

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

PATRYK RAMON GRACIANO ROSA WANDERSEE

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO AVALIADA POR DIFERENTES
EXTRATORES EM SOLOS ALCALINOS DE PERNAMBUCO**

Recife

2021

Patryk Ramon Graciano Rosa Wandersee
Engenheiro Agrônomo

Disponibilidade de fósforo avaliada por diferentes extratores em solos alcalinos de Pernambuco

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo

Orientadora: Profa. Dra. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire
Coorientador: Prof. Dr. Fernando José Freire

Recife
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- W245d Wandersee, Patryk Ramon Graciano Rosa
Disponibilidade de fósforo avaliada por diferentes extratores em solos alcalinos de Pernambuco / Patryk Ramon Graciano Rosa Wandersee. - 2021.
51 f.
- Orientadora: Maria Betania Galvao dos Santos Freire.
Coorientador: Fernando Jose Freire.
Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2021.
1. Extratores químicos. 2. Semiárido. 3. Taxa de recuperação. 4. Vale do São Francisco. I. Freire, Maria Betania Galvao dos Santos, orient. II. Freire, Fernando Jose, coorient. III. Título

CDD 631.4

PATRYK RAMON GRACIANO ROSA WANDERSEE

Disponibilidade de fósforo avaliada por diferentes extratores em solos alcalinos de Pernambuco

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 29 de março de 2021

Profa. Dra. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire
Orientadora
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Jailson Cavalcante Cunha
PlantSoil Laboratórios

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal Rural de Pernambuco e seus professores, por todo o aprendizado ao longo desses anos de graduação e mestrado.

A Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco, pela concessão da bolsa.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio, incentivo e compreensão por todos esses anos distante de casa.

A Juliette Gonçalves e Nicolly, minha família aqui em Recife, pelo companheirismo, cumplicidade e cuidado.

A minha orientadora, Prof. Dra. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, por todos os ensinamentos, respeito, confiança, e principalmente, paciência.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho, por toda a ajuda e pelos bons momentos de descontração, Adão, Aline, Arianderson, Cinthya, Flávio, Giovana, Graziele, Guilherme, Luara, Lucca, Maria, Marllon, Paulo, Pedro, Suellen e Tiago.

Aos meus antigos colegas de sala da Agronomia, agora amigos e colegas de profissão, Allison, Danielson, Henrique, Lucas, Mauro e Talmo,

Ao Dr. Jailson Cavalcante Cunha e Laboratório PlantSoil, por ter ajudado na localização dos solos e por ter fornecido suporte para a realização das coletas.

A Agrovale, Best Fruit, Defaveri & Cappellaro e Fruit Quality, que mesmo em tempos de pandemia, permitiram a nossa entrada e coleta de solos.

A todos que não foram citados, mas que de alguma forma, contribuíram com a minha formação.

Disponibilidade de fósforo avaliada por diferentes extratores em solos alcalinos de Pernambuco

RESUMO

O fósforo (P) é um dos nutrientes mais limitantes ao desenvolvimento das plantas, sendo muito utilizado na agricultura pelo seu alto grau de interação com o solo. O P é suscetível a precipitação com cálcio em solos pouco intemperizados e alcalinos, como os que ocorrem no semiárido brasileiro, tornando-se indisponível às plantas. Os extratores mais utilizados para avaliar a disponibilidade de P no Brasil são Mehlich-1 e resina trocadora de ânions (RTA). No entanto, há divergências quanto à eficiência do Mehlich-1 para realizar essa avaliação em solos tropicais menos intemperizados e alcalinos. Assim, é fundamental avaliar a eficiência de extração e disponibilidade de P por diversos extratores em solos pouco intemperizados e alcalinos para a correta avaliação da fertilidade e recomendação de adubação. O objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência dos extratores Mehlich-1, RTA, Mehlich-3 e Olsen na predição da disponibilidade de P para *Brachiaria decumbens* em solos alcalinos do semiárido de Pernambuco. Foi realizado um ensaio em casa de vegetação com amostras de seis solos (Neossolo Flúvico, Nossolo Quartzarênico, Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo e Vertissolo) coletados até 20 cm de profundidade e acondicionados em vasos. Os solos receberam doses crescentes de P, em quatro repetições, no delineamento em blocos casualizados. Depois de 30 dias da aplicação das doses e incubação dos solos, foram coletadas amostras para determinação de P pelos diferentes extratores. Os vasos foram semeados com *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk e, aos 30 dias depois da emergência (primeiro corte), as plantas foram coletadas para determinação do P acumulado na biomassa vegetal. As plantas permaneceram nos vasos por mais 30 dias, quando foi realizado o segundo corte e o P acumulado na biomassa foi novamente determinado. Foram também avaliados nesses cortes crescimento das plantas e produção de biomassa. Teores de P nos solos foram estimados pelos diferentes extratores. Estas variáveis foram avaliadas em função das doses de P aplicadas, sendo submetidas à análise da variância e testados modelos de regressão. Mesmo com elevados teores de P disponível verificados na caracterização dos solos, houve incremento significativo na produção de massa seca com as doses crescentes de P. O extrator Mehlich-1 superestimou os teores de P disponível, com exceção do Vertissolo. Mehlich-3 e Olsen foram os extratores com maior correlação com o P acumulado nas plantas. Recomenda-se o uso do Mehlich-3 em solos do semiárido com pH alcalino.

Palavras-chave: Extratores químicos. Semiárido. Taxa de recuperação. Vale do São Francisco.

Phosphorus availability assessed by different extractors in alkaline soils from Pernambuco

ABSTRACT

P is one of the most limiting nutrients for plant development. It is widely used in agriculture due to its high degree of interaction with the soil. In poorly weathered and alkaline soils, such as those that occur in the Brazilian semiarid region, P is susceptible to precipitation with Ca, making it unavailable to plants. In Brazil, Mehlich-1 and anion exchange resin (AER) are the extractors most used for P analysis, however, there are differences regarding the efficiency of Mehlich-1 in less weathered tropical soils. Thus, it is essential to evaluate the efficiency of P extraction by several extraction methods in alkaline soils for the correct evaluation of fertility and fertilizer recommendation. The aim of this work was to evaluate the efficiency of Mehlich-1 and RTA in comparison to Mehlich-3 and Olsen in predicting the P availability for plants in alkaline soils. A test was carried out in a greenhouse with samples from six soils (Neossolo Flúvico, Nossolo Quartzarênico, Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo e Vertissolo) collected in the 0-20 cm layer and placed in pots with six increasing P doses, in four replications, in a randomized block design. After 30 days of P doses application and soil incubation, soil samples were collected to perform analysis of recovered P by the extractors. The pots were seeded with *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk and at 30 days after emergence, the plants were collected to determine P in plant biomass. Plants remained in the pots for more 30 days, when the second cut was made. Plant growth parameters were obtained, dry biomass weight, P content estimated by different extractors and P absorbed and accumulated by the plant. These variables were evaluated as a function of P applied doses, being subject to analysis of variance and regression models were tested. Even with high levels of available P verified in the characterization of soils, there was a significant increase in the production of dry mass with increasing doses of P. Mehlich-1 overestimated the levels of available P, except for Vertisol. Mehlich-3 and Olsen are the extractors more correlated to accumulated P in plants. It is recommended the use of Mehlich-3 in semiarid soils with alkaline pH.

Keywords: Chemical extractors. Recovery rate. Semiarid. San Francisco Valley.

TABELAS

Tabela 1 – Procedência dos solos coletados e seu uso agrícola	28
Tabela 2 - Caracterização química e física dos solos estudados	29
Tabela 3 – Quantidade das fontes de P utilizadas na composição das doses nos solos.....	30
Tabela 4 - Equações dos teores de P recuperado (\hat{Y} , mg dm ⁻³) pelos extratores em função das doses de P (X, mg dm ⁻³) aplicadas em cada solo e a taxa de recuperação de P (TR-P) por cada extrator.....	34
Tabela 5 - Valores médios de pH dos extratos obtidos para determinação dos teores de P nos solos estudados	37
Tabela 6 - Equações de produção de massa seca (\hat{Y} , g vaso ⁻¹) de <i>Brachiaria decumbens</i> , no primeiro e segundo corte, em função das doses de P (X, mg dm ⁻³) aplicadas em cada solo, 90% da produção máxima (0,9- $\hat{Y}_{m\acute{a}x}$) e doses recomendáveis de P (DR).....	38
Tabela 7 - Equações do teor de P (\hat{Y} , g kg ⁻¹) em <i>Brachiaria decumbens</i> , no primeiro e segundo corte, em função das doses de P (X, mg dm ⁻³) aplicadas aos solos.....	41
Tabela 8 - Equações do conteúdo de P (\hat{Y} , mg vaso ⁻¹) em <i>Brachiaria decumbens</i> , no primeiro e segundo corte, em função das doses de P (X, mg dm ⁻³) aplicadas aos solos e a taxa de recuperação de P (TR-P) pela <i>Brachiaria decumbens</i>	42
Tabela 9 - Coeficientes de correlação linear (r) entre as taxas de recuperação de P (TR-P) dos extratores e da <i>Brachiaria decumbens</i> (utilizando TR-P do conteúdo de P no segundo corte) com os principais atributos dos solos estudados	43
Tabela 10 - Coeficientes de correlação linear (r) entre o conteúdo de P (mg vaso ⁻¹) em <i>Brachiaria decumbens</i> , no primeiro e segundo corte, e o P recuperado (mg dm ⁻³) pelos extratores para cada solo estudado	44
Tabela 11 - Níveis críticos de P no solo (NiCriP), no primeiro e segundo corte, pelos extratores utilizados.....	45

SUMÁRIO

RESUMO	23
ABSTRACT	25
Sumário.....	29
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Hipóteses	16
1.2 Objetivo geral	16
1.3 Objetivos específicos.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 A importância do fósforo para a agricultura.....	17
2.2 Fósforo no solo	18
2.3 Solos do semiárido brasileiro	21
2.4 Avaliação da fertilidade do solo	22
2.5 Extratores.....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. Extração de P	33
4.2. Produção de biomassa	37
5 CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A região semiárida localizada no Nordeste do Brasil apresenta elevada pedodiversidade, onde é possível encontrar desde solos jovens e alcalinos, até solos bastante desenvolvidos e ácidos. Com relação à fertilidade, os solos do semiárido brasileiro contêm baixos teores de P disponível, um dos elementos mais limitantes à produtividade das culturas. Na agricultura de pequena escala da região, a adubação fosfatada é considerada inviável financeiramente, devido seu elevado custo. Além da falta de adubação, a irregularidade de chuvas resulta em baixa produtividade para a maioria das culturas, quando comparada com outros locais do território brasileiro.

O P pode ser encontrado no solo em formas que variam com a natureza química do ligante e com a energia de ligação entre o nutriente e o solo. Quanto à natureza do ligante, esse elemento pode ser encontrado como P orgânico diéster e monoéster (Po), P inorgânico (Pi) em ligações com Fe, Al, Ca, argilas silicatadas e óxidos de Fe e de Al. Dessa forma, de acordo com a natureza química e a energia de ligação do elemento, o mesmo pode ser adsorvido, retornar à solução do solo ou precipitar.

O solo, por se tratar de um sistema dinâmico e em constantes transformações, pode atuar como fonte ou dreno do P. Assim, pode ter boa capacidade de suprimento desse nutriente ou competir fortemente com as plantas, fixando grande parte do P adicionado, particularmente em solos mais desenvolvidos e com caráter eletropositivo. Entretanto, o caráter dreno também ocorre naqueles solos menos desenvolvidos e ricos em cálcio, comuns no semiárido.

Para estimar o teor de P nos solos, são utilizados alguns extratores químicos que ajudam no monitoramento de sua disponibilidade às plantas e contribuem para determinar a recomendação de adubação dos cultivos. Os extratores mais utilizados para P são Mehlich-1 e RTA, porém, suas eficiências em solos tropicais são muito questionadas. Isso se explica porque os solos apresentam elevada variação no grau de intemperismo, resultando em variações em características físicas, químicas e mineralógicas, influenciando no resultado das análises.

Mesmo o fósforo sendo um elemento amplamente estudado e discutido na literatura, solos alcalinos, comuns em regiões semiáridas no Brasil, ainda carecem de estudos mais aprofundados sobre o tema. Diante disso, esse trabalho tem como objetivo comparar a eficiência

dos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Olsen e RTA na predição da disponibilidade de P para as plantas, utilizando *Brachiaria decumbens*, em solos alcalinos da região semiárida.

1.1 Hipóteses

- Em solos alcalinos do semiárido, o P extraído por Mehlich-1 não é o que melhor se correlaciona com o P extraído pelas plantas;
- O pH do solo influencia na eficiência dos extratores químicos em estimar o P disponível;
- Um extrator de P de reação neutra ou alcalina é mais adequado para avaliar disponibilidade de P em solos alcalinos do semiárido.

1.2 Objetivo geral

Avaliar a eficiência dos extratores Mehlich-1, RTA, Mehlich-3 e Olsen na predição da disponibilidade de P para *Brachiaria decumbens* em solos alcalinos do semiárido de Pernambuco.

1.3 Objetivos específicos

- Estimar os teores de P no solo pelos extratores em função das doses de P aplicadas;
- Avaliar a produção de biomassa, teor e acúmulo de P pela *Brachiaria decumbens* em função de doses crescentes de P em solos do semiárido;
- Definir os níveis críticos de P no solo pelos diferentes extratores, correlacionando-os com atributos do solo;
- Correlacionar o P acumulado pelas plantas com os teores de P no solo determinados pelos diferentes extratores;
- Definir o melhor extrator para P em solos alcalinos do semiárido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A importância do fósforo para a agricultura

O P é o segundo nutriente mais limitante ao crescimento das plantas, depois do N (BUCHER et al., 2018). É classificado como um macronutriente, entretanto, não é altamente requerido pelas plantas como o N e o K, tendo raramente valores superiores a 5 g kg^{-1} na planta (RAIJ, 2011). Sua grande utilização se deve ao seu alto grau de interação com o solo, principalmente nos solos tropicais, o que interfere na sua disponibilidade às plantas (LUMBANRAJA et al., 2017).

O P é um elemento essencial às plantas, pois é fundamental para a síntese de moléculas como ATP, DNA e RNA, por exemplo, e de fosfolipídios que compõem as membranas celulares (BUCHER et al., 2018). Além disso, participa de processos como fotossíntese, respiração, metabolismo de carboidratos, fixação de N_2 e ativação de proteínas (TAIZ et al., 2017). De acordo com Bucher et al. (2018), o P movimenta-se no solo por difusão, sendo absorvido como ortofosfato (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}), cuja concentração na solução do solo é cerca de 1 a $10 \mu\text{mol L}^{-1}$. Já no citosol, sua concentração é entre 5 a 20 mmol L^{-1} , muito maior do que a concentração de P no solo (BUCHER et al., 2018). Assim, deve haver P disponível suficiente para manter essa concentração na solução do solo de modo que haja teores adequados na planta.

Segundo Racena, Días e Delgado (2017), uma das problemáticas relacionadas ao P é a escassez das reservas globais deste recurso natural não renovável, cuja estimativa de produção atingirá o pico na metade do século XXI. A oferta de fertilizantes fosfatados, no futuro é fundamental para garantir a segurança alimentar mundial (ROBERTS; JOHNSTON, 2015). Assim, estudos que visam otimizar tanto o uso do P, quanto os métodos de quantificação do P no solo são importantes para programas de recomendação de adubação mais sustentáveis.

O solo tem papel fundamental no ciclo do P, pois é onde ocorre a sua transformação em fosfato, tornando possível ser incorporado à cadeia alimentar (WEIHRAUCH; OPP, 2018). Assim, é muito importante entender a dinâmica do P no solo, aliada às características do solo, para propor um manejo sustentável do P, do ponto de vista ambiental e econômico.

2.2 Fósforo no solo

O P constitui cerca de 0,12% da crosta terrestre, sendo a apatita (fosfato de cálcio) o mineral mais representativo das reservas de P (BUCHER et al., 2018). O P está presente em diversas formas no solo, variando conforme o tipo de solo e o seu manejo, por exemplo. Pode ser encontrado no solo tanto na forma mineral (Pi) quanto orgânica (Po) e interage diretamente com os coloides. As principais formas inorgânicas são o ácido fosfórico (H_3PO_4), o ácido ortofosfórico (H_2PO_4^-), o ácido monofosfórico (HPO_4^{2-}) e o íon fosfato (PO_4^{3-}) (NOVAIS et al., 2007). Já o ácido fítico é a forma orgânica mais predominante, cuja concentração no solo sofre influência da taxa de mineralização da matéria orgânica realizada pelos micro-organismos (BUCHER et al., 2018).

O P pode passar por diversos processos: adsorção à superfície de óxidos de Fe e Al em solos ácidos; adsorção a minerais de argila silicatados; precipitação com cátions presentes na solução do solo, como ocorre com o Ca, em solos alcalinos; formação de compostos orgânicos que compõem o Po (NOVAIS et al., 2007).

As formas de Pi predominantes nos solos são influenciadas pelo equilíbrio químico (NOVAIS et al., 2007). Dessa forma, o pH do solo interfere diretamente na forma de P mais abundante na solução do solo. Valores de pH entre 2,1 e 7,2 favorecem a formação de H_2PO_4^- , entre 7,2 a 12,0 prevalece HPO_4^{2-} e valores acima de 12,0 predomina PO_4^{3-} (WEIHRAUCH; OPP, 2018). Além disso, em solos com pH acima de 6,0 pode haver maior concentração dos cátions Ca e Mg, que formam precipitados ligando-se ao P (PENN; CAMBERATO, 2019).

O pH do solo, além de influenciar nas formas predominantes de P, interfere também no caráter de fonte ou dreno que o solo pode assumir (NOVAIS et al., 2007). De modo geral, o solo funciona como fonte dos nutrientes para a planta, que é o dreno. Contudo, o solo pode assumir caráter de dreno, competindo com a planta pelo P disponível. Essa característica é bastante descrita na literatura para solos oxídicos, principalmente, devido à predominância de cargas positivas que adsorvem fortemente o íon fosfato, indisponibilizando-o às plantas (GÉRARD, 2016; FINK et al., 2016a).

Para o entendimento da dinâmica do P no solo e dos extratores de P disponível é importante entender os seus três compartimentos: P-solução, P-lábil e P não-lábil. O P-solução representa o fator intensidade, que é o P presente na solução do solo, prontamente disponível às plantas, sendo estimado que entre 0,001% a 0,1% do P total no solo encontra-se como P-solução (NOVAIS et al., 2007; WEIHRAUCH; OPP, 2018). O P-solução é repostado pelo P-lábil,

que representa o fator quantidade, ou seja, é o P adsorvido ao solo por diversas ligações químicas reversíveis e que encontra-se em equilíbrio com a solução do solo. Já o P não-lábil é o P retido fortemente aos colóides do solo. A razão entre o fator quantidade e o fator intensidade representa o fator capacidade de P (FCP), que se refere ao poder tampão de fosfato, ou seja, à capacidade do solo em manter o nível de P na solução (NOVAIS et al., 2007; SANTOS et al., 2008).

A disponibilidade de P é controlada por reações de sorção e dessorção, sendo dependentes, principalmente, das características mineralógicas e físico-químicas dos solos (NOVAIS et al., 2007). O P liga-se aos minerais do solo por reação de complexo de esfera interna, interagindo diretamente com os minerais por meio de ligações covalentes (mono e bidentadas), sem o intermédio de moléculas de água. Inicialmente ocorre a ligação do P ao complexo sortivo de forma eletrostática e, depois, ocorre a troca de ligantes, processo chamado de quimiossorção (SPOSITO, 2008). Dessa forma, mesmo que haja um gradiente de potencial indicando baixa concentração de P na solução do solo, a dessorção do elemento não ocorre, caracterizando a fixação de P no solo (STRAWN, BOHN E O'CONNOR, 2015).

Essa fixação de P é bastante observada em solos muito intemperizados, principalmente em regiões tropicais. Entretanto, Fink et al. (2016a) observaram diferenças na disponibilidade de P em solos com mineralogias distintas, sendo reduzida em solos mais intemperizados, com maior presença de óxidos de Fe como a goethita, em região subtropical.

O P também pode ser adsorvido pela matéria orgânica, sendo descrito que sua disponibilidade no solo pode aumentar ou diminuir pela presença da matéria orgânica (NOVAIS et al., 2007). Apesar disso, seu impacto principal é na disponibilização do P, pois os ácidos orgânicos liberados no processo de decomposição da matéria orgânica são adsorvidos aos óxidos de Fe e Al e aluminossilicatos, bloqueando os sítios de adsorção do P (MUMBACH et al., 2018). Já a adsorção de P pela matéria orgânica se dá pela formação de pontes de cátions como Ca, Al e Fe, por exemplo. Esse processo é especialmente importante em solos arenosos, com baixo FCP, reduzindo as perdas de P e aumentando a eficiência do uso do P pelas plantas (DEBICKA et al., 2016).

A grande afinidade do P com óxidos de Fe e Al é bastante pesquisada e revisada, tornando mais escassas as pesquisas sobre adsorção do P por outros minerais. Contudo, o P pode ser adsorvido pelas arestas de minerais do tipo 1:1 e 2:1, com energias de adsorção diversas, interferindo na disponibilidade de P no solo (FINK et al., 2016b). Segundo Gérard (2016)

minerais como a illita e a montmorilonita, por exemplo, podem ter capacidade de adsorção de P semelhante à dos óxidos de Fe e Al, dependendo das suas áreas superficiais específicas.

Assim, é possível que a adsorção de P também ocorra em solos pouco intemperizados, com presença de minerais do tipo 2:1 e de pH próximo à neutralidade (FINK et al., 2016b). No entanto, a reação de maior destaque nesse tipo de solo é a precipitação do P com o Ca em solução, formando fosfato de cálcio (P-Ca), produto estável e de baixa solubilidade (PENN; CAMBERATO, 2019). O mesmo também ocorre em solos alcalinos, em que o H_2PO_4^- reage com Ca, formando uma sequência de produtos de solubilidade decrescente, sendo o mais solúvel o fosfato monocálcico e o menos solúvel o fosfato tricálcico, o qual pode sofrer outras reações produzindo compostos ainda mais insolúveis (NOVAIS et al., 2007).

Nesses solos pouco intemperizados também pode ocorrer a adsorção de P às impurezas de Fe pela superfície dos carbonatos e das argilas (NOVAIS et al., 2007). Vários estudos em solos calcários exploram a adsorção de P, relacionando-a com a presença de óxidos de Fe e Al, mesmo que em pequenas quantidades desses minerais, principalmente em formas amorfas (SOLIS; TORRENT, 1989; SAMADI; GILKES, 1998; BERTRAND et al., 2003).

Outra característica que interfere na disponibilidade do P é a textura do solo, pois este se liga a cargas elétricas de superfícies coloidais. Assim, solos arenosos têm uma menor tendência de adsorver P, pelos baixos teores de argila presentes. Quanto mais argilosos os solos, maior a tendência de funcionarem como dreno de P, especialmente aqueles com predomínio de argilas oxídicas (NOVAIS et al., 2007). No entanto, estudos que determinem a capacidade de fixação de P em solos menos intemperizados e com predomínio de minerais 2:1 precisam ser desenvolvidos.

No semiárido brasileiro é comum a ocorrência de solos pouco intemperizados, de pH elevado, eutróficos e até mesmo com acúmulo de sais. Solos com características bem distintas de grande parte do Brasil que, conseqüentemente, influenciam na dinâmica do P no solo e na sua disponibilidade às plantas, o que afeta o seu manejo. Assim, é importante conhecer as características desses solos para se propor métodos de avaliação do P no solo que sejam adequados as suas condições.

2.3 Solos do semiárido brasileiro

O semiárido brasileiro compreende uma área de 969.589 km², sendo composto por 1.133 municípios, com 28 milhões de habitantes. Para que um município pertença à região do semiárido no Brasil, é necessário que atenda a pelo menos um destes critérios: Isoieta de 800 mm (média anual entre 1961 e 1990); Índice de Aridez de Thorntwaite de até 0,5 e Risco de Seca (percentagem do número de dias do ano com déficit hídrico igual ou maior que 60%) (BRASIL, 2005).

Por ter regime hídrico irregular, as atividades agropastoris são as mais desenvolvidas na região, com baixo investimento em tecnologias. Entretanto, nessa mesma região há casos de municípios que se destacam justamente pela realidade oposta, com elevado grau tecnológico, e grande investimento na fruticultura e na olericultura. O maior exemplo é o Vale do Submédio São Francisco, abrangendo os municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), grandes produtores e exportadores de frutas.

Dentre os fatores de formação dos solos do semiárido, o clima e o material de origem são os mais determinantes, influenciando diretamente a natureza dos organismos e a aptidão de uso da terra. Por conta da relativamente baixa precipitação pluviométrica anual, em torno de 400 a 650 mm, os solos são, geralmente, rasos, pedregosos, férteis, suscetíveis à erosão e com baixo teor de matéria orgânica (SANTOS, 2015).

As classes de solo que compõem o semiárido são bastante diversas, resultantes da geologia variada. As principais classes, de forma decrescente em proporção, são: Latossolos, Neossolos Litólicos, Argissolos, Luvisolos, Neossolos Quartzarênicos, Planossolos Háplicos, Neossolos Regolíticos, Cambissolos Háplicos, Neossolos Flúvicos, Planossolos Nátricos e Vertissolos (JACOMINE, 1996; SANTOS, 2015).

São solos bastante diversificados, variando de baixa a alta fertilidade e com ocorrência de mineralogias variadas. Essas características resultam em condições eletroquímicas que possibilitam várias reações e interações entre os elementos em solução e fase sólida do solo. Dentre os nutrientes, o P é um elemento muito reativo, sujeito a interações que o tornam indisponível e, por isso, interessante de se estudar em solos de mineralogias e atributos químicos diferentes como os do semiárido.

2.4 Avaliação da fertilidade do solo

A avaliação da fertilidade do solo é fundamental para a otimização do sistema agrícola, tornando-o mais produtivo e sustentável. É um processo que considera, além dos fatores edáficos, a espécie e o manejo da cultura, as condições climáticas, o estado fitossanitário, a disponibilidade de água, dentre outros fatores. A avaliação da fertilidade do solo tem como objetivo avaliar a capacidade do solo em fornecer nutrientes para o pleno crescimento e desenvolvimento das plantas e corrigir possíveis limitações de origem química às plantas, relacionadas ao solo (NOVAIS et al., 2007). A avaliação da fertilidade do solo baseia-se nos resultados da análise química do solo, sendo de extrema importância conhecer os métodos analíticos utilizados em tais análises, que devem ser rápidos e precisos (KHAN et al., 2018).

A análise química do solo é feita por meio de extratores químicos, que são soluções ou substâncias que extraem o nutriente do solo, nas formas disponíveis às plantas, por meio de processos como dessorção, complexação, solubilização, troca iônica ou hidrólise (NOVAIS et al., 2007). Essa etapa de seleção do método de análise de um determinado nutriente no solo é crítica para a obtenção de resultados realistas e confiáveis e deve ser baseada em critérios como as condições locais do solo e altas correlações com as respostas das culturas à adubação (JOHNSTON; POULTON, 2019).

Na década de 1960, houve um programa do Instituto de Química Agrícola do Ministério da Agricultura em parceria com a Universidade da Carolina do Norte, dos Estados Unidos, com o objetivo de incentivar o uso da análise de solo pelos agricultores. Esse programa propôs a uniformização dos métodos de análise de solo no Brasil, o que foi sendo contestado, posteriormente, com o avanço da Ciência do Solo (RAIJ, 2011). Como reflexo desse programa, o uso do Mehlich-1 foi estimulado e ainda é muito utilizado para a extração de P do solo, no geral. Entretanto, o Mehlich-1 tem se mostrado inadequado para a determinação de P em função de certas características dos solos (LUMBANRAJA et al., 2017).

Dessa forma, são necessárias pesquisas que comparem o Mehlich-1 com outros extratores, por meio da correlação e calibração de métodos de determinação do P em solos com características distintas, para o avanço da qualidade da análise da fertilidade do solo. Esses estudos avaliam, primeiramente, a existência de correlação entre o P extraído por determinada solução extratora e o método padrão, que é a concentração do nutriente acumulada na planta (NOVAIS et al., 2007). Já na fase de calibração são definidas as taxas de recuperação de P pelos extratores, os níveis críticos e as doses recomendadas do nutriente com base no nível crítico (ALVAREZ, 1996; RAIJ, 2011).

O nível crítico de um nutriente no solo representa a sua concentração mínima exigida para determinada planta, tendo alta probabilidade de resposta à adubação quando sua concentração estiver abaixo do nível crítico, e baixa probabilidade quando sua concentração no solo estiver acima desse valor (SUCUNZA et al., 2018). Segundo Beckwith (1965), o nível crítico ideal de P no solo é de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$, valor esse contestado por diversos autores já que é importante considerar os fatores quantidade ou capacidade para melhor estimar o nível crítico.

O nível crítico é determinado pela concentração do P no solo que corresponde a 90% da produtividade máxima alcançada pela planta (NOVAIS et al., 2007). Seu valor depende de diversos fatores como as características do solo, o método de extração, a espécie vegetal e sua variedade, o tipo de experimento (em campo ou ambiente controlado) e a amostragem do solo, por exemplo.

Trabalhos dessa natureza têm sido desenvolvidos em solos predominantes no Brasil, como Latossolos e Argissolos, no entanto, solos encontrados em menores proporções, como os do semiárido, são pouco explorados neste sentido. Assim, áreas sob agricultura irrigada no semiárido brasileiro, de altas produtividades e cultivos com elevado retorno econômico, são manejadas de modo similar a solos pobres e ácidos do Cerrado Brasileiro. Pela diversidade de solos, no semiárido encontram-se Latossolos e Argissolos, mas também Neossolos, Cambissolos, Planossolos, Luvisolos, muitos deles com valores de pH neutro ou alcalino, o que deve interferir no comportamento do P e sua disponibilização às plantas.

2.5 Extratores

As soluções extratoras quantificam tanto o P-solução, quanto o P lábil, em equilíbrio com o P-solução e, em alguns casos, parte do P não-lábil. Apesar disso, o P extraído é quase completamente o P lábil (fator quantidade), pois a concentração do P-solução (fator intensidade) é muito baixa quando comparada ao P lábil (NOVAIS et al., 2007). Os extratores não quantificam totalmente o P disponível, pois esse é muito complexo, não dependendo somente do solo, mas também: da planta, que acidifica a sua rizosfera; de micro-organismos como as micorrizas que solubilizam fosfato; do manejo de adubação, entre outros fatores (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Segundo Bray (1948), o P extraído pelos extratores é considerado o P disponível quando há correlação entre o P extraído e o acumulado pela planta (ou o seu crescimento). Os teores de P extraídos pelos diferentes extratores são diferentes por causa das particularidades de cada

extrator e da influência dos solos sobre eles (RACENA et al., 2017). Dessa forma, é necessário ficar claro, numa análise de solo, qual o extrator utilizado, para que seja feita a correta interpretação do resultado.

As soluções extratoras têm composições variadas e relações solo/extrator diferentes também. Os extratores são subdivididos em quatro grupos de acordo com o seu método de extração: dissolução ácida, troca iônica, complexação de cátions e hidrólise de cátions. No Brasil, os extratores mais utilizados são o Mehlich-1 e a resina trocadora de ânions (RTA), representantes do primeiro e do segundo grupos citados acima, respectivamente (SANTOS et al., 2008).

O Mehlich-1 (MEHLICH, 1953) emprega ácidos fortes em baixas concentrações (H_2SO_4 0,025 mol L^{-1} e HCl 0,05 mol L^{-1}), promovendo a dissolução ácida dos compostos fosfatados ligados fracamente aos coloides inorgânicos, em ordem crescente, para as formas de P ligadas ao cálcio (P-Ca), ao alumínio (P-Al) e ao ferro (P-Fe). O íon SO_4^{2-} bloqueia os sítios de adsorção do P desorvido pelos íons H^+ da solução extratora, cujo pH é de 1,2.

Apesar de ser mais barato e prático, este extrator pode subestimar ou superestimar as recomendações de adubação fosfatada, dependendo da textura do solo e de teores natural ou artificialmente elevados de Ca (SANTOS et al., 2008), como alertado por Freire (2001), destacando a ocorrência da solubilização de P-Ca em solos menos ácidos, elevando a estimativa do P disponível, quando na verdade esse pode não ser acessível às plantas. O Mehlich-1 não é recomendado para solos oxídicos, ou seja, que têm elevada proporção de óxidos de Fe e Al e caulinita, o Mehlich-1 têm baixa capacidade de extração dessas formas de P. Assim, observam-se baixos valores de P extraído em solos argilosos muito intemperizados (RAIJ, 2011).

Entretanto, o Mehlich-1 pode ser uma excelente escolha para solos ácidos, arenosos, com baixa CTC e FCP, pouca matéria orgânica e que tenham pouca ocorrência de P-Ca (NOVAIS et al., 2007; LUMBANRAJA et al., 2017). Já em solos argilosos e com pH próximo à neutralidade ou alcalinos, o Mehlich-1 tende a subestimar o P disponível, pois esses solos são muito tamponados (REIS et al., 2020).

Por sua vez, a resina trocadora de ânions (RTA) promove a troca do P por bicarbonato ou cloreto da resina, formando um gradiente de concentração, removendo o elemento ligado ao coloide, o que gera um equilíbrio eletroquímico entre o solo e a RTA. Por não causar a dissolução ácida, esse extrator não superestima a recomendação em solos que já receberam adubação fosfatada anteriormente, constituindo-se um método mais versátil. Teoricamente, a

RTA não é sensível ao FCP dos solos nem às frações de P-Ca (NOVAIS; SMYTH, 1999). Por isso, o método é considerado adequado tanto para solos ácidos quanto para solos alcalinos (SILVA; VAN RAIJ, 1999; SANTOS et al., 2008).

A RTA funciona como a raiz da planta, ou seja, quando o P vai sendo eliminado gradativamente da solução do solo, esse vai sendo repostado pelo P-lábil até que ocorra a exaustão de ambos os lados. Assim, não há preferência de extração de formas específicas de P, sendo extraídas as formas lábeis, sejam P-Ca, P-Al ou P-Fe (RAIJ, 2011).

Novais e Smyth (1999) apontam para o fato da RTA subestimar o P disponível em solos com elevado poder tampão, pois pode ocorrer a exaustão da resina sem que haja a quantificação de todo o P-lábil. Além disso, os mesmos autores também alertam para a subestimação de P em solos ricos em P-Ca, onde plantas específicas podem solubilizar essa fração de P.

Em solos de pH elevado, o extrator mais utilizado é o Olsen (NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$) (OLSEN et al., 1954) que faz parte do grupo de extratores que agem por meio da hidrólise de cátions. Promove a liberação de P em pH elevado ($\text{pH} = 8,5$), por causa da adição de OH^- , que solubiliza compostos P-Al e P-Fe (OLSEN et al., 1954; SILVA; VAN RAIJ, 1999). O método baseia-se na substituição do P adsorvido aos colóides pelo HCO_3^- , reduzindo a atividade de Ca, em solos calcários, e de Fe e Al, em solos ácidos (IATROU et al., 2014). Solos alagados, porém, por apresentarem abundância dessas formas de P (P-Fe e P-Al), têm sua disponibilidade do nutriente superestimada quando é utilizado o Olsen (HERNÁNDEZ et al., 2013; SIMONETE et al., 2015).

O Mehlich-3 (NH_4F 15 mmol L^{-1} + CH_3COOH 200 mmol L^{-1} + NH_4NO_3 250 mmol L^{-1} + HNO_3 13 mmol L^{-1} + EDTA 1 mmol L^{-1} , $\text{pH}=2,5$) (MEHLICH, 1984) é um extrator adotado em diversos países como Estados Unidos e Canadá, por exemplo, tendo como uma de suas vantagens a extração não somente de P, mas também de Ca, K, Mg, Cu (PENN et al., 2018). Foi desenvolvido com o objetivo de extrair vários nutrientes, abranger uma ampla gama de solos com características distintas e substituir o Mehlich-2, que causava corrosão dos equipamentos de laboratório. Há poucos estudos que avaliam o impacto do pH do solo no Mehlich-3, concentrando-se mais nos efeitos da mineralogia, tipo e teor de argila do solo no uso do extrator (PENN et al., 2018).

O NH_4F tem grande poder de extração de formas de P-Al, predominantes em solos muito intemperizados, sendo a principal fonte de P as plantas nessas condições, sendo seguida por P-Fe e P-Ca. O mesmo reagente também impede a formação de precipitados de Ca solubilizados

pelo íon F^- , evitando assim o excesso de P-Ca solubilizado pelo tamponamento com CH_3COOH .

Há poucos estudos que avaliam o impacto do pH do solo no Mehlich-3, concentrando-se mais nos efeitos da mineralogia, tipo e teor de argila do solo no extrator (PENN et al., 2018). Penn et al. (2018) constataram a redução da capacidade de extração de P pelo Mehlich-3 com o aumento do pH do solo. Os autores atribuíram esse resultado a elevação do pH inicial do extrator (2,5) por meio das reações que ocorrem após a dissolução das formas de P-Al e P-Fe. Em solução, os hidróxidos de Fe e Al do solo sofrem dissolução, resultando em Fe^{3+} e Al^{3+} que elevam o pH da solução ao consumir prótons.

A disponibilidade de P em solos brasileiros muito intemperizados tem sido amplamente estudada, no entanto, os laboratórios utilizam os mesmos métodos de extração de P desses solos para os solos do semiárido. É importante que os extratores sejam mais estudados para as condições do semiárido do Brasil, devido à grande variabilidade dos solos existentes, abrangendo aqueles bem intemperizados e ácidos, como Latossolos e Argissolos, quanto solos de pH próximo à neutralidade e alcalinos, como Luvisolos e Planossolos, que podem apresentar problemas de salinidade e/ou sodicidade associados.

Por outro lado, um bom extrator químico, não é apenas aquele que extrai o maior teor de determinado elemento de interesse, mas sim o que mais se correlaciona com o extraído pelas plantas. Assim, deve-se testar se os extratores têm alta correlação com o P que a planta acessa no solo, podendo diferir entre espécies e mesmo variedades.

O processo de correlação entre as doses aplicadas de P e as concentrações do nutriente acumuladas na planta necessita da determinação em cada espécie, de modo que se tenha segurança na recomendação de adubação com base no P disponível no solo (NOVAIS et al., 2007). Muito ainda precisa ser realizado em solos do semiárido, para a definição do extrator mais adequado para uso na determinação da disponibilidade de P.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido com solos de áreas produtivas sob irrigação no Vale do Submédio São Francisco, no semiárido do Nordeste do Brasil. Foram selecionados seis locais (Figura 1) para as coletas das amostras de solo, com base nos valores de pH, de neutro a alcalino.

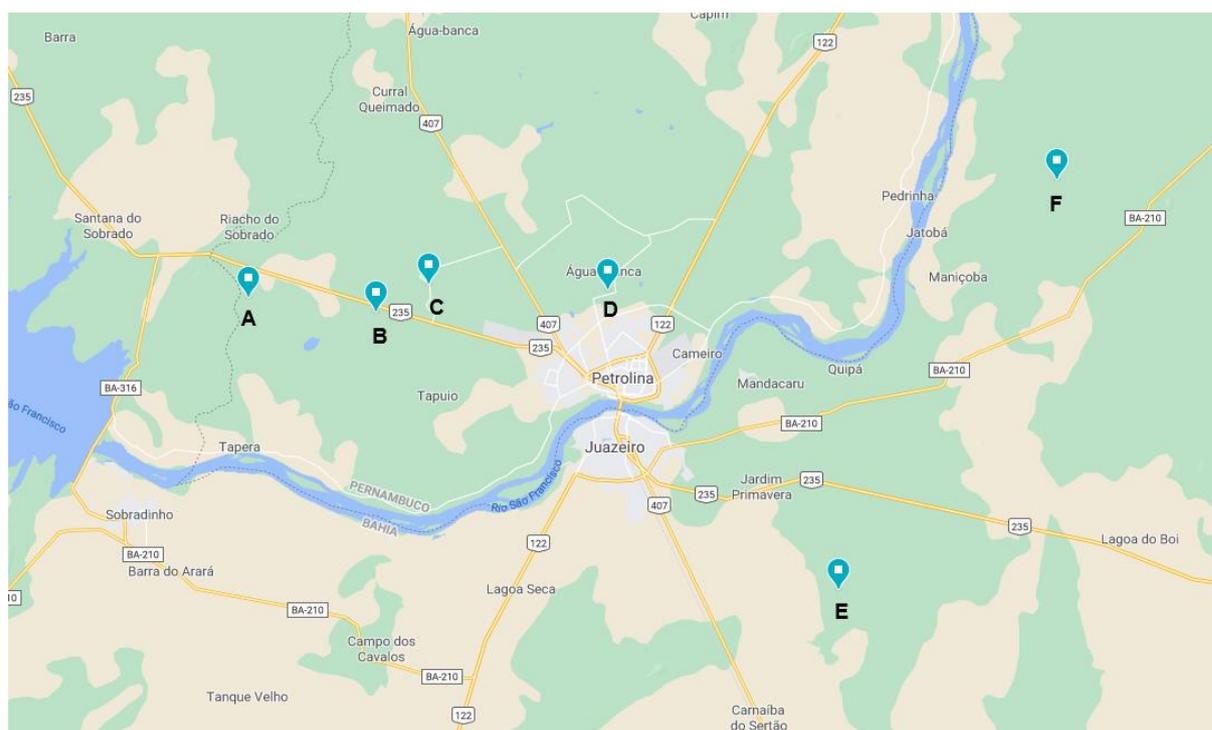


Figura 1 - Locais de coletas dos solos estudados nos municípios de Petrolina – PE e Juazeiro – BA. ^ALV, ^BPVA2, ^CPVA1, ^DRQ, ^EV e ^FRY.

Os solos das áreas não foram classificados no momento da coleta, mas foi feita uma identificação da classe com base nos mapas exploratórios de reconhecimento de solos dos estados de Pernambuco e Bahia (Tabela 1).

Foram coletadas dez amostras simples de solo, na camada de 0-20 cm, a fim de obter uma amostra composta superficial representativa de cada área. Após a coleta, as amostras dos solos foram secas ao ar, destorroados e passados em peneira com malha de 4,0 mm, homogêneos e armazenados para a montagem do experimento. Uma subamostra de cada solo foi separada, destorroadada e passada em malha de 2,0 mm para realizar análises de caracterização química e física.

Tabela 1 – Procedência dos solos coletados e seu uso agrícola

Solo ¹	Localização	Cultivo
RY - Neossolo Flúvico	Juazeiro – BA	Manga
RQ - Neossolo Quartzarênico	Petrolina – PE	Uva
PVA1 - Argissolo Vermelho-Amarelo	Petrolina – PE	Uva
PVA2 - Argissolo Vermelho-Amarelo	Petrolina – PE	Uva
LVA - Latossolo Vermelho-Amarelo	Petrolina – PE	Uva
V - Vertissolo	Juazeiro – BA	Cana-de-açúcar

¹Classe de solo em cada área de coleta com base nos mapas exploratórios de reconhecimento de solos dos estados de Pernambuco e Bahia (JACOMINE et al., 1973; JACOMINE et al., 1979).

A caracterização química e física (Tabela 2) foi feita no Laboratório de Química do Solo, no Departamento de Agronomia da UFRPE. Para as características químicas, foi preparada a pasta de saturação (USSL, 1954), onde foram realizadas as análises dos cátions solúveis (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}), mensuração da condutividade elétrica (CE) e do pH. Os cátions trocáveis foram extraídos por acetato de amônio a 1 mol L^{-1} , a capacidade de troca de cátions (CTC), pelo método do acetato de sódio/acetato de amônio (USSL, 1954). Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram dosados por espectrofotometria de absorção atômica e Na^+ e K^+ por fotometria de emissão de chama. O pH em água foi feito na proporção solo:água 1:2,5 (EMBRAPA, 2017). A relação de adsorção de sódio (RAS) e a porcentagem de sódio trocável (PST) foram calculadas com os resultados das análises dos elementos solúveis e trocáveis, respectivamente, conforme USSL (1954).

Os teores de P no solo foram extraídos por Mehlich-1 e Mehlich-3 conforme descritos em Embrapa (2009), resina trocadora de ânions (RTA) de acordo com Tedesco et al. (1995) e Olsen por Olsen et al. (1954), as relações de solo:extrator foram de 1:10, 1:10, 1:16 e 1:20, respectivamente. O P remanescente (P-rem) foi obtido conforme proposto por Alvarez V. et al. (2000).

O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método de oxidação por via úmida, com dicromato de potássio em meio sulfúrico e aquecimento externo (MENDONÇA; MATOS, 2005).

Tabela 2 - Caracterização química e física dos solos estudados

Solo	RY	RQ	PVA1	PVA2	LVA	V
pH - H ₂ O (1:2,5)	7,42	7,56	7,09	7,42	7,33	8,50
pH _{es}	7,92	8,17	8,44	8,33	7,67	8,27
CE _{es} ¹ (dS m ⁻¹)	1,00	0,77	3,23	3,96	1,03	0,49
Ca ²⁺ _{es} (mmol _c L ⁻¹)	9,33	3,97	21,98	18,00	5,31	5,12
Mg ²⁺ _{es} (mmol _c L ⁻¹)	3,56	3,55	23,77	21,53	5,27	0,72
Na ⁺ _{es} (mmol _c L ⁻¹)	1,10	0,87	2,73	8,34	1,19	0,71
K ⁺ _{es} (mmol _c L ⁻¹)	1,58	1,51	6,01	17,02	2,05	0,18
RAS ² [(mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}]	0,43	0,45	0,57	1,88	0,52	0,41
Ca ²⁺ _{trocável} (mmol _c dm ⁻³)	63,95	38,85	61,26	40,91	48,95	255,64
Mg ²⁺ _{trocável} (mmol _c dm ⁻³)	11,61	10,98	23,08	26,77	17,09	15,71
Na ⁺ _{trocável} (mmol _c dm ⁻³)	3,53	2,29	6,02	10,19	3,50	7,62
K ⁺ _{trocável} (mmol _c dm ⁻³)	7,29	5,58	14,42	22,72	7,58	8,82
CTC (mmol _c dm ⁻³)	89,03	58,43	106,88	100,58	79,42	298,58
PST ³ (%)	3,96	4,43	5,63	10,13	4,41	2,55
COT (dag kg ⁻¹)	1,83	1,44	3,17	2,86	2,50	1,43
P-rem (mg L ⁻¹)	51,04	55,46	49,48	44,34	47,20	18,92
P Mehlich-1 (mg dm ⁻³)	83,22	327,73	386,09	222,69	350,49	17,49
P Mehlich-3 (mg dm ⁻³)	65,16	266,64	323,62	360,63	329,98	7,50
P RTA ⁴ (mg dm ⁻³)	39,56	86,14	156,25	158,59	129,37	3,27
P Olsen (mg dm ⁻³)	12,71	55,64	62,99	92,03	48,29	3,26
Areia total (g kg ⁻¹)	784,08	903,09	752,45	803,17	866,67	354,73
Areia grossa (g kg ⁻¹)	494,37	642,65	381,29	424,45	452,33	255,30
Areia fina (g kg ⁻¹)	289,71	260,44	371,16	378,73	414,34	99,43
Silte (g kg ⁻¹)	99,52	14,59	101,87	51,53	30,75	209,98
Argila (g kg ⁻¹)	116,40	82,32	145,68	145,30	102,58	435,29
ADA ⁵ (g kg ⁻¹)	75,43	34,31	62,43	75,97	27,32	245,84
Floculação	0,33	0,57	0,57	0,40	0,69	0,44
D _s (g cm ⁻³)	1,48	1,55	1,39	1,39	1,46	1,29
D _p (g cm ⁻³)	2,51	2,59	2,44	2,49	2,57	2,16
CP ⁶ (g g ⁻¹)	0,34	0,30	0,36	0,35	0,37	0,45

¹Condutividade elétrica do extrato de saturação; ²Relação de adsorção de sódio; ³Porcentagem de sódio trocável; ⁴Resina de troca aniônica; ⁵Argila dispersa em água; ⁶Capacidade de pote.

Na caracterização física, foi determinada a composição granulométrica e a argila dispersa em água (ADA) pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2017), e calculado o índice de floculação. A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método da proveta e a densidade das

partículas (D_p) pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2017). A capacidade de pote (CP) foi obtida pelo método gravimétrico direto (SOUZA et al., 2000).

Após a caracterização dos solos, a amplitude das doses de P foi estimada de acordo com Alvarez e Fonseca (1990), baseando-se no P-rem. O intervalo estabelecido para o Vertissolo foi de 0 – 770 mg dm⁻³ e, para os demais solos, foi de 0 – 370 mg dm⁻³. As doses foram definidas como 0, 10, 20, 40, 70 e 100% da dose máxima para cada solo.

As fontes de P escolhidas (Tabela 3) foram o fosfato monopotássico (KH₂PO₄), que foi fornecido preferencialmente até a dose de K chegar a 200 mg dm⁻³, então, a dose de P foi complementada com fosfato de amônio monobásico (NH₄H₂PO₄). O que faltou dos nutrientes K e N foi fornecido em todos os tratamentos na forma de cloreto de potássio (KCl) e sulfato de amônio (NH₄)₂SO₄, respectivamente, a fim de equilibrar com as maiores doses de P.

Tabela 3 – Quantidade das fontes de P utilizadas na composição das doses nos solos

Solo	Dose de P mg dm ⁻³	mg vaso ⁻¹			
		KH ₂ PO ₄	NH ₄ H ₂ PO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄	KCl
V	0	-	-	2267,87	655,41
	77	579,92	-	2267,87	337,78
	154	1159,84	-	2267,87	20,15
	308	1196,63	961,59	1714,50	-
	539	1196,63	2451,24	857,25	-
	770	1196,63	3940,88	-	-
	0	-	-	2267,87	655,41
RY, RQ, PVA1, PVA2, LVA	37	278,66	-	2267,87	502,78
	74	557,33	-	2267,87	350,15
	148	1114,66	-	2267,87	44,90
	259	1196,63	645,61	1896,34	-
	370	1196,63	1361,41	1484,41	-

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Agronomia da UFRPE, entre agosto de 2020 e março de 2021. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 6 x 6, sendo seis solos e seis doses de P, com 4 repetições, totalizando 144 unidades experimentais, o delineamento foi em blocos casualizados.

As parcelas foram constituídas de vasos com capacidade para 2 kg de solo, vedados na base para evitar a drenagem. Por meio de uma proveta, foram acondicionados 1,7 dm³ de solo em cada vaso, com suas respectivas doses de P acrescidas e homogeneizadas no volume total do solo. A umidade foi mantida entre 70 e 50% da CP durante a incubação dos solos com as doses de P, durante 30 dias.

Após 30 dias, vaso a vaso, seu conteúdo foi vertido em uma bandeja, homogeneizado e retirada uma subamostra de aproximadamente 60 cm³ de solo para análises do P recuperado pelos extratores, o solo foi então devolvido ao mesmo vaso. As subamostras de solos foram utilizadas para a extração de P pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, RTA e Olsen, pelos métodos descritos na caracterização dos solos. Estes resultados representaram o P recuperado por cada extrator no momento do plantio.

Finalizada a coleta de solo, foi semeada em cada vaso *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk (5 cm³). Foram realizados desbastes após uma semana da emergência das plântulas, de forma a manter aproximadamente 10 indivíduos por vaso. A umidade foi mantida a 80% da capacidade de retenção de umidade de cada solo, sendo repostada diariamente por meio de pesagens dos vasos.

O primeiro corte da *Brachiaria* foi realizado 30 dias após a emergência das plântulas, sendo a biomassa aérea das plantas pesada e armazenada em sacos de papel. O material vegetal foi seco em estufa a 60° C até peso constante, pesado novamente para obtenção dos resultados de produção de massa seca e moído em moinho de facas. As plantas foram mantidas nos vasos para o segundo ciclo sem acréscimo de nutrientes adicionais, sob o mesmo manejo de umidade no solo até o segundo corte, realizado 30 dias após o primeiro.

As amostras de material vegetal foram digeridas em H₂O₂ e H₂SO₄, para determinar o teor de P pelo método de Adler & Wilcox (TEDESCO et al., 1985). Com os dados do teor de P e da produção de massa seca, foi calculado o conteúdo de P extraído pelas plantas em cada vaso nos dois ciclos consecutivos.

Os resultados de recuperação de P pelos quatro extratores utilizados, de produção de massa seca, de teor e de conteúdo de P nas plantas nos dois cortes foram submetidos à análise da variância. A homoscedasticidade do modelo foi mantida através de análises da distribuição de resíduos e da identificação de outliers pelos valores de RStudent.

Foram ajustadas equações com os valores recuperados de P por cada extrator em função das doses de P aplicadas. As taxas de recuperação de P para cada extrator e em cada solo, foram os coeficientes angulares de cada equação obtida.

Também foram ajustadas equações de regressão da produção de massa seca das plantas em função das doses de P aplicadas, selecionando-se as equações de coeficientes significativos e altos valores de R^2 . Para cada equação, foi calculado o ponto máximo de produtividade (\hat{Y}), que corresponde à máxima produção de matéria seca, para obtenção de $0,9\hat{Y}$ máximo. Substituindo este valor pelo \hat{Y} da mesma equação, foi calculada a dose recomendada de P (DR).

Para as taxas de recuperação de P na *Brachiaria*, foi utilizado o coeficiente angular nas equações lineares, já nos casos em que a equação que melhor se ajustou foi o modelo quadrático, foi calculada a taxa de recuperação diferencial no intervalo entre a dose 0 e a DR.

Para estimar os níveis críticos de P para cada extrator e em cada solo, as DR foram substituídas nas equações de regressão dos teores de P recuperado pelos extratores em função das doses de P aplicadas.

Também foram testadas correlações entre os resultados obtidos de P no solo e na planta com as características dos solos avaliados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Extração de P

A recuperação do P aplicado variou entre os diferentes extratores e solos utilizados, o que já era esperado em função das características peculiares destes solos. Modelos lineares foram os que melhor se ajustaram aos dados, possibilitando a definição das equações de P recuperado em função das doses de P aplicadas, além da taxa de recuperação de P pelos respectivos extratores nos seis solos avaliados (Tabela 4).

O Mehlich-1 foi o extrator com as maiores TR-P, exceto no LVA e no V, onde os valores de TR-P foram maiores pelo Mehlich-3. Dentre outras características, o solo V foi o de maior valor de pH, maior teor de argila, alta CTC e alto teor de Ca^{2+} trocável (Tabela 2). Apesar de não ter sido feita classificação e análise mineralógica deste solo, por estar numa mancha de Vertissolo, é provável que ocorram argilominerais do tipo 2:1, com alto grau de cargas permanentes e poder tampão da acidez. O pH mais alto no V, entre os seis solos avaliados (8,50), deve ter alterado o poder de extração, sendo o solo com menores valores de TR-P por todos os extratores. Também, a formação de compostos de baixa solubilidade entre o P e o Ca^{2+} trocável pode ter dificultado a disponibilização de extração do P neste solo. Isso pode ser comprovado pelo valor mais baixo de P-rem entre os solos estudados, o que fez com que as doses de P calculadas e aplicadas neste solo ($0-770 \text{ mg dm}^{-3}$) fossem superiores às dos demais solos ($0-370 \text{ mg dm}^{-3}$) (Tabela 3).

Por outro lado, os menores valores da TR-P foram obtidos pela RTA, com exceção apenas dos solos RY e RQ, para os quais os menores valores de TR-P foram obtidos com o extrator Olsen. Estes dois extratores não fazem parte do grupo de dissolução ácida, como o Mehlich-1 e Mehlich-3 e, portanto, agem de maneira diferenciada e são mais indicados para solos de pH mais alto. Segundo Santos et al. (2008), o Mehlich-1 pode subestimar ou superestimar a disponibilidade de P nos solos, dependendo da textura e da presença de altos teores de cálcio. Apesar de ser muito utilizado na estimativa do P disponível em solos no Brasil, o Mehlich-1 não é o extrator mais indicado para solos argilosos e com valores de pH próximos à neutralidade ou alcalinos, pois tende a subestimar o P disponível em solos muito tamponados. No entanto, em solos pouco tamponados é comum o Mehlich-1 superestimar o P disponível, como aconteceu com os solos RY, RQ, PVA1, PVA2 e LVA.

Tabela 4 - Equações dos teores de P recuperado (\hat{Y} , mg dm⁻³) pelos extratores em função das doses de P (X, mg dm⁻³) aplicadas em cada solo e a taxa de recuperação de P (TR-P) por cada extrator

Solo	Equação	R ²	TR-P
Mehlich-1			
RY	$\hat{Y} = 190,77808 + 1,33658^{***} X$	0,9906	1,33658
RQ	$\hat{Y} = 560,25571 + 1,65269^{***} X$	0,8941	1,65269
PVA1	$\hat{Y} = 832,88707 + 1,79720^{***} X$	0,9394	1,79720
PVA2	$\hat{Y} = 474,42602 + 1,40128^{***} X$	0,9745	1,40128
LVA	$\hat{Y} = 840,45737 + 1,01692^{***} X$	0,7378	1,01692
V	$\hat{Y} = -5,89170 + 0,25112^{***} X$	0,9845	0,25112
Mehlich-3			
RY	$\hat{Y} = 54,61838 + 0,97418^{***} X$	0,9795	0,97418
RQ	$\hat{Y} = 316,07918 + 0,83191^{***} X$	0,7991	0,83191
PVA1	$\hat{Y} = 342,64452 + 1,05252^{***} X$	0,8317	1,05252
PVA2	$\hat{Y} = 361,76922 + 1,26053^{***} X$	0,9589	1,26053
LVA	$\hat{Y} = 411,21026 + 1,10559^{***} X$	0,8411	1,10559
V	$\hat{Y} = 10,56103 + 0,40016^{***} X$	0,9806	0,40016
RTA			
RY	$\hat{Y} = 36,04680 + 0,84780^{***} X$	0,9652	0,84780
RQ	$\hat{Y} = 113,12757 + 0,82785^{***} X$	0,8727	0,82785
PVA1	$\hat{Y} = 110,95156 + 0,77919^{***} X$	0,9570	0,77919
PVA2	$\hat{Y} = 200,34068 + 0,64773^{***} X$	0,8518	0,64773
LVA	$\hat{Y} = 158,35448 + 0,57707^{***} X$	0,7593	0,57707
V	$\hat{Y} = 7,21992 + 0,03992^{***} X$	0,8467	0,03992
Olsen			
RY	$\hat{Y} = 40,96825 + 0,39383^{***} X$	0,9879	0,39383
RQ	$\hat{Y} = 57,95944 + 0,73108^{***} X$	0,9773	0,73108
PVA1	$\hat{Y} = 70,78391 + 0,84478^{***} X$	0,9621	0,84478
PVA2	$\hat{Y} = 109,96995 + 1,06846^{***} X$	0,9696	1,06846
LVA	$\hat{Y} = 71,40775 + 0,76813^{***} X$	0,9612	0,76813
V	$\hat{Y} = 9,21238 + 0,10889^{***} X$	0,9788	0,10889

*** significativo a 0,1%.

Calheiros et al. (2012) relataram maior capacidade de extração de P do Mehlich-1, em Neossolo Flúvico do Sertão de Pernambuco, solo pouco evoluído e de pH alcalino (7,63). Estes autores compararam o Mehlich-1 com o Mehlich-3, Bray-1 e Olsen e justificaram a maior extração do Mehlich-1 pela solubilização de fosfatos de cálcio com este extrator de caráter

ácido. Assim, em solos próximos a neutralidade e alcalinos, o Mehlich-1 tende a superestimar a disponibilidade de P, pois essa forma de P pode não estar disponível às plantas. Reis et al. (2020) também encontraram os maiores valores de TR-P com o Mehlich-1 e os menores com RTA, mesmo em solos mais intemperizados (Latosolos e Argissolos) e com pH entre 5,14 e 6,92.

Já a RTA é defendida por não ser sensível ao FCP nem à presença de P ligado a cálcio, sendo o método adequado para solos em ampla faixa de pH, de ácidos a alcalinos (NOVAIS; SMYTH, 1999; SANTOS et al., 2008). Para todos os solos, a TR-P com a RTA foi abaixo de 1,0, variando entre 0,0399 mg dm⁻³/mg dm⁻³ (solo V) e 0,8478 mg dm⁻³/mg dm⁻³ (solo RY). Destaca-se, mais uma vez, o solo V em relação aos demais, mesmo com o uso da RTA, foi o solo com valor bem mais baixo de TR-P. Simões Neto et al. (2011), avaliando a extração de P por Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e RTA em cinco solos cultivados com cana-de-açúcar, concluíram que a RTA extraiu mais P independentemente do solo. No entanto, na pesquisa de Simões Neto et al. (2011), não havia nenhum solo similar ao solo V deste estudo. É preciso dar um enfoque diferenciado a estes solos de características vérticas, com presença de argilominerais do tipo 2:1 e elevados valores de pH.

O extrator Olsen, em geral, teve valores de TR-P mais baixos que as dos extratores ácidos e mais altos do que a RTA. Mundialmente, é indicado para solos de pH elevado, mas pouco utilizado nos laboratórios do Brasil. Comparando os extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e Olsen em um Neossolo Flúvico do semiárido do Brasil, Calheiros et al. (2012) observaram valores próximos de TR-P entre os extratores Olsen (0,6131 mg dm⁻³/mg dm⁻³), Mehlich-1 (0,6216 mg dm⁻³/mg dm⁻³) e Mehlich-3 (0,5966 mg dm⁻³/mg dm⁻³). Apesar do solo usado por estes autores também ser alcalino (pH=7,63), não teve grandes diferenças entre os extratores avaliados, possivelmente pelo menor teor de argila e pH em relação ao solo V dessa pesquisa.

Ara et al. (2018) constataram a baixa capacidade do Olsen em extrair P de solos ácidos e alcalinos em comparação com extratores ácidos, como Mehlich-1 e Mehlich-3. Os autores atribuíram esse resultado a maior capacidade dos extratores ácidos em extrair formas de P-Ca e também às particularidades de cada método de extração, pois cada um tem uma reação no solo e atua em compartimentos de P distintos.

Isso demonstra as diferenças que existem em relação ao extrator mais adequado para obtenção de resultados que melhor estimem a disponibilidade de P nos diferentes solos

brasileiros. Apesar do predomínio de Latossolos e Argissolos no Brasil, em muitas áreas produtivas encontram-se solos de menor grau de intemperismo, com presença de argilominerais do tipo 2:1 e valores de pH na escala da alcalinidade. Com análises realizadas por meio do extrator Mehlich-1, as recomendações de adubação fosfatada podem estar sendo equivocadas.

Valores de TR-P acima de 1 significam que o extrator está recuperando mais P do que foi fornecido pela adubação, já que os teores de P preexistentes no solo também são acrescentados na equação, estimados pelo intercepto. Havia a perspectiva de que isso fosse ocorrer, por se tratar de solos de semiárido sob uso agrícola e manejo de adubação sucessiva. É possível que parte do P nestes solos seja liberado por extratores com capacidade de solubilização de compostos menos solúveis de P, especialmente fosfatos de cálcio, como os extratores ácidos. Isso é bastante comum, principalmente, em solos adubados com fosfato natural e avaliados por Mehlich-1 (REIS et al., 2020). Além disso, no presente estudo, os valores de pH dos solos está entre 7,09 e 8,50 e os teores de cálcio trocável entre 38,85 e 255,64 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Tabela 2), valores bem diferentes da grande maioria dos solos tropicais brasileiros.

O solo V foi o único solo em que a TR-P do Mehlich-1 não foi superior a 1, pois, além de ser o solo com maior teor de argila e menor P-rem do estudo (Tabela 2), possui elevado pH, o que pode ter resultado no maior desgaste do extrator. Apesar do Mehlich-3 ser outro extrator do grupo da dissolução ácida avaliado neste estudo, o desgaste devido ao pH foi menos expressivo. Para comprovar isso, foi realizada a medida de pH nos extratos obtidos de cada solo com os extratores ácidos (Mehlich-1 e Mehlich-3), o pH do extrato Mehlich-1 do solo V ficou em 8,27 e do extrato Mehlich-3 ficou em 3,58 (Tabela 5). Sabendo-se que o pH inicial desses extratores é de 1,2 e 2,5, respectivamente, para Mehlich-1 e Mehlich-3, percebe-se que houve uma grande alteração no pH do extrato Mehlich-1 neste solo. Possivelmente, no processo de extração de P do solo V houve solubilização de compostos precipitados, liberando hidroxilas em alta proporção, de modo a atingir este valor de pH no extrato. Isso comprova a teoria de desgaste do extrator Mehlich-1, especialmente em solos de pH mais alto, como o solo V.

Apesar do desgaste do Mehlich-3 ser menor, sua capacidade de extração de P pode ser influenciada pelo aumento do pH do solo, devido à redução da dissolução de P-Al e P-Fe e à dessorção de P dos óxidos de Fe e Al (PENN et al., 2018). Os autores encontraram, para solos de pH neutro, correlação positiva significativa entre o pH do solo e o pH da solução extratora do Mehlich-3 após reação, e correlação negativa significativa entre o pH da solução extratora após reação e o P extraído pelo Mehlich-3, confirmando o comportamento do Mehlich-3 em solos de pH mais elevado.

Tabela 5 - Valores médios de pH dos extratos obtidos para determinação dos teores de P nos solos estudados

Solo	RY ¹	RQ ²	PVA1 ³	PVA2 ⁴	LVA ⁵	V ⁶
pH						
Mehlich-1	1,45	1,51	1,79	1,57	1,55	8,27
Mehlich-3	2,91	2,94	3,17	3,27	2,91	3,58

¹Neossolo Flúvico; ²Neossolo Quartzarênico; ³Argissolo Vermelho Amarelo-1; ⁴Argissolo Vermelho Amarelo-2; ⁵Latossolo Vermelho Amarelo; ⁶Vertissolo. Comparação feita apenas entre os extratores que funcionam por dissolução ácida. O pH inicial do Mehlich-1 e Mehlich-3 é 1,2 e 2,5, respectivamente.

Já em solos alcalinos (pH > 7,0), o desgaste do Mehlich-3 ocorre na mesma magnitude de solos ácidos e neutros, conforme constatado por Penn et al. (2018). Sua extração relaciona-se mais com P-Ca, forma predominante em solos alcalinos, e esse processo ocorre por dissolução de P-Ca com a redução do pH e pela sua precipitação com o íon F⁻ (CaF₂). Apesar da evidência da sensibilidade do Mehlich-3 à elevação do pH do solo, Mallarino (1997) relatou eficiência do extrator em solos com pH > 7,4 e com CaCO₃ > 4%. O autor relacionou a maior extração de P com Mehlich-3 em comparação com Bray-1, nesses solos, com o maior poder tampão do Mehlich-3, sendo mais recomendado para solos de pH elevado.

4.2. Produção de biomassa

Seguindo o mesmo raciocínio da recuperação de P, o crescimento e a produção de massa seca das plantas foram diferenciados entre os solos e os dois cortes sucessivos. Foram obtidas equações para cada solo no primeiro e no segundo corte das plantas, com coeficientes significativos e valores elevados de R². No primeiro corte, houve aumento significativo da produção de massa seca de *Brachiaria decumbens* em função das doses de P aplicadas aos solos, com exceção do solo PVA1 (Tabela 6). Já no segundo corte, o aumento foi significativo para todos os solos, indicando que o tempo entre o semeio e o primeiro corte pode não ter sido suficiente para que as plantas de cada tratamento expressassem diferenças de produção de massa vegetal de forma significativa.

De forma geral, os maiores valores de produção de massa seca foram observados no segundo corte. Após o primeiro corte, as plantas já estavam com o sistema radicular desenvolvido e só precisaram recuperar a parte aérea, conseqüentemente, as doses recomendáveis foram menores no segundo corte, devido a menor demanda por P (Tabela 6).

Os modelos quadráticos foram os que melhor se ajustaram aos dados, com exceção do solo V no primeiro corte, que foi linear (Tabela 6). A falta de ajuste para o solo PVA1 no primeiro corte pode ter ocorrido devido à elevada concentração de P preexistente no solo (Tabela 2), e a baixa dose de P recomendada no segundo corte para esse solo pode ser outro indicativo.

A produção de massa seca das plantas no solo V foi bem inferior aos demais solos, apesar das doses do solo V terem sido superiores às aplicadas nos solos RY, RQ, PVA1, PVA2 e LVA. Além de possuir o menor P-rem entre os solos estudados, é possível que tenha ocorrido a formação de compostos de baixa solubilidade, já que em sua caracterização, este solo tem o maior teor de Ca^{2+} trocável entre todos os solos avaliados, maior valor de pH e os menores teores de P disponível pelos extratores (Tabela 2). Além disso, o teor de P estimado pela dose de 770 mg dm^{-3} no solo V com qualquer extrator químico do experimento (Tabela 4), foi inferior ou semelhante aos teores de P dos demais solos sem acréscimo de P (dose 0 mg dm^{-3}).

Tabela 6 - Equações de produção de massa seca (\hat{Y} , g vaso^{-1}) de *Brachiaria decumbens*, no primeiro e segundo corte, em função das doses de P (X , mg dm^{-3}) aplicadas em cada solo, 90% da produção máxima ($0,9 \cdot \hat{Y}_{\text{máx}}$) e doses recomendáveis de P (DR)

Solo	Equação	R ²	0,9- $\hat{Y}_{\text{máx}}$	DR
Massa seca primeiro corte			g vaso^{-1}	mg
RY	$\hat{Y} = 9,270733 + 0,015111^{**} X - 0,000024548^{*} X^2$	0,97	10,44	90,45
RQ	$\hat{Y} = 4,592011 + 0,030104^{**} X - 0,000055403^{**} X^2$	0,98	7,81	146,50
PVA1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6,23$	-	6,23	0,0
PVA2	$\hat{Y} = 0,80598 + 0,02576^{**} X - 0,00004696^{**} X^2$	0,99	3,90	101,50
LVA	$\hat{Y} = 7,175909 + 0,015723^{**} X - 0,000025169^{*} X^2$	0,97	8,67	116,73
V	$\hat{Y} = 0,50802 + 0,00243^{*} X$	0,74	2,14	672,09
Massa seca segundo corte				
RY	$\hat{Y} = 10,613718 + 0,030097^{**} X - 0,000078283^{**} X^2$	0,97	12,16	60,88
RQ	$\hat{Y} = 11,056975 + 0,016156^{**} X - 0,000023239^{*} X^2$	0,97	12,48	103,35
PVA1	$\hat{Y} = 11,346670 + 0,018828^{**} X - 0,000053664^{**} X^2$	0,97	11,70	5,70
PVA2	$\hat{Y} = 3,427243 + 0,040888^{**} X - 0,000066567^{**} X^2$	0,98	8,73	186,37
LVA	$\hat{Y} = 11,200212 + 0,035397^{**} X - 0,000082987^{**} X^2$	0,96	13,48	78,94
V	$\hat{Y} = 1,430041 + 0,006906^{**} X - 0,000005438^{*} X^2$	0,99	3,26	376,87

*, ** significativo a 5 e 1% respectivamente.

O crescimento da produção de massa seca pode ser visualizado na Figura 2, onde fica clara a diferença entre os solos e os dois cortes avaliados. Os dois Neossolos, RY (Figura 2A) e RQ (Figura 2B) tiveram produções similares no segundo corte. No entanto, no primeiro corte, a produção de massa seca no RQ foi menor do que no RY, o que pode ter ocorrido pela textura mais arenosa deste, com mais de 90% de areia (Tabela 2). Mas no segundo corte, esta diferença foi superada e as plantas tiveram produção crescente de massa seca com o aumento das doses de P (Figura 2B).

Os solos PVA1 e PVA2, são da mesma classe e têm características similares (Tabela 2), mas a produção de massa seca do PVA2 foi menor (Figura 2C e 2D). É possível que as plantas tenham tido outras limitações de crescimento neste solo, como a PST de 10%, que pode ter afetado as propriedades físicas do mesmo, dificultando o desenvolvimento radicular das plantas. Contudo, isso não foi avaliado nesta pesquisa, precisando de confirmações futuras.

O LVA (Figura 2 E) foi o solo em que as plantas tiveram maior produção de massa seca, contrariamente ao solo V (Figura 2F). Originalmente, o LVA tem pH mais baixo, teor de argila mais baixo e P-rem mais alto do que o solo V (Tabela 2), caracterizando melhores condições para o desenvolvimento das plantas neste estudo, com boas respostas às doses de P e mais alta produção de massa seca do que no solo V (Figura 2E e 2F).

Para os teores de P determinados na massa seca vegetal em função das doses, o modelo com melhor ajuste foi o linear, porém não houve ajuste para os solos PVA2 e V em ambos os cortes (Tabela 7). Com produção de massa seca das plantas cultivadas no PVA2 (Figura 2D) mais baixa que no PVA1 (Figura 2C) e no LVA (Figura 2E), solos bem similares a este, o teor de P nas plantas cultivadas no PVA2 foi mais alto e constante no primeiro e no segundo corte (Tabela 7). Possivelmente, as plantas não cresceram por algum outro fator e, com isso, concentraram P em sua biomassa. Destaca-se que o PVA2 é o solo de maior valor de CE ($3,96 \text{ dS m}^{-1}$), bem próximo ao limite de solos salinos, e de PST (10,13%) que o classifica como solódico (EMBRAPA, 2018). Isso pode ter afetado o crescimento e a capacidade de produção das plantas neste solo.

A falta de ajuste no solo V pode ter ocorrido, também, pela formação de compostos de baixa solubilidade com o P, de modo que seus teores na planta não aumentaram com o incremento nas doses aplicadas (Tabela 7). Apesar do aumento nos teores de P no solo V resultante das doses de P terem promovido incremento na produção de massa seca no segundo

corde, isso não foi suficiente para aumentar o teor de P na planta em nenhum dos cortes avaliados.

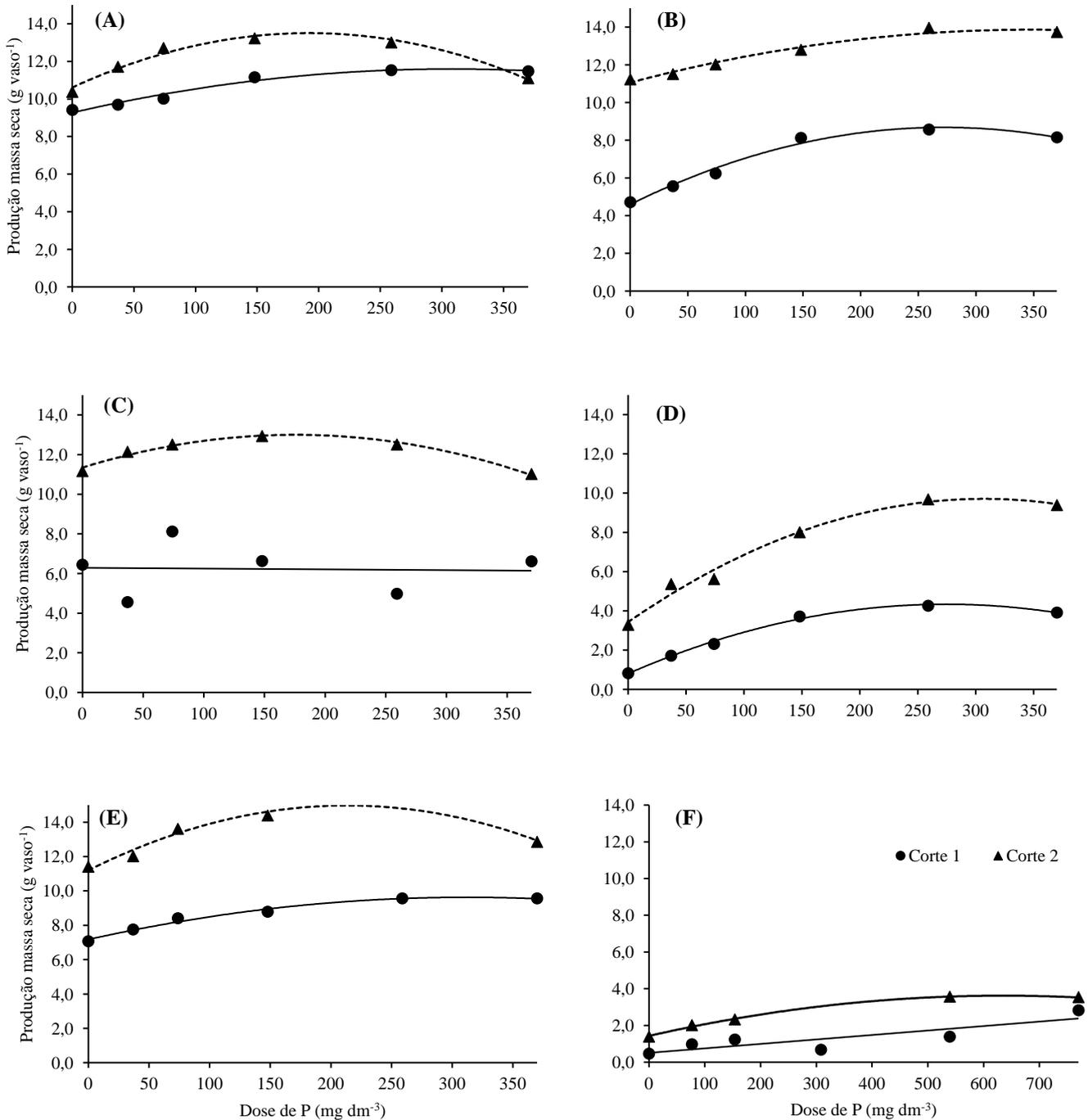


Figura 2 – Produção de massa seca (g vaso⁻¹) da parte aérea de plantas de *Brachiaria decumbens* no primeiro e segundo corte, cultivadas no Neossolo Flúvico (A), Neossolo Quartzarênico (B), Argissolo Vermelho Amarelo 1 (C), Argissolo Vermelho Amarelo 2 (D), Latossolo Vermelho Amarelo (E) e Vertissolo (F), em função das doses de P (mg dm⁻³)

Contrariamente aos resultados de produção de massa seca, os maiores teores de P foram observados no primeiro corte, com plantas menos desenvolvidas (Tabela 7). É provável que isso seja reflexo da diluição do P nas plantas que atingiram maiores valores de produção de massa seca no segundo corte. Possivelmente, o conteúdo de P seja uma variável melhor que seu teor para avaliar as correlações do P na planta com os resultados de P nos solos pelos extratores químicos utilizados neste estudo.

Tabela 7 - Equações do teor de P (\hat{Y} , g kg⁻¹) em *Brachiaria decumbens*, no primeiro e segundo corte, em função das doses de P (X, mg dm⁻³) aplicadas aos solos

Solo	Equação	R ²
Teor de P primeiro corte		
RY	$\hat{Y} = 2,44659 + 0,00686^{***} X$	0,83
RQ	$\hat{Y} = 3,76339 + 0,00547^{***} X$	0,78
PVA1	$\hat{Y} = 3,37734 + 0,00417^{***} X$	0,75
PVA2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4,30$	-
LVA	$\hat{Y} = 3,98319 + 0,00336^{***} X$	0,75
V	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2,85$	-
Teor de P segundo corte		
RY	$\hat{Y} = 1,29306 + 0,00635^{***} X$	0,95
RQ	$\hat{Y} = 1,83775 + 0,00308^{***} X$	0,77
PVA1	$\hat{Y} = 1,58505 + 0,00408^{***} X$	0,94
PVA2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2,75$	-
LVA	$\hat{Y} = 2,28563 + 0,00273^{***} X$	0,77
V	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2,54$	-

*** significativo a 0,1%.

Neste sentido, os modelos linear e quadrático foram os que melhor se ajustaram aos dados do conteúdo de P em função das doses aplicadas (Tabela 8), com exceção apenas para o primeiro corte das plantas cultivadas no solo PVA1. Este foi, também, onde a produção de massa seca não se ajustou a nenhum modelo testado (Tabela 6, Figura 2C).

Como o conteúdo de P é calculado com a massa seca e o teor de P da planta, e as tendências foram contrárias entre os cortes (teor de P maior no primeiro corte, produção de massa seca maior no segundo), os maiores conteúdos de P variaram entre o primeiro e segundo corte (Tabela 8). No entanto, as inclinações das equações foram menores no segundo corte, consequentemente, as TR-P também. Essa redução na TR-P indica que as diferenças de

conteúdo de P entre os tratamentos foram menores no segundo corte, também indica menor demanda por P nesse corte.

Tabela 8 - Equações do conteúdo de P (\hat{Y} , mg vaso⁻¹) em *Brachiaria decumbens*, no primeiro e segundo corte, em função das doses de P (X, mg dm⁻³) aplicadas aos solos e a taxa de recuperação de P (TR-P) pela *Brachiaria decumbens*

Solo	Equação	R ²	TR-P
Conteúdo de P primeiro corte			
RY	$\hat{Y} = 21,45827 + 0,09698^{***} X$	0,82	0,09698
RQ	$\hat{Y} = 16,323852 + 0,167681^{**} X - 0,000292^{*} X^2$	0,98	0,08555
PVA1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 24,47$	-	-
PVA2	$\hat{Y} = 5,446325 + 0,080908^{**} X - 0,000141^{*} X^2$	0,97	0,02862
LVA	$\hat{Y} = 30,582558 + 0,089779^{**} X - 0,000129^{*} X^2$	0,98	0,03011
V	$\hat{Y} = \bar{Y} = 3,41$	-	-
Conteúdo de P segundo corte			
RY	$\hat{Y} = 12,95285 + 0,17384^{***} X - 0,00033239^{***} X^2$	0,91	0,04047
RQ	$\hat{Y} = 22,24186 + 0,04280^{***} X$	0,69	0,04280
PVA1	$\hat{Y} = 20,09941 + 0,03709^{***} X$	0,64	0,03709
PVA2	$\hat{Y} = 10,027671 + 0,073667^{**} X - 0,000094970^{*} X^2$	0,99	0,03540
LVA	$\hat{Y} = 27,574028 + 0,065452^{**} X - 0,000101^{*} X^2$	0,98	0,01594
V	$\hat{Y} = 3,23946 + 0,00643^{**} X$	0,93	0,00643

*, **, *** significativo a 5, 1 e 0,1% respectivamente.

Foram testadas correlações lineares entre as TR-P dos extratores com alguns dos principais atributos dos solos estudados (Tabela 9). Houve correlação inversa significativa entre os teores de Ca²⁺ trocável e a TR-P por todos os extratores químicos avaliados, isto é, quanto maior o teor de cálcio trocável no solo, menor a TR-P do extrator. Também houve correlação inversa significativa com o pH do solo para todos os extratores químicos, exceto Olsen, o que pode ser justificado pelo elevado pH deste extrator (8,5). Isso também comprova que o pH não interfere na TR-P pelo extrator Olsen, podendo ser utilizados para solos de uma faixa mais ampla de pH.

Tabela 9 - Coeficientes de correlação linear (r) entre as taxas de recuperação de P (TR-P) dos extratores e da *Brachiaria decumbens* (utilizando TR-P do conteúdo de P no segundo corte) com os principais atributos dos solos estudados

Atributos do solo	Mehlich-1	Mehlich-3	RTA	Olsen
	TR-P			
pH H ₂ O	- 0,86*	- 0,89*	- 0,87*	- 0,77 ^{NS}
Ca ²⁺ _{trocável}	- 0,86*	- 0,88*	- 0,91**	- 0,81*
P-rem	0,90**	0,71 ^{NS}	0,98***	0,64 ^{NS}
Argila	- 0,84*	- 0,78 ^{NS}	- 0,93**	- 0,71 ^{NS}

^{NS}, *, **, *** não significativo e significativo a 5, 1 e 0,1%, respectivamente.

Resultados contrários ao que costuma ser observado em solos ácidos, a RTA normalmente não se correlaciona de forma significativa com P-rem ou teor de argila, como relatado por Simões Neto et al. (2009). Estes autores usaram solos mais intemperizados, de pH entre 4,10 e 5,55, com os extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e RTA. Quando o P recuperado pelos extratores foi correlacionado com P-rem e teor de argila, houve correlação significativa a 5% somente entre Mehlich-3 e P-rem.

Nas correlações lineares entre o conteúdo de P nas plantas e o P recuperado pelos extratores (Tabela 10), houve correlações significativas em todos os solos em ao menos um corte para cada extrator, com exceção do Mehlich-1, nos solos LVA e V. Além disso, mesmo tendo o maior coeficiente de correlação quando comparado a todos os solos juntos, o Mehlich-1 teve o menor número de correlações significativas de forma individual com cada solo.

Esse resultado confirma a ineficiência do Mehlich-1 para solos alcalinos e com elevadas concentrações de Ca, superestimando a disponibilidade de P nesses solos (NOVAIS et al., 2007). Além disso, os solos mais argilosos apresentaram os menores coeficientes de correlação com o Mehlich-1, sejam eles significativos ou não. Isso evidencia também o menor poder de extração do Mehlich-1 em solos muito argilosos.

Resultado contrário foi obtido por Calheiros et al. (2012), onde o Mehlich-1 foi o segundo extrator com maior correlação com o conteúdo de P na parte aérea do milho cultivado em Neossolo Flúvico. Contudo, o solo de Calheiros et al. (2012) tinha concentração média de Ca (28,2 mmol_c dm⁻³) menor do que a do presente estudo (84,9 mmol_c dm⁻³), o que pode ter influenciado no melhor ajuste do Mehlich-1 no trabalho dos autores.

O Mehlich-3 foi o único extrator com correlação significativa em todos os solos e cortes. Isso confirma a sua versatilidade, abrangendo solos com valores de pH próximos a neutralidade e alcalinos, com diversos atributos químicos e físicos, cumprindo a sua proposta de desenvolvimento (PENN et al., 2018).

Tabela 10 - Coeficientes de correlação linear (r) entre o conteúdo de P (mg vaso⁻¹) em *Brachiaria decumbens*, no primeiro e segundo corte, e o P recuperado (mg dm⁻³) pelos extratores para cada solo estudado

Solo	Mehlich-1	Mehlich-3	RTA	Olsen
Conteúdo de P primeiro corte				
RY	0,90***	0,88***	0,91***	0,90***
RQ	0,53*	0,62**	0,44*	0,52*
PVA1	0,55*	0,55**	0,34 ^{NS}	0,39 ^{NS}
PVA2	0,34 ^{NS}	0,47*	0,28 ^{NS}	0,41 ^{NS}
LVA	0,12 ^{NS}	0,44*	0,54**	0,41*
V	0,21 ^{NS}	0,69**	0,44*	0,56*
Conteúdo de P segundo corte				
RY	0,79***	0,76***	0,80***	0,83***
RQ	0,71**	0,83***	0,69**	0,81***
PVA1	0,64**	0,74***	0,67**	0,75***
PVA2	0,59**	0,61**	0,53*	0,60**
LVA	0,39 ^{NS}	0,64**	0,47*	0,61**
V	0,15 ^{NS}	0,67**	0,23 ^{NS}	0,53*

^{NS}, *, **, *** não significativo e significativo a 5, 1 e 0,1% respectivamente.

A partir das equações de P recuperado pelos extratores em função das doses aplicadas (Tabela 4), utilizando as doses recomendáveis (Tabela 6), estimaram-se os níveis críticos de P no solo para o primeiro e segundo corte (Tabela 11). Os valores de NiCriP seguiram a ordem Mehlich-1 > Mehlich-3 > RTA > Olsen, com exceção no solo V, onde a ordem foi Mehlich-3 > Mehlich-1 > Olsen > RTA.

Os maiores NiCriP dos extratores de dissolução ácida (Mehlich-1 e Mehlich-3) tanto no primeiro, quanto no segundo corte pode ter sido por conta dos solos estudados possuírem pH próximos à neutralidade ou alcalinos, com elevadas porcentagens de saturação por Ca, sendo em média 64% (Tabela 2). Assim, esses solos podem ter grande presença de P-Ca, como já

comentado acima, forma preferencial de extração dos extratores de dissolução ácida (PENN et al., 2019).

De modo geral, os NiCriP foram mais baixos no segundo corte para todos os solos, exceto para o PVA2. Menores valores de NiCriP no segundo corte também foram encontrados por Bonfim et al. (2004), estudando níveis críticos de P no solo para *Brachiaria brizantha*. Já o PVA2 apresentou maiores NiCriP no solo no segundo corte. Pode ter ocorrido dessorção de P nesse solo, entre o primeiro e o segundo cortes, ocasionando esse aumento do NiCriP. O mesmo foi relatado por Bonfim et al. (2003), em Argissolos com cultivo de *B. brizantha*.

Tabela 11 - Níveis críticos de P no solo (NiCriP), no primeiro e segundo corte, pelos extratores utilizados

Solo	Mehlich-1	Mehlich-3	RTA	Olsen
Primeiro corte	NiCriP (mg dm ⁻³)			
RY	311,67	142,73	112,73	76,59
RQ	801,98	437,95	234,41	165,06
PVA1	-	-	-	-
PVA2	616,66	489,71	266,09	218,41
LVA	959,16	540,26	225,72	161,07
V	162,88	279,50	34,05	82,40
Segundo corte	NiCriP (mg dm ⁻³)			
RY	272,15	113,93	87,66	64,94
RQ	731,06	402,06	198,68	133,51
PVA1	843,13	348,64	115,39	75,60
PVA2	735,58	596,69	321,05	309,10
LVA	920,73	498,49	203,91	132,04
V	88,75	161,37	22,26	50,25

Alguns autores comentam que solos mais argilosos apresentam maiores valores de NiCriP no solo, pois o caráter drenado faz com que as plantas utilizem o P de forma mais eficiente, produzindo mais biomassa por unidade de P absorvido (BONFIM et al., 2004; BRITO NETO et al., 2017). Contudo, esse comportamento não foi observado nesse estudo. Os solos com baixos teores de argila apresentaram os mais altos valores de NiCriP. Mesmo com as maiores DR, os menores NiCriP estimados foram os do solo V, devido aos baixos teores iniciais de P nesse solo e as baixas TR-P obtidas pelos extratores químicos. Este é o único solo de textura

argilosa, com maior teor de Ca^{2+} trocável e pH mais alto do estudo (Tabela 2), sendo provável que estejam ocorrendo fenômenos de indisponibilização do P, que merecem ser melhor investigados.

É importante destacar, também, que experimentos em vasos restringem o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, necessitando de doses maiores de P. Conseqüentemente, os níveis críticos tendem a ser maiores, não refletindo a realidade do campo, tornando necessária a realização de experimentos posteriores para calibração destes níveis críticos em campo.

5 CONCLUSÕES

Mehlich-3 e Olsen foram os extratores com maior correlação com o P acumulado nas plantas.

O extrator Mehlich-1 superestimou os teores de P disponível ($\text{TR-P} > 1$), com exceção no Vertissolo.

Mesmo com elevados teores de P disponível dos solos estudados, houve incremento da produção de massa seca com as doses crescentes de P.

Os teores de Ca^{2+} trocável e o pH do solo foram mais influentes nas TR-P dos extratores químicos em solos alcalinos do semiárido do que os atributos comumente correlacionados, como o teor de argila e o P-rem.

O nível crítico de P nos solos RY, RQ, PVA1, PVA2 e LVA seguiu a ordem: Mehlich-1 > Mehlich-3 > RTA > Olsen. Para o solo V, a ordem foi: Mehlich-3 > Mehlich-1 > Olsen > RTA.

São necessários estudos mais aprofundados dos atributos químicos, físicos e mineralógicos dos solos para explicar o comportamento em situações de pH mais alto quanto à extração de P.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. V. H. Correlação e calibração de métodos de análises de solo. In: ALVAREZ, V. V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Eds.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p. 615-646.
- ALVAREZ, V., V. H.; FONSECA, D. M. Determinação de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, n. 1, p. 49-55, 1990.
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 25, p. 25-37, 2000. (Boletim Informativo).
- ARA, I.; ISLAM, M. S.; KASHEM, M. A.; OSMAN, K. T. A comparative study of phosphorus availability in an acidic soil and an alkaline soil amended with organic and inorganic phosphorus sources. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 18, n. 2, 2018. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005001402>>.
- BECKWITH, S. R. Sorbed phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry**, v. 5, n. 16, p. 52-58, 1965. Disponível em:<<https://doi.org/10.1071/EA9650052>>.
- BERTRAND, I.; HOLLOWAY, R. E.; ARMSTRONG, R. D.; McLAUGHLIN, M. J. Chemical characteristics of phosphorus in alkaline soils from southern Australia. Clayton, **Australian Journal of Soil Research**, v. 41, n. 1, p. 61-76, 2003. Disponível em:<<https://doi.org/10.1071/SR02021>>.
- BONFIM, E. M. S.; FREIRE, F. J.; SANTOS, M. V. F.; SILVA, T. J. A.; FREIRE, M. B. G. S. Avaliação de extratores para determinação de fósforo disponível de solos cultivados com *Brachiaria brizantha*. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 25, n. 2, p. 323-328, 2003. Disponível em:<<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v25i2.1912>>.
- BONFIM, E. M. S.; FREIRE, F. J.; SANTOS, M. V. F.; SILVA, T. J. A.; FREIRE, M. B. G. S. Níveis críticos de fósforo para *Brachiaria brizantha* e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 281-288, 2004. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000200006>>.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Relatório final do Grupo de Trabalho Interministerial para Redelimitação do Semiárido Nordeste e do Polígono das Secas**. Brasília. 2005. 117p.
- BRAY, R. H. Correlation of soil tests with crop response to added fertilizers and with fertilizer requirement. In: KITCHEN, H. B. (Ed.). **Diagnostic techniques for soils and crops**. Washington: The American Potash Institute; 1948. p. 53-86.

BRITO NETO, J. F. de; BÜLL, L. T.; SILVA, A. L. P. da; VALE, L. S. do; RIGON, J. P. G. Critical phosphorus levels and availability for castor oil plant grown in different soil classes of Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 04, p. 491-495, 2017. Disponível em:<<http://hdl.handle.net/11449/179721>>.

BUCHER, C. A.; BUCHER, C. P. C.; ARAUJO, A. P. de; SPERANDIO, M. V. L. Fósforo. FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. (Eds.). **Nutrição Mineral de Plantas**. 2 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018.

CALHEIROS, A. S.; SILVA, J. P. S.; OLIVEIRA, M. W.; FREIRE, M. B. G. S.; FREIRE, F. J. Nível crítico de fósforo por diferentes extratores em Neossolo Flúvico alcalino cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 4, p. 590-596, 2012. Disponível em:<<http://doi.org/10.5039/agraria.v7i4a1752>>.

DEBICKA, M. KOCOWICZ, A.; WEBER, J.; JAMROZ, E. Organic matter effects on phosphorus sorption in sandy soils. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 62, n. 6, p. 840-855, 2016. Disponível em:<<https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1083981>>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p.191-234.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 3 ed., Brasília: Embrapa Solos, 2017. 573p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.736 p.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62-68, 2016a. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.017>>.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; TIECHER, T.; BARRÓN, V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 4, p. 369-379, 2016b. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542016404023016>>.

FREIRE, F. J. **Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana de açúcar**. Orientador: Victor Hugo Alvarez Venegas. 2001. 144 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

GÉRARD, F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils – A myth revisited. **Geoderma**, v. 262, p. 213-226, 2016. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.036>>.

HERNÁNDEZ, J.; BERGER, A.; DEAMBROSI, E.; LAVECCHIA, A. Soil phosphorus tests for flooded rice growth in contrasting soils and cropping. Abingdon, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 44, n. 7, p. 1193-1210, 2013. Disponível em:<<https://doi.org/10.1080/00103624.2012.756000>>.

IATROU, M.; PAPADOPOULOS, A.; PAPADOPOULOS, F.; DICHALA, O.; PSOMA, P.; BOUNTLA, A. Determination of soil available phosphorus using the Olsen and Mehlich 3 methods for Greek soils having variable amounts of calcium carbonate. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 45, n. 16, p. 2207-2214, 2014. Disponível em:<<https://doi.org/10.1080/00103624.2014.911304>>.

JACOMINE, P. K. T. Solos sob Caatinga: caracterização e uso agrícola. *In*: ALVAREZ, V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBCS, 1996. p. 95-133.

JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; BURGOS, N.; PESSOA, S. C. P.; SILVEIRA, C. O. da. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Recife: Divisão de Pesquisa Pedológica: SUDENE-DRN, 1972-1973. Disponível em:<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/331168>>.

JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, F. B. R. e; MONTENEGRO, J. O.; FORMIGA, R. A.; BURGOS, N.; MELO FILHO, H. F. R. de. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos da margem direita do Rio São Francisco estado da Bahia**. Recife: EMBRAPA-SNLCS: SUDENE-DRN, 1977-1979. Disponível em:<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/335822>>.

JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. R. Phosphorus in agriculture: a review of results from 175 years of research at Rothamsted, UK. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, p. 1133-1144, 2019. Disponível em:<<https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0078>>.

KHAN, S. U.; FLOWER, T. H.; KHAN, Q. U.; KHAKWANI, A. A.; SAYAL, O. U.; BAKHSH, I. Comparison of suitable extractants used in soil phosphorus testing on different soils. **The Journal of Animal & Plant Sciences**, v. 28, n. 1, p. 113-118, 2018.

LUMBANRAJA, J.; MULYANI, S.; UTOMO, M.; SARNO. Phosphorus extraction from soil constituents using Bray P-1, Mehlich-1 and Olsen solutions. **Journal Yanah Tropika**, v. 22, n. 2, p. 81-89, 2017. Disponível em:<[10.5400/jts.2017.v22i2.67-76](https://doi.org/10.5400/jts.2017.v22i2.67-76)>.

MALLARINO, A. P. Interpretation of soil phosphorus tests for corn in soils with varying pH and calcium carbonate content. **Journal of Production Agriculture**, v. 10, n. 1, p. 163-167, 1997. Disponível em:<<https://doi.org/10.2134/jpa1997.0163>>.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratories**. Raleigh: University of North Carolina, 1953.

MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: A modification of Mehlich-2 extractant. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, n. 12, p. 1409-1416, 1984. Disponível em:<<https://doi.org/10.1080/00103628409367568>>.

MENDONÇA, E.S.; MATOS, E.S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. 107p.

MUMBACH, G. L.; OLIVEIRA, D. A.; WARMLING, M. I.; GATIBONI, L. C.; Quantificação de fósforo por Mehlich 1, Mehlich 3 e Resina Trocadora de Ânions em solos com diferentes teores de argila. **Revista Ceres**, v. 65, n. 6, p. 546-554, 2018. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/0034-737x201865060010>>.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

OLSEN, S.R.; COLE, C.V.; WATENABE, F.S.; DEAN, L.A. **Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate**. (USDA. Circular, 939). Washington: USDA, 1954. 22 p.

PENN, C. J.; CAMBERATO, J. J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. **Agriculture**, v. 9, n. 6, p. 120, 2019. Disponível em:<<https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>>.

PENN, C. J.; RUTTER, E. B.; ARNALL, D. B.; CAMBERATO, J.; WILLIAMS, M.; WATKINS, P. A discussion on Mehlich-3 phosphorus extraction from the perspective of governing chemical reactions and phases: impact of soil pH. **Agriculture**, v. 8, n. 7, p. 106, 2018. Disponível em:<<https://doi.org/10.3390/agriculture8070106>>.

RACENA, R.; DÍAZ, I.; DELGADO, A. Estimation of total plant available phosphorus in representative soils from Mediterranean areas. **Geoderma**, v. 297, p. 10-18, 2017. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.016>>.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011, 420 p.

REIS, J. V.; ALVAREZ, V. V. H.; DURIGAN, R. D.; PAULUCIO, R. B.; CANTARUTTI, R. B. Interpretation of soil phosphorus availability by Mehlich-3 in soils with contrasting phosphorus buffering capacity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, 2020. Disponível em:<<https://doi.org/10.36783/18069657rbc20190113>>.

ROBERTS, T. L.; JOHNSTON, A. E. Phosphorus use efficiency and management in agriculture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 275-281, 2015. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.013>>.

SAMADI, A.; GILKES, R. J. Forms of phosphorus in virgin and fertilized calcareous soils of Western Australia. Clayton, **Australian Journal of Soil Research**, v. 36, n. 4, p. 585-601, 1998. Disponível em:<<https://doi.org/10.1071/S97060>>.

SANTOS, D. R. dos; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>>.

SANTOS, M. C. Solos do semiárido do Brasil. Recife, **Cadernos do Semiárido**, n. 10, p. 25-48, 2015.

SILVA, F. C da; VAN RAIJ, B. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. Brasília, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 267-288, 1999. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000200016>>.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C. de; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. dos S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. da. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 840-848, 2009. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000700005>>.

SIMONETE, M. A.; ERNANI, P. R.; MORO, L.; TEIXEIRA-GANDRA, C. F. A.; GATIBONI, L. C. Eficiência de métodos analíticos na predição da disponibilidade de fósforo para arroz irrigado em solos catarinenses. Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1151-1160, 2015. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140797>>.

SOLIS, P.; TORRENT, J. Phosphate sorption by calcareous Vertisols and Inceptisols of Spain. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 2, p. 456-459, 1989. Disponível em:<<https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300020024x>>.

SOUZA, C. C.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, I. F.; AMORIM NETO, M. S. Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 338-342, 2000. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300006>>.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 2008. 321 p.

STRAWN, D. G.; BOHN, H. L.; O'CONNOR, G. A. **Soil chemistry**. 4 Ed. Wiley-Blackwell, 2015. 392 p.

SUCUNZA, F. A.; BOEM, F. H. G.; GARCIA, F. O.; BOXLER, M. RUBIO, G. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean, and maize on Molliol: Soil test trends, critical levels and balances. **European Journal of Agronomy**, v. 96, p. 87-95, 2018. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.03.004>>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artemed, 2017. 858 p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

USSL STAFF - United States Salinity Laboratory Staff. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1954. 160p. Handbook 60.

WEIHRAUCH, C.; OPP, C. Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far. **Geoderma**, v. 325, p. 183-194, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.047>>.