^{-1} P_2O_5; TSP - 200 kg ha^{-1} P_2O_5; Bayovar - 200 kg ha^{-1} P_2O_5 e Itafós - 200 kg ha^{-1} P_2O_5) e como segundo fator as três doses de adubação fosfatada de manutenção ou plantio, aplicadas na linha de semeadura (0; 60 e 120 kg ha^{-1} P_2O_5), com três repetições.

Os fertilizantes utilizados na adubação fosfatada corretiva e de manutenção ou plantio apresentam as seguintes características: SSP (18% P_2O_5, 16% cálcio - Ca, 10% enxofre - S, e o P determinado como P_2O_5 solúvel em citrato neutro de amônio (CNA) mais água, com mínimo de 24% do P_2O_5 solúvel em água), TSP (41% P_2O_5, 10% Ca, e o P determinado por CNA, com mínimo de 36% de P_2O_5 solúvel em água) (BRASIL, 2018), Bayovar (29,5% P_2O_5, 32% Ca e com solubilidade de 2% em ácido cítrico, e no mínimo 14,2% de solubilidade total) (Baldoino, 2017), Itafós (24,7% P_2O_5, 33,2% CaO e com solubilidade de 5,45% em ácido cítrico) (Job *et al*., 2020).

3.3 Avaliação da dinâmica de fósforo no solo em função das fontes de fertilizantes fosfatados

Para as avaliações dos teores de P-Al, P-Fe, P-Ca e P disponível (Mehlich-1) no primeiro estudo, amostras de solo foram coletadas na safra 2021/2022 (março – abril), após a colheita da soja nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20 a 0,20-0,40 m. Inicialmente, em cada uma das parcelas sob cultivo, a partir do ponto central da parcela, foram coletadas três amostras simples para compor uma amostra composta por repetição (uma em cada trincheira). No total foram coletadas por profundidade 15 amostras compostas de solos, totalizando 45 amostras, quando se considera as três profundidades de solo.

As análises do solo foram realizadas no Centro de Análises de Solo da Universidade Federal do Piauí (UFPI) em Bom Jesus – PI. Inicialmente, as amostras foram secas ao ar,

destorroadas e passadas em peneira como malha de 2 mm. Em cada amostra de solo foram determinados o pH em água na relação (1:2,5), a acidez trocável (Al^{3+}) extraída em com KCl 1 mol L^{-1} e quantificada por titulometria com hidróxido de sódio 0,025 mol L^{-1} e a acidez potencial (H+Al) por titulometria.

O P foi extraído com Mehlich-1 e determinado por colorimetria. Cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados por espectofotometria de absorção atômica. Os teores de zinco (Zn^{2+}), manganês (Mn^{2+}) e o cobre (Cu^{2+}) foram extraídos com Mehlich-1. A granulometria do solo também foi determinada em cada amostra de solo pelo método da pipeta. Tanto as avaliações dos parâmetros químicos de fertilidade do solo, quanto a granulometria foram determinados segundo metodologia proposta pela Embrapa (Teixeira *et al*., 2017).

Para o fracionamento do P foi utilizado a proposta de Chang e Jackson (1957), que separa as frações de P ligadas ao Al (P-Al), extraídas com NH_4F 0,5 mol L^{-1} a pH 8,2; P ligado ao Fe (P-Fe), extraído com NaOH 0,1 mol L^{-1} e P ligado ao Ca (P-Ca), extraído com H_2SO_4 0,5 mol L^{-1}. Após a extração do P-Al e P-Fe, o solo residual foi centrifugado duas vezes com NaCl 1 mol L^{-1}, descartado o sobrenadante. A determinação dos teores de P nos extratos foi realizada por espectrofotometria, conforme Murphy e Riley (1962). O método consiste na formação do complexo fosfomolíbdico de cor azul em meio sulfúrico com ácido ascórbico como redutor. As curvas analíticas foram obtidas através de soluções de referência preparadas pela diluição serial da solução padrão de concentração 1000 mg L^{-1} de P.

3.4 Avaliação do efeito das fontes e doses de fertilizantes fosfatados na adubação de plantio sobre o crescimento, estado nutricional e produtividade da soja

Para avaliar os efeitos das fontes e doses de fertilizantes fosfatados na adubação de plantio nas características de planta e produtividade foram utilizadas as seguintes variáveis: Produtividade (Prod), peso de mil grãos (PMG), matéria seca da parte aérea (MSPA) e teores de P na planta (P-Pl), na folha (P-Fl) e no grão P-G) da cultivar de soja BMX Extrema.

A produtividade da soja foi determinada pela colheita e pesagem da área útil da parcela, composta por seis linhas centrais com 6 m de comprimento, totalizando 16,2 m², também com descarte das bordaduras. Para a estimativa do PMG, realizou-se a contagem e pesagem de 300 grãos, com posterior extrapolação para mil grãos. A MSPA foi determinada no estádio R6, com a contagem, coleta de 1 m linear por parcela, e posterior secagem em estufa a 60 ºC, por 72 horas e posterior pesagem da matéria seca das plantas. Os teores de P-Pl, P-Fl e P-G e P

disponível no solo seguiu os procedimentos recomendados para análise de grãos e tecido com digestão seca em mufla, e determinação com amarelo de vanadato em espectrofotometria (Silva, 2009).

3.5 Análises estatísticas dos parâmetros de solo e de plantas em função das fontes e doses de fertilizantes fosfatados

Os dados foram submetidos à análise de variância, empregando-se o sistema de análise estatística SISVAR. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade. Para as variáveis da etapa 1, P-Ca e P-Al, P, Mg, Al e Cu (adubação corretiva x profundidades) e para a etapa 3: P, Al, Cu (fontes de P na adubação fosfatada corretiva x doses P na adubação de manutenção), os dados foram transformados pela raiz quadrada de Y + 1.0.

Para verificar a semelhança entre os tratamentos (fontes, profundidades e doses) foi realizada Análise de Cluster utilizando o método de agrupamento UPGMA (Unweighted Pair-Group Means Average), a partir de agrupamentos homogêneos (Mingoti, 2005). Em seguida, foi aplicada a técnica de Análise de Componentes Principais (ACP) para reduzir o número de variáveis dependentes sem perda de informações e avaliar a correlação entre as variáveis. As análises multivariadas foram realizadas no software R versão 4.3.1 (R Core Team, 2024) com o pacote FactoMineR (Lê *et al*., 2022).