

GASTON BENATTI ROCHEBOIS

**AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO SÍLICA ATIVA
COMO BLOQUEADOR DA ADSORÇÃO DO FOSFATO PELOS SOLOS
DE CLIMA TROPICAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas para obtenção de título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Márcio Rocha Francelino

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R673a
2020 Rochebois, Gaston Benatti, 1967-
Avaliação do uso de resíduo siderúrgico sílica ativa como
bloqueador da adsorção do fosfato pelos solos de clima tropical /
Gaston Benatti Rochebois. – Viçosa, MG, 2020.
91 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Márcio Rocha Francelino.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Química do solo. 2. Silício. 3. Fosfato. 4. Adsorção.
5. Solos - Teor de fósforo. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e
Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.41

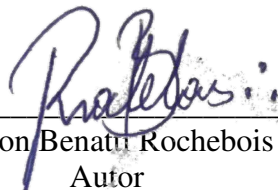
GASTON BENATTI ROCHEBOIS

**AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO SÍLICA ATIVA
COMO BLOQUEADOR DA ADSORÇÃO DO FOSFATO PELOS SOLOS
DE CLIMA TROPICAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas para obtenção de título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de outubro de 2020

Assentimento:



Gaston Benatti Rochebois
Autor



Márcia Rocha Francelino
Orientador

“Crê em ti mesmo,
age e verá os resultados.
Quando te esforças,
a vida também se esforça para te ajudar.”

Francisco Cândido Xavier
(Chico Xavier)

A Deus,
A meus amados pais Robert (*in memoriam*) e Neusa,
Aos meus irmãos, familiares e amigos,
À minha amada esposa Gisela,
Aos meus filhos tão amados, Clara, Pedro e Mariana,
Dedico!

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, pelo acolhimento durante estes anos do Mestrado;

Ao Departamento de Solos da UFV e ao Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de realização deste trabalho;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelos recursos concedidos para realização deste trabalho no mestrado.

Ao professor D.Sc. Márcio Rocha Francelino, pela orientação, disposição, apoio na realização da pesquisa e pelos conhecimentos a mim passados;

Ao professor Ph.D. Liovando Marciano da Costa pelas inúmeras horas de conversa em seu gabinete, por sempre me apoiar e me incentivar em alguns momentos frustrantes e pelo valiosíssimo conhecimento compartilhado. E por ser essa pessoa incrível de conviver e de gerar ideias e discussões que sempre acrescentam na vida profissional e pessoal;

Ao professor D.Sc. Júlio Cesar Lima Neves pela coorientação, principalmente no início do mestrado e no valioso auxílio estatístico e sugestões durante a escrita da dissertação;

Ao Professor D.Sc. André Luiz Lopes de Faria pelos momentos de discussão, conversas, por aceitar de prontidão o convite para a banca de defesa e por suas valiosas sugestões para a melhoria deste trabalho;

À Professora D.Sc. Dirlane Fátima do Carmo, pelos anos de convivência, os quais foram muito proveitosos, e por aceitar o convite para a participação na banca de defesa.

Aos professores do Departamento de Solos, pela atenção recebida e pela participação em minha formação que levarei para toda vida;

A todos os funcionários do Departamento de Solos que contribuíram para a realização deste trabalho e convivência do dia-a-dia, em especial aos laboratoristas, João, Humberto, Júlio César, Carlos Fonseca, Paulo, Cláudio, Lula, Luiz Fernando, Jorge, Beto, Carlinhos, Edimaldo, Mário e demais;

À secretaria do PPG-SNP, obrigado Nayam, pela competência, agilidade e simpatia. E demais secretárias do DPS.

Aos colegas de Pós-Graduação da UFV pelos momentos compartilhados e convívio no dia-a-dia, em especial àqueles que com muito carinho me acolheram, Pedro Henrique, Martin, Patanjaly, Athos, Demétrio, Renan, Viviane, Patrícia, Taislane, Marília, Ana Cláudia, Nancy e Djalma, enfim a todos, quando das minhas primeiras disciplinas cursadas após 20 anos afastado do meio universitário, com os quais tive inúmeros momentos de conversas, discussões e sugestões durante o trabalho.

Ao amigo e irmão José Mário Braga Filho pelo apoio, suporte, conselhos, risadas, a constante presença nos momentos difíceis e de alegria, pela generosidade e conselhos valiosos típicos de uma amizade incondicional.

Ao amigo, padrinho e afilhado, Gilberto Bernardo de Freitas pelos conselhos valorosos, típicos da experiência adquirida ao longo da carreira de Professor universitário, pelos longos papos no caminho de Viçosa para Visconde do Rio Branco, pela atenção, preocupação e pela amizade;

Aos meus familiares, cunhados, cunhadas e agregados por todos os momentos alegres que passamos juntos e por serem minha válvula de escape nos momentos mais tensos. Em especial a Tadeu, Marcela, Daniel, Camila, Tia Gracy, Tia Maria Lúcia, Juliano Benatti que acompanharam minha trajetória me incentivando a todo momento;

A meus Sogros Antônio e Míriam a quem tenho como pais, sempre presentes nos momentos difíceis e felizes, sempre incentivadores da minha jornada do mestrado, pelos ótimos momentos de conversas e conselhos;

Ao meu amado pai Robert M. W. Rochebois (in memoriam) de quem tenho muita saudade e que certamente onde estiver, estará orgulhoso da minha trajetória. Pai um dia nos encontraremos novamente;

À minha amada mãe Neusa Benatti, pela educação e por me apoiar em meus estudos, não medindo esforços e sendo forte desde minha saída de casa aos 14 anos de idade para buscar meu primeiro diploma de Técnico em Eletromecânica, o qual dedico totalmente a você, assim como o diploma de Eng^o. Agrônomo, e agora o de Magister Scientiae, e futuramente o de Doctor Scientiae em Solos e Nutrição de Plantas. Muito obrigado por ser quem é e como é, amo-te do fundo do meu coração;

À minha Linda esposa, Gisela, a quem amo e desejo passar toda a minha vida ao seu lado, pelos momentos alegres, pelas críticas muitas vezes duras, mas que me fizeram seguir em frente com mais afinco e por me apoiar. Sabemos como foi trabalhoso e difícil passarmos esses anos, mas sem você tudo seria mais difícil, menos alegre e cinza. Obrigado por entrar em minha vida, amo-te.

Aos meus queridos e muito amados filhos Clara, Pedro e Mariana, que são as luzes e a razão de minha vida. Espero que toda essa jornada possa pelo menos servir de exemplo a vocês. Papai os ama muito.;

Aos meus irmãos Christianne, Eliane e Roger a quem amo muito e que sabem o quão difícil foi cada conquista nossa, principalmente por tudo que passamos pela vida, espero estarmos e continuarmos juntos até o fim de nossos dias;

Ao meu irmão Roger Benatti Rochebois em especial, pelo companheirismo de toda uma vida, por ser a peça fundamental da realização deste trabalho, quando trouxe uma amostra do material, que é objeto de estudo desta Pesquisa. Obrigado...eternamente obrigado;

Aos amigos que fiz no Laboratório de Geoquímica dos Solos do Departamento de Solos da UFV com os quais tive o prazer de trabalhar e na troca de saberes, aprender com pessoas especiais cito: Valéria Ramos, Djalma, Pedro, Davi, Demétrio, André, Rafael (Cachu), Christiane, Iorrana, Jorge Orlando e Ramon.;

Aos amigos da minha vida, aos quais me desculpo por todo tempo ausente. Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho ou por participarem de momentos especiais em minha vida.

BIOGRAFIA

GASTON BENATTI ROCHEBOIS, filho de Robert Mary Wilfrid Rochebois e Neusa Benatti, nasceu em 27 de janeiro de 1967, na Cidade de Visconde do Rio Branco, MG, sendo o terceiro de quatro irmãos. Coursou até a oitava série na Escola Estadual Dr. Celso Machado e ensino médio no Colégio Técnico Universitário – CTU da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juíz de Fora-MG, atual IFMG campus Juiz de Fora, formando-se como Técnico em Eletromecânica em dezembro de 1986. Em 1992, com 25 anos, ingressou no curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa-MG obtendo-se o título de Engenheiro Agrônomo em dezembro de 1997. Após 20 anos trabalhando como Engenheiro Agrônomo, no mês de agosto do ano de 2019 iniciou o curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa-MG, sendo aprovado para o curso de Doutorado no mesmo programa, com início em Novembro de 2020.

RESUMO

ROCHEBOIS, Gaston Benatti, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2020. **Avaliação da viabilidade do uso do resíduo siderúrgico sílica ativa como bloqueador de fosfato em solos de clima tropical.** Orientador: Márcio Rocha Francelino.

O processo industrial do minério de ferro produz um enorme volume de resíduos siderúrgicos, entre os quais se encontra a sílica ativa, a qual é coletada pelos filtros localizados nas chaminés de escape dos gases efluentes dos fornos. Trata-se de uma variedade amorfa de sílica, formada, exatamente quando ocorre a elevação da temperatura do forno, fazendo com que o silício, passe para o estado gasoso, e, ao passar pelos filtros, resfria-se e volta ao estado sólido, porém com sua estrutura inicial modificada. A relação entre a mineração de ferro e a produção do silício metálico, está na produção maciça de ligas metálicas (ferro silício) destinadas à produção de aço com maior dureza. A sílica ativa pode apresentar potencial agrícola, a partir da possibilidade de redução das quantidades aplicadas de adubação fosfatada, em se confirmando a adsorção por parte desse elemento pelas partículas de solo, deixando mais fosfato livre para as plantas. Espera-se que com a aplicação da sílica ativa no solo, o silício (Si) desta, faça a competição com o fosfato pelos sítios de adsorção nas partículas de argila, deixando o fósforo (P) livre na solução do solo e mais disponível para a absorção pelas plantas. O objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização físico-química do resíduo siderúrgico e avaliar a eficiência da interação do silício (Sílica ativa) com o solo, agindo como bloqueador da adsorção do fosfato. Também foram quantificados os teores de silício na forma de SiO_2 e fósforo na forma P_2O_5 no solo onde o resíduo foi aplicado, obtendo-se como resultado maiores teores de fósforo remanescente (P rem) e consequente redução da capacidade máxima de adsorção do fósforo (CMAP) nos solos que receberam a aplicação de sílica ativa. Foram realizadas análise de retenção de água; pelo método das câmaras de Richards; análise da área superficial específica da sílica ativa (BET Analises); análise mineralógica por difratometria de raios X a fim de determinar a estrutura da substância (sílica ativa) pelo processo da lâmina escavada; imagem da estrutura da sílica ativa por microscopia eletrônica de varredura aplicada à mineralogia de solos, com a finalidade relacioná-la à composição da substância em análise. Os solos receberam a aplicação do resíduo nas doses equivalentes a 0, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 toneladas por hectare ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$), bem como passaram por períodos diferentes de retenção 15, 30 e 45 dias. Foram feitas as análises químicas de rotina para verificar a condição original dos solos e, estes também passaram por

análise granulométrica. Foram realizadas três repetições para cada tratamento e, feitas análises em seus diferentes tratamentos para cada tempo de retenção verificando a disponibilidade de fósforo no solo através das análises de fósforo remanescente e Mehlich 1 (fósforo disponível).

Palavras-Chave: Adsorção do fosfato. Bloqueador da adsorção. Sílica ativa.

ABSTRACT

ROCHEBOIS, Gaston Benatti, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2020. **Feasibility evaluation of the use of active silica steel residue as a phosphate blocker in tropical soils.** Adviser: Márcio Rocha Francelino.

The iron ore industrial process produces an enormous volume of steel residues, among which is the active silica, which is collected by the filters located in the chimneys of exhaust gases from the furnaces. Active silica is an amorphous variety of silica, formed exactly when the oven temperature changes, raising it, causing the silicon to pass to the gaseous state, and when passing through the filters, it cools and returns to the solid state, but with its modified initial structure. The relationship between iron mining and the production of metallic silicon lies in the massive production of metal alloys (silicon iron) for the production of steel with greater hardness. The active silica can present agricultural potential, from the possibility of reducing the applied amounts of phosphate fertilizer, confirming the adsorption by this element by the soil particles, leaving more phosphate free for the plants. It is expected that with the application of the active silica in the soil, the silicon (Si) of it, will compete with the phosphate for the adsorption sites in the particles, leaving phosphorus (P) free in the soil solution and more available for absorption by plants. The objective of this work was to carry out the physical-chemical characterization of the steel residue and to evaluate the efficiency of the interaction of silicon (active silica) with the soil, acting as a phosphate adsorption blocker. Determinations of quantification of the levels of silicon in the form of SiO₂ and phosphorus in the form P₂O₅ were also carried out in the soil where the residue was applied, resulting in higher levels of remaining phosphorus (P rem) and a consequent reduction in the maximum adsorption capacity of the phosphorus (CMAP) in soils that received the application of active silica. Water retention analysis was carried out using the Richards chambers method; analysis of the specific surface of active silica (BET Analyzes); mineralogical analysis by X-ray diffraction in order to determine the structure of the substance (active silica) by the process of the excavated blade; image of the structure of active silica by scanning electron microscopy applied to mineralogy of soils, with the purpose related to the composition of the substance under analysis. The soils received the application of the residue in dosages equivalent to 0, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 tons per hectare (t / ha), as well as going through different retention periods 15, 30 and 45 days. Routine chemical analyzes were carried out to verify the original condition of the soils, and these also underwent granulometric analysis. Three repetitions

were performed for each treatment, and analyzes were made on their different treatments for each retention time, checking the availability of phosphorus in the soil through the analysis of remaining phosphorus and Mehlich 1 (available phosphorus).

Keywords: Phosphate adsorption. Adsorption blocker. Silica fume.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Fluxograma da produção de silício metálico e sílica ativa adaptado de (SOUZA, GOUVEIA e CUNHA, 2018).	27
Figura 2 - Material utilizado: sílica ativa e areia de quartzo lavada.....	28
Figura 3 - Sílica ativa e areia no interior das provetas de 50 cm ³ no teste de umedecimento.....	34
Figura 4 - – Curva de retenção de umidade obtida pelo método da Câmara de Richards dos materiais Sílica ativa e Areia de quartzo.....	37
Figura 5– Curvas de desorção e adsorção da análise de área superficial específica da Sílica ativa.....	39
Figura 6 - Curvas de desorção e adsorção da análise de área superficial específica da Areia de quartzo.	40
Figura 7 – Solubilidade dos materiais sílica ativa e areia de quartzo.....	41
Figura 8 – Difratoograma de Raios X (DRX) do material sílica ativa.....	42
Figura 9 – Difratoograma de Raios X (DRX) do material areia de quartzo.....	43
Figura 1 Mapa de localização dos municípios de Lagoa Formosa e Nova Lima estado de Minas Gerais – Fonte: IBGE 1984.	59
Figura 2 – Perfil Latossolo Vermelho Acriférico típico (LV wf) – Grupo Mata da Corda – Lagoa Formosa – Minas Gerais -Fonte: (SOUZA, 2017).	61
Figura 3 – Perfil Latossolo Vermelho Perférico típico (LV j) – Quadrilátero ferrífero - Grupo Nova Lima – Nova Lima – Minas Gerais.	62
Figura 4 – Esquema do delineamento experimental dentro da estufa setor de fruticultura do Departamento de Fitotecnia.	64
Figura 5 – Valores médios de P rem Lvwf - 15 dias de incubação.	67
Figura 6 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de NEVES para 15 dias de incubação.	67
Figura 7 – Valores médios de P rem 30 dias de incubação LVwf.	68
Figura 8 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 30 dias de incubação LVwf.	68
Figura 9 - Valores médios de P rem e da CMAP para 15 e 30 dias de incubação no LVwf.....	69
Figura 10 – Valores médios de P rem Lvj - 15 dias de incubação.	70
Figura 11 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 15 dias de incubação.....	70
Figura 12 – Valores médios de P rem 30 dias de incubação LVj.....	71
Figura 13 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 30 dias.	71

Figura 14 - Valores médios de P rem e da CMAP para 15 e 30 dias de incubação no LVj. Aumento da P rem indica maior adsorção do Si bloqueando a adsorção do P, e diminuição da CMAP, indicando maior P dessorvido.	72
Figura 15 – Valores médios de P rem 15 dias de incubação LVwf – modo 2.	73
Figura 16 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 15 dias de incubação LVwf – modo 2.	73
Figura 17 – Valores médios de P rem 30 dias de incubação LVwf – modo 2.	74
Figura 18 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 30 dias de incubação LVwf – modo 2.	74
Figura 19 - Valores médios de P rem e da CMAP para 15 e 30 dias de incubação no LVwf. Aumento da P rem indica maior adsorção do Si bloqueando a adsorção do P, e diminuição da CMAP, indica maior P dessorvido – modo de aplicação 2.	75
Figura 20 – Valores médios de P rem 15 dias de incubação LVj – modo 2.	76
Figura 21 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 15 dias de incubação LVj – modo 2.	76
Figura 22 – Valores médios de P rem 30 dias de incubação LVj – modo 2.	77
Figura 23 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 15 dias de incubação LVj – modo 2.	77
Figura 24 - Valores médios de P rem e da CMAP para 15 e 30 dias de incubação no LVj. Aumento da P rem indica maior adsorção do Si bloqueando a adsorção do P, e diminuição da CMAP, indica maior P dessorvido.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Pesos úmidos sílica ativa e areia de quartzo após centrifugação.	31
Tabela 2 - Pesos secos sílica ativa e areia de quartzo após 24 horas em estufa a 105 °C.....	32
Tabela 3 – Atributos químicos da sílica ativa por meio de fluorescência de raios X.....	36
Tabela 4 – Atributos Químicos da Sílica ativa por meio de fluorescência de raios X.....	36
Tabela 5 - Resultado dos cálculos do equivalente de umidade da Sílica ativa conforme equação descrita acima.....	36
Tabela 6 – Cálculo do equivalente de umidade da Areia de quartzo conforme equação descrita acima.	36
Tabela 7 – Resultados dos cálculos da curva de retenção de água de acordo com o método da câmara de Richards e equações descritas acima.....	37
Tabela 8 – Dados da BET análise da sílica ativa	39
Tabela 9 – Dados da BET análise da Areia de quartzo	40
Tabela 10 – Dados da solubilização em NaOH.....	41
Tabela 1 – Granulometria e coloração do perfil do LVwf coletado em Lagoa Formosa, MG – fonte: (SOUZA, 2017).....	61
Tabela 2 – Propriedades físicas do solo coletado em Lagoa Formosa, MG – Fonte: (SOUZA, 2017)	61
Tabela 3 – Granulometria e coloração do perfil do LVj coletado em Nova lima, MG – fonte: (ABRAHÃO, SCHEAFER, <i>et al.</i> , 2016).....	62
Tabela 4 – Propriedades físicas do solo coletado em Nova Lima, MG – Fonte: (ABRAHÃO, SCHEAFER, <i>et al.</i> , 2016).....	63
Tabela 5 – Características Químicas do Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf) e Latossolo Vermelho Perférrico típico (LVj).....	63
Tabela 6 – Quadro da ANOVA para o experimento. Modo 1 de Aplicação – Sílica ativa em Pó seco direto ao solo.....	80
Tabela 7 – Quadro da ANOVA para o experimento. Modo 2 de Aplicação – Sílica ativa suspensão em água e direto ao solo.....	81
Tabela 1 – Resultados P rem para o período de incubação de 15 dias	87
Tabela 2 – Resultados - CMAP para o período de incubação de 15 dias.....	87
Tabela 3 – Resultados P rem para o período de incubação de 30 dias.....	87
Tabela 4 – Resultados - CMAP para o período de incubação de 30 dias.....	88
Tabela 5 – Resultados P rem para o período de incubação de 15 dias.....	88
Tabela 6 – Resultados CMAP para o período de incubação de 15 dias.....	88
Tabela 7 – Resultados P rem para o período de incubação de 30 dias.....	88

Tabela 8 – Resultados CMAP para o período de incubação de 30 dias.....	89
Tabela 9 – Resultados P rem para o período de incubação de 15 dias.....	89
Tabela 10 – Resultados CMAP para o período de incubação de 15 dias.....	89
Tabela 11 – Resultados P rem para o período de incubação de 30 dias.....	89
Tabela 12 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 30 dias de incubação LVwf – modo 2.....	90
Tabela 13 – Resultados P rem para o período de incubação de 15 dias.....	90
Tabela 14 – Resultados CMAP para o período de incubação de 15 dias.....	90
Tabela 15 – Resultados P rem para o período de incubação de 30 dias.....	90
Tabela 16 – Resultados CMAP para o período de incubação de 30 dias.....	91

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	21
CAPÍTULO 1	22
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO – QUÍMICA DO RESÍDUO SIDERÚRGICO SÍLICA ATIVA PARA SUA UTILIZAÇÃO NO SOLO	22
RESUMO	22
ABSTRACT	23
1. INTRODUÇÃO	24
2. MATERIAL E MÉTODOS	26
2.1. Materiais utilizados para estudo comparativo das características físico-químicas do Resíduo siderúrgico sílica ativa e areia de quartzo triturada.....	27
2.2. Teste de umedecimento	28
2.3. Determinação da densidade aparente.....	28
2.4. Determinação da densidade de partículas.....	29
2.5. Determinação da porosidade total	30
2.6. Análise por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X	30
2.7. Determinação da retenção de água no solo pelo método da centrífuga (Equivalente de umidade)	31
2.8. Determinação da Retenção da água no solo pelo método da Câmara de Richards.....	32
2.9. Determinação da área superficial pelo método de Brunauer, Emmet e Teller	33
2.10. Determinação da solubilidade em Hidróxido de Sódio.....	33
2.11. Difratomia de Raios-X.....	34
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.	34
3.1. Teste de umedecimento	34
3.2. Densidade aparente	35
3.3. Densidade de partícula.....	35
3.4. Porosidade total	35
3.6. Retenção de água no solo pelo método da centrífuga (Equivalente de umidade).....	36
3.7. Retenção da água do solo pelo método da Câmara de Richards.....	37
3.8. Área superficial pelo método de Brunauer, Emmet e Teller	38
3.9. Solubilidade em Hidróxido de Sódio	41
3.10. Difratomia de Raios-X.....	42
4. CONCLUSÕES.....	43

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
CAPÍTULO 2	46
AVALIAÇÃO DO USO DO RESÍDUO SÍLICA ATIVA COMO BLOQUEADOR DO FOSFATO NOS SOLOS ALTAMENTE INTEMPERIZADOS.....	46
RESUMO	46
ABSTRACT	48
1. INTRODUÇÃO	50
2. MATERIAL E MÉTODOS	58
2.1. Solos utilizados.....	58
2.1.1 Localização	58
2.1.2. Geologia	59
2.1.3. Solos	60
2.2. Experimento	63
2.2.1. Delineamento.....	64
2.2.2. - Formas de aplicação.....	64
2.3. Análises laboratoriais	65
2.3.1. Determinação do teor de fósforo remanescente (P rem).....	65
2.3.2. Determinação do teor de fósforo disponível	66
2.3.3 Determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)	66
3.1. Resultados das análises para LVwf e LVj	66
3.1.1 LVwf modo de aplicação 1	67
3.1.2. LVj modo de aplicação 1.....	70
3.1.3 LVwf modo de aplicação 2	73
3.1.4. LVj modo de aplicação 2.....	75
3.2. Análises Estatísticas.....	79
4. CONCLUSÕES.....	83
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	84
ANEXO	87

INTRODUÇÃO GERAL

A mineração ocasiona transformações significativas na paisagem, pois é uma atividade que causa impactos socioambientais em diferentes escalas, no entanto é muito importante para as necessidades infraestruturais da sociedade. Os resíduos oriundos dessa atividade que não são reintroduzidos em outros processos produtivos, se acumulam e tornam-se um sério problema ambiental (KATO, 2017).

No ano de 2018, o Brasil produziu 35.407×10^3 toneladas de aço bruto, gerando aproximadamente 21.000×10^3 toneladas de resíduos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2019), conseqüentemente no mesmo ano, dentre os insumos que foram gastos para a produção do aço, cito os que são matéria deste trabalho, o ferro liga e o silício metálico, foram pouco mais de 1.000×10^3 toneladas. Ressaltando que para cada tonelada de silício metálico ou ferrosilício, são produzidos 320 kg de sílica ativa (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2012). A disposição de forma incorreta destes resíduos, pode ocasionar sérios riscos ambientais.

A busca de usos alternativos desses resíduos além de reduzir riscos ambientais, ainda pode gerar novas fontes de renda para as empresas e, contribuir para minimizar a retirada de matéria prima da natureza. Mesmo as unidades de destinação para rejeitos e resíduos sólidos das indústrias siderúrgicas, ambientalmente corretos, podem não representar a melhor solução, pois, tais elementos constituem também um modificador da paisagem. A vida útil das unidades de destinação de rejeitos e resíduos sólidos, ligados a atividades industriais, é bastante limitada, principalmente devido à grande quantidade de material gerado (PIRES e MATTLAZZO, 2008).

O uso desses resíduos no setor agrícola ainda é incipiente, mas apresentam um grande potencial para sua utilização, um exemplo são as escórias siderúrgicas da produção do ferrosilício e silício metálicos, que vem sendo utilizados como corretivos da acidez do solo e ou fertilizantes.

No caso específico deste trabalho, a sílica ativa, possui potencial uso como bloqueador físico-químico da adsorção de fosfato nos solos, o que efetivamente é um dos grandes desafios da agricultura em solos tropicais, que é a correção da baixa disponibilidade de fósforo. A alta capacidade que esses solos têm em fixar (adsorver) fosfato é atribuída entre outros fatores ao intenso intemperismo ocorrido ao longo dos anos, com alto grau de dessilificação dos minerais. Fosfato adsorvido no solo pode sofrer interferência do silicato havendo uma competição entre os dois ânions pelos sítios de adsorção. Essa competição

sugere que aplicações de silicato possam contribuir para bloquear a adsorção de fosfato dos sítios de adsorção, aumentando o aproveitamento do fósforo em solos tropicais, apesar do fosfato apresentar maior afinidade com sítios de adsorção do que o silicato (BRAIT, 2008).

O fósforo é limitante para todas as culturas que são cultivadas nesses solos, as plantas normalmente necessitam de baixas concentrações de fósforo se comparado a outros nutrientes como o nitrogênio e o potássio. Já o silício, devido ao cultivo intenso, é perdido dos solos em quantidades consideráveis (BRAIT, 2008). No solo, o silício apresenta-se na forma de silício solúvel, ácido monossilícico (H_4SiO_4), sílica biogênica e formas amorfas, silício estrutural em minerais silicatados (RODRIGUES, OLIVEIRA, *et al.*, 2011); podendo ser adsorvido no solo (MCKEAGUE e CLINE, 1963).

Vários minerais secundários presentes no solo são capazes de adsorver silicato, assim como as formas amorfas de sílica e substâncias não silicosas pelos óxidos de Fe, Al e Mg, os quais apresentam a maior eficiência de adsorção de silicato (ALCARDE, 1992). Estudos têm apontado algumas interações importantes entre o fosfato e silicato. Existem alguns aspectos comuns envolvidos na dinâmica desses dois compostos no solo, como por exemplo: fósforo e silício são adsorvidos pelos óxidos de ferro e de alumínio da fração argila, podendo o silício deslocar o fósforo previamente adsorvido, das superfícies oxídicas (LEITE, 1997) (OLIVEIRA, 1984); Em várias partes do mundo, é comum a aplicação de silicato na forma de escórias antes da fosfatagem, visando corrigir a acidez do solo e promover a competição entre fosfato e silicato com o intuito de melhorar a disponibilidade de fósforo para as plantas (ROY, ALLI, *et al.*, 1971).

Sob o ponto de vista agrícola, atualmente, a principal vantagem do uso desses resíduos relaciona-se com o fornecimento de nutrientes que possam estar neles contidos e/ou com benefícios ligados ao seu conteúdo. Entretanto, na mesma proporção com que são enfatizadas as vantagens agrícolas, não se pode esquecer que, geralmente os nutrientes presentes nos resíduos estão em proporções desbalanceadas para a nutrição vegetal. Em testes agronômicos um resíduo pode estar isento ou apresentar concentrações consideradas seguras de elementos ou substâncias contaminantes e mesmo assim não ser adequado para o uso agrícola (PIRES e MATTLAZZO, 2008). A adição de um material ao solo agrícola e/ou diretamente em plantas via foliar só se justifica quando este resulta em algum benefício agronômico, como melhorar os atributos relacionados à fertilidade. Assim, são necessários estudos detalhados que comprovem a eficiência agronômica do resíduo.

Apesar dos estudos sobre a utilização do silício na agricultura terem aumentado muito, visando seus benefícios agronômicos, o mesmo não ocorre especificamente para os resíduos

de sílica ativa, fazendo-se necessário realizar mais estudos, principalmente voltados para a caracterização físico-química deste resíduo e sua interação com o solo, avaliando a viabilidade da sua utilização como condicionador de solo, no bloqueio da adsorção de fosfato, bem como, sua interação na neutralização de alumínio trocável.

O presente trabalho foi dividido em dois capítulos. No Capítulo I foi verificado em diferentes etapas, o detalhamento das características físicas e químicas do resíduo sílica ativa com foco na sua possível utilização na agricultura. No Capítulo II foi avaliada a eficiência da interação do silício da sílica ativa com o solo, agindo como bloqueador da adsorção do fosfato através da aplicação da sílica ativa ao solo, assim como foi feita a verificação da efetiva ocupação dos sítios de adsorção do silício oriundo do resíduo siderúrgico nas partículas do solo, bem como a verificação da ação agrônômica da maior disponibilidade de fósforo no solo para as plantas cultivadas, através de análises químicas para fósforo remanescente (P rem) e também pelo extrator Mehlich 1 em solos altamente intemperizados previamente escolhidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCARDE, J. C. **Conceitos da acidez do solo: Características e interpretações técnicas**. 2ª. ed. São Paulo: ANDA, v. BT6, 1992.
- BRAIT, M. A. H. **Interação silício e fósforo na adsorção desses elementos em diferentes solos de cerrado**. 1ª. ed. Jataí: UFG, v. I, 2008. Dissertação apresentada à UFG.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **A Indústria do aço no Brasil - Encontro da indústria para a sustentabilidade**. 1. ed. Brasília: [s.n.], v. I, 2012. 53 p.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Siderurgia em Números 2019**. Instituto Aço Brasil. Rio de Janeiro. 2019. <http://www.acobrasil.org.br>.
- KATO, R. B. Aplicação do resíduo da mineração do cobre para melhoria do desempenho de misturas asfálticas. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Curitiba, v. 14, n. 1, p. 16-24, 25 agosto 2017. <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/46021/pdf>.
- LEITE, P. C. **Interação silício-fósforo em Latossolo-Roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação**. 1ª. ed. Viçosa: Editora da Universidade Federal de Viçosa, v. I, 1997. 87 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa - 1997.
- MCKEAGUE, J.; CLINE, M. Silica in soil solutions: II. The adsorption of monosilicic acid by soil and by other substances. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 43, n. 1, p. 83-96, 1 janeiro 1963. ISSN 10.4141/cjss63-011.
- OLIVEIRA, M. G. D. A. **Determinação adsorção e deslocamento recíproco de silício e fósforo em Latossolos do Triângulo Mineiro**. Viçosa: Editora da Universidade Federal de Viçosa, v. I, 1984. 68P p. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa - Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.
- PIRES, A. M. M.; MATTLAZZO, E. **Avaliação da Viabilidade do Uso de Resíduos na Agricultura**. 1ª. ed. Jaguariuna: Embrapa, v. 19, 2008. 9 p. ISBN ISSN - 1516-4683.
- RODRIGUES, F. D. Á. et al. Silício: Um elemento benéfico e importante para as plantas. **Informações Agronômicas**, Georgia - EUA, n. nº 134, Junho 2011. 14-20. Informações Agronômicas é um Jornal publicado trimestralmente e editado pelo IPNI - International Plant Nutrition Institute.
- ROY, A. C. et al. Influence of calcium silicate on phosphate solubility and availability in Hawaiian Latosols, Honolulu - Hawaii, I, 1971. 757-765. SYMPOSIUM ON SOIL FERTILITY AND EVALUATION - New Delhi: University of Hawaii.

CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO – QUÍMICA DO RESÍDUO SIDERÚRGICO SÍLICA ATIVA PARA SUA UTILIZAÇÃO NO SOLO

RESUMO

Para que ocorra a produção do ferro-silício e silício metálico, há também a necessidade da extração por mineração, neste caso específico, a mineração do quartzo leitoso e, com projeções de aumento bastante significativas, pois a indústria de energia fotovoltaica cresce exponencialmente, principalmente pelo apelo ambiental da geração de energia limpa. No Brasil a produção já ultrapassou 190 milhões de toneladas por ano, sendo que 32% está na forma do resíduo de sílica ativa, que se acumula nos pátios das siderúrgicas. O processo industrial de obtenção do silício metálico produz um enorme volume de resíduo siderúrgico, um deles a sílica ativa, coletada pelos filtros localizados nas chaminés de escapes dos gases efluentes dos fornos industriais num processo denominado despoeiramento. A sílica ativa produz efeitos físicos e químicos em microestrutura quando adicionado em meio mineral, sendo um dos efeitos o aumento de resistência, característica que pode ser bastante favorável quando se busca a diminuição da compactação do solo que envolve o manejo agrícola. Este trabalho de caracterização da sílica ativa físico-quimicamente visa a sua utilização como condicionador de solo e bloqueador da adsorção do fosfato, quando aplicada ao solo. Após as análises físico-químicas comparativas para a sílica ativa e areia de quartzo, a sílica ativa apresentou alta pureza na ordem de 98%, verificado na análise de fluorescência de raios X. Em função do resultado da determinação da porosidade total, pode-se inferir a possibilidade da sílica ativa ser um material muito poroso, propriedade que permite a retenção de água disponível na ordem de 67,23% do seu peso, 23,30 vezes maior que a areia de quartzo, fatores determinados respectivamente pelo método da câmara de Richards e equivalente de umidade pelo método da centrífuga. A sílica ativa possui ótima solubilidade em H₂O, também em NaOH que se mostra crescente mesmo em valores de pH mais altos (alcalinos), que somados a uma alta área superficial específica na ordem de 15,270 m².g⁻¹, possibilita ótima afinidade com reagentes, podendo ser este um material de alta reatividade, conferindo-lhe uma boa possibilidade de formação de outros compostos quando em contato com outros elementos. Este último atributo pode conferir-lhe uma boa capacidade de adsorção, principalmente no tocante à adsorção pelas partículas de argila do solo, inferindo a possibilidade de agir como bloqueador da adsorção do fosfato no solo e também como condicionador de solo.

Palavras chaves: Caracterização físico-química. Resíduo siderúrgico. Sílica ativa.

ABSTRACT: PHYSICAL - CHEMICAL CHARACTERIZATION OF ACTIVE SILICA STEEL RESIDUE FOR USE IN SOIL.

For the production of ferro-silicon and metallic silicon, there is also a need for mining extraction, in this specific case, the mining of milky quartz and, with very significant projections of increase, as the photovoltaic energy industry grows exponentially, mainly for the environmental appeal of clean energy generation. In Brazil, production has already surpassed 190 million tons / year, 32% of which is in the form of active silica residue, which accumulates in the steel mill yards. The industrial process for obtaining metallic silicon produces an enormous volume of steel residue, one of which is active silica, collected by filters located in the chimneys of exhaust gases from industrial ovens in a process called dedusting. The active silica produces physical and chemical effects in microstructure when added in mineral medium, one of the effects being the increase in resistance, a characteristic that can be quite favorable when it comes to reducing soil compaction involving agricultural management. This work of characterization of silica fume physically and chemically aims at its use as soil conditioner and blocker of phosphate adsorption, when applied to the soil. After the comparative physico-chemical analyzes for the active silica and quartz sand, the active silica showed high purity in the order of 98%, verified in the X-ray fluorescence analysis. Depending on the result of the determination of the total porosity, it is possible to infer the possibility of silica fume being a very porous material, a property that allows available water retention in the order of 67.23% of its weight, 23.30 times greater than quartz sand, factors determined respectively by the chamber method Richards and moisture equivalent by the centrifuge method. It also has excellent solubility in H₂O and in NaOH, showing an increase even at higher pH levels (alkaline), which added to a high specific surface area in the order of 15.270 m².g⁻¹, allows great affinity with reagents, which can be this is a material of high reactivity, giving it a good possibility of formation of other compounds when in contact with other elements, also an excellent adsorption capacity, mainly with regard to its possible adsorption by the clay particles of the soil, which may give it the property of phosphate adsorption blocker in soil, main objective of this work and also as soil conditioner.

Keywords: Physical-chemical characterization. Active silica. Steel residue.

1. INTRODUÇÃO

O termo silício é originado do latim *silicis*, que significa “pedra”. O silício não é encontrado na natureza em sua forma elementar, mas como compostos minerais. É o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre. O silício ao se combinar com o oxigênio e com outros elementos, dá origem aos silicatos (sílica – SiO_2 e/ou ortossilicato – SiO_4), correspondendo a uma das famílias de minerais mais encontradas na terra, ou seja, 95% da crosta terrestre contém minerais dessa família, como por exemplo: quartzo, feldspato, mica, anfibólio, piroxênio e outros (LUDKE, 2018).

A atividade da mineração é um setor básico da economia de muitos países, contribuindo direta ou indiretamente para sua manutenção socioeconômica. A mineração da hematita, mineral rico em ferro, está ligada, à produção de aço, que está diretamente ligada à geração de resíduos siderúrgicos. Há uma relação entre a produção do aço e a produção de ligas metálicas, principalmente ferro silício e silício metálico, buscando produzir aço com maior dureza. Para que ocorra a produção destas duas ligas metálicas, há também a necessidade da extração por mineração, neste caso específico, a mineração do quartzo leitoso. E essa extração tem projeções de aumento bastante significativas, pois a indústria de energia fotovoltaica, se soma a este cenário, e cresce em função da consolidação do conceito de energia limpa. Várias são as utilizações do ferroliga e silício metálico, sendo aplicadas nas indústrias, de química fina a base de silicone, microeletrônica e tecnologia da informação, além de ligas especiais e produção de células solares.

Atualmente, a produção mundial de ferroliga e silício metálico é de aproximadamente 1 bilhão de toneladas por ano. Os principais produtores de silício no mundo são: Brasil, Estados Unidos, China e Noruega. A produção brasileira já ultrapassou 190 milhões de toneladas/ano, sendo que 32% dessa produção estão na forma do resíduo sílica ativa, ou seja, 61,5 milhões de toneladas por ano deste resíduo, que se acumulam nos pátios das siderúrgicas (SOUZA e FONSECA, 2017).

O processo de redução do silício a silício zero é denominado de processo carbotérmico¹, utilizando o quartzo leitoso, carvão vegetal ou mineral e lascas de madeira, que são colocados em alto fornos a energia elétrica, podendo alcançar temperaturas

¹ REDUÇÃO CARBOTÉRMICA (Redutor Sólido) - É o tratamento químico de redução de uma substância mineral (quimicamente um óxido) com o emprego do gás CO que tem origem numa substância portadora do elemento carbono – comumente nas ‘formas’ coque ou carvão vegetal 1 – para a produção de um metal. Devido à alta temperatura empregada – característica da operação – com a exceção da substância portadora do carbono, todos os outros componentes da carga normalmente acabam por se fundir e os produtos – excetuando-se naturalmente os gases – são removidos no estado líquido. Uma reação que descreve o processo pode ser a seguinte: $\text{MeO} + \text{CO(g)} = \text{Me(l)} + \text{CO}_2\text{(g)}$ Enquanto o óxido do metal de valor é reduzido, o restante da ganga^[3.1] 2 – que acompanha o minério e é constituída normalmente por minerais também pertencentes aos óxidos – permanece inalterada, porém, pela alta temperatura do processo, funde-se e dá origem à parte principal da escória (HECK, 2007).[3.1]Ganga – minerais que acompanham os minérios metálicos e que não tem interesse metalúrgico.

superiores a 2.700°C , ou seja, energia suficiente para redução do silício a silício zero (SOUZA e FONSECA, 2017).

O silício entra na produção industrial de ligas metálicas, silicones, cerâmicas, eletrônica, microeletrônica, células solares e diversos outros produtos. Dentre todas essas aplicações as ligas metálicas correspondem a aproximadamente 61% do consumo mundial, se caracterizando no mercado mais expressivo do silício (LUDKE, 2018).

Algumas características específicas são necessárias para que o quartzo (normalmente o quartzo leitoso), esteja adequado para entrar no processo de fundição para redução do silício (SiO_2) a silício zero [$\text{Si (l)} + \text{CO}_2 (\text{g})$ – silício metálico), pois o mesmo deve conter no mínimo (alta performance) 97% de sílica e no máximo 1,5% de óxido de alumínio (Al_2O_3) considerado impureza, bem como possuir granulometria entre 20 a 80 μm , granulometria esta classificada como “especificação 9” sendo rejeitadas partículas mais finas (GASIK, 2013). O processo industrial de obtenção do silício metálico produz um enorme volume de resíduo siderúrgico, ao qual denomina-se sílica ativa, que é coletada pelos filtros localizados nas chaminés de escapes dos gases efluentes dos fornos industriais de arco elétrico, num processo denominado de redução carbotérmica¹. Os fornos são abertos para facilitar a alimentação dos insumos, resultando em baixa eficiência do processo de redução.

A sílica ativa é um subproduto da produção de silício metálico e uma variedade amorfa de sílica, formada quando ocorre uma alteração da temperatura do forno, elevando-a, fazendo com que a sílica (SiO_2), passe para o estado gasoso na forma de monóxido de carbono (CO) e óxido de silício (SiO), que ao passar pelos filtros de manga anexos as chaminés, resfria-se, condensa-se e volta ao estado sólido, porém com sua estrutura inicial modificada, passando a uma estrutura amorfa e com partículas esféricas minúsculas (SUZUKI e PEREIRA, 2000).

A sílica ativa foi primeiramente “obtida” na Noruega por volta de 1947. Sua geração como subproduto da indústria de semicondutores, foi percebida quando estes empreendimentos foram obrigados a instalarem filtros para gases oriundos do processo produtivo, e devido às restrições ambientais, tornou-se obrigatória a filtragem desses gases dos fornos. Estes gases de escape dos fornos da produção de silício, ferro silício e silício metálico são conhecidos como sílica ativa, microsílica e/ou sílica volatilizada, subproduto atualmente utilizado pela indústria de cimento.

A sílica ativa possui partículas muito finas cuja área superficial varia de 13 a 30 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$. Suas partículas podem ser 100 vezes menores que a média das partículas do cimento, apresentando-se em partículas esféricas muito pequenas com diâmetro médio aproximado de

0,1µm (SANTOS, SILVA, *et al.*, 2013). A sílica ativa produz efeitos físicos e químicos em microestrutura quando adicionada em meio mineral, sendo um dos efeitos o aumento da resistência. Esta característica pode ser bastante favorável quando se pensa em diminuição da compactação do solo que envolve o manejo agrícola. Tal condição pode acontecer quando houver a reação da sílica ativa (SiO_2) com as partículas de argila do solo, pois esta tem ação pozolânica² altamente eficaz, que a 20°C inicia-se por volta do sétimo dia, e, a 35°C por volta do segundo dia (SANTOS, SILVA, *et al.*, 2013), verificada quando é utilizada no concreto para melhorar suas propriedades de resistência a compressão, união e à abrasão. Também em regiões costeiras, reduz a ação contra corrosão do aço nas estruturas metálicas internas do concreto armado, principalmente em ambientes de regiões costeiras, ricas em cloro (GUERRA, 2013). No solo esta condição poderá ocorrer em tempos maiores de reação.

Existem vários trabalhos de pesquisa na área de construção civil, mais especificamente trabalhos que envolvem o setor de cimento e concreto, utilizando a sílica ativa na verificação do efeito ligante, bem como, efeito de resistência e desgaste, ação pozolânica² e efeito físico de filler³.

A utilização da sílica ativa em solos, visando processos químicos e físicos como para atuação como condicionador de solo e bloqueador da adsorção do fosfato, ainda não foram descritos, ou ainda não foram publicados. Este capítulo, desta pesquisa teve como finalidade avaliar as características físico-químicas da sílica ativa para conhecer melhor as interações deste resíduo antes de introduzi-la no solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

No processo produtivo do silício metálico, os materiais envolvidos são: o carvão que pode ser de origem vegetal ou mineral, o cavaco de lenha e o principal que é o quartzo leitoso. No alto forno quando os gases oriundos do processo se misturam no pré-separador, são conduzidos ao compartimento de despoeiramento, onde se resfriam, solidificam-se e são retidos no setor de armazenamento, onde estão os chamados filtro de manga que têm a finalidade de separar a sílica ativa (fase sólida) dos gases emitidos na atmosfera, então são coletados e armazenados em contêineres (Figura1). A sílica ativa resíduo da produção de silício metálico, e sua aplicação no solo, é uma busca por uma nova tecnologia, mas também por uma destinação adequada para este subproduto.

² Em composições cimentícias, a SA tem sido utilizada para aumentar a resistência mecânica e compacidade devido, principalmente, à ocorrência de reações pozolânicas e ao efeito físico filler. A primeira ocorre devido à interação com o hidróxido de cálcio do cimento, produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), material mais resistente e estável, que favorece a durabilidade dos compósitos, aumentando a resistência e diminuindo a permeabilidade do sistema devido ao processo de refinamento dos poros.

³ Já o efeito filler ocorre devido à diminuição da porosidade total do sistema promovida pelo preenchimento dos vazios de empacotamento, de poros capilares e de gel.

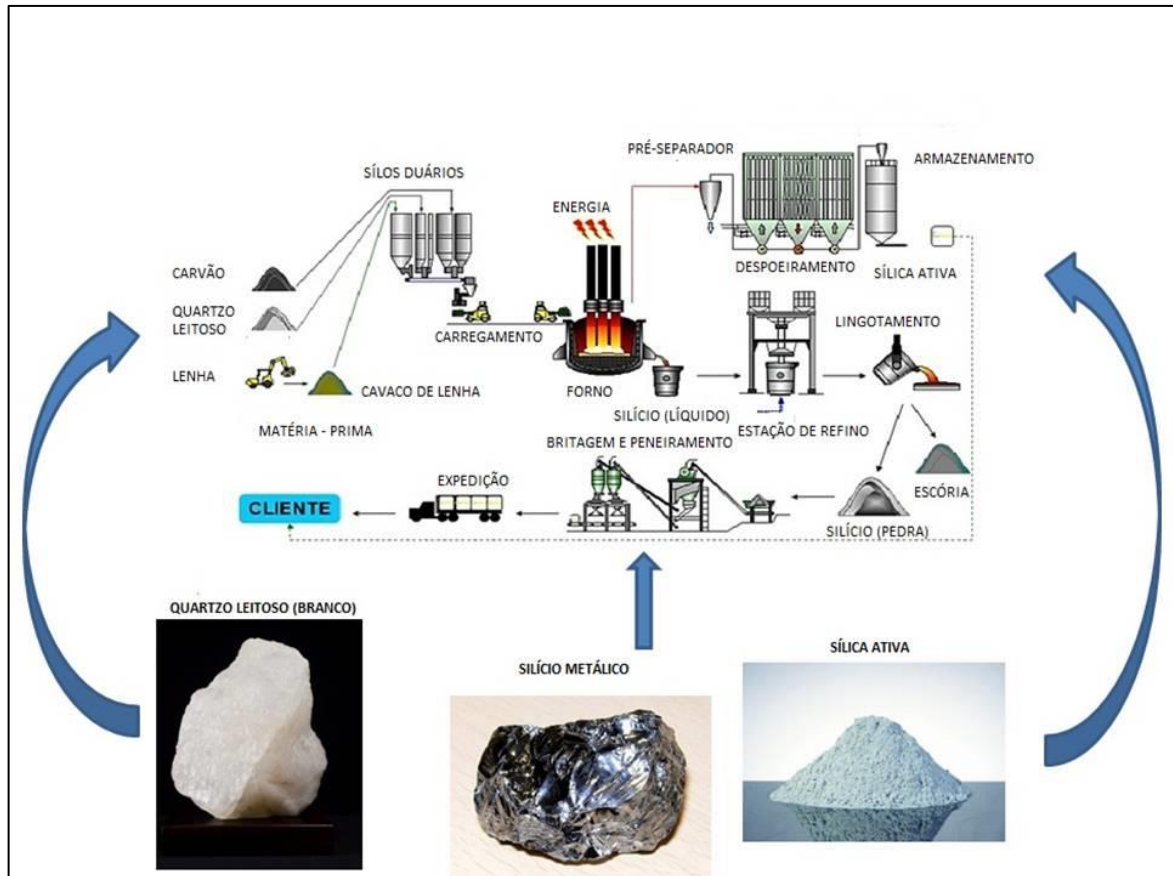


Figura 1- Fluxograma da produção de silício metálico e sílica ativa adaptado de (SOUZA, GOUVEIA e CUNHA, 2018).

2.1. Materiais utilizados para estudo comparativo das características físico-químicas do Resíduo siderúrgico sílica ativa e areia de quartzo triturada

Para realização deste estudo foram utilizados a sílica ativa que é o resíduo siderúrgico da produção de silício metálico, e a areia de quartzo triturada.

A sílica ativa (SiO_2), apresenta-se em partículas esféricas com diâmetro médio aproximado de $0,1 \mu\text{m}$ e amorfas, tendo sido submetida a peneiramento por peneira com malha $0,150 \text{ mm}$, com a finalidade de homogeneizar a sílica ativa para os ensaios físico-químicos (GASIK, 2013). A sílica ativa utilizada apresenta-se na forma de pó com coloração cinza claro (Figura 2).

A areia é constituída de partículas com granulometria entre $0,5$ e $0,1 \text{ mm}$, resultante de desagregação natural ou intemperismo de rochas. No experimento foi usada areia de quartzo lavada ou também conhecida como areia de sílica lavada, que apresenta alto teor de sílica (Si). Após passar por moagem em moinho de placas, também foi submetida a peneiramento por peneira com malha $0,150 \text{ mm}$, com a finalidade de homogeneizar a areia e padronizar com as mesmas dimensões da sílica ativa para os ensaios físico-químicos conforme (LUZ e LINS, 2008) (Figura 2).

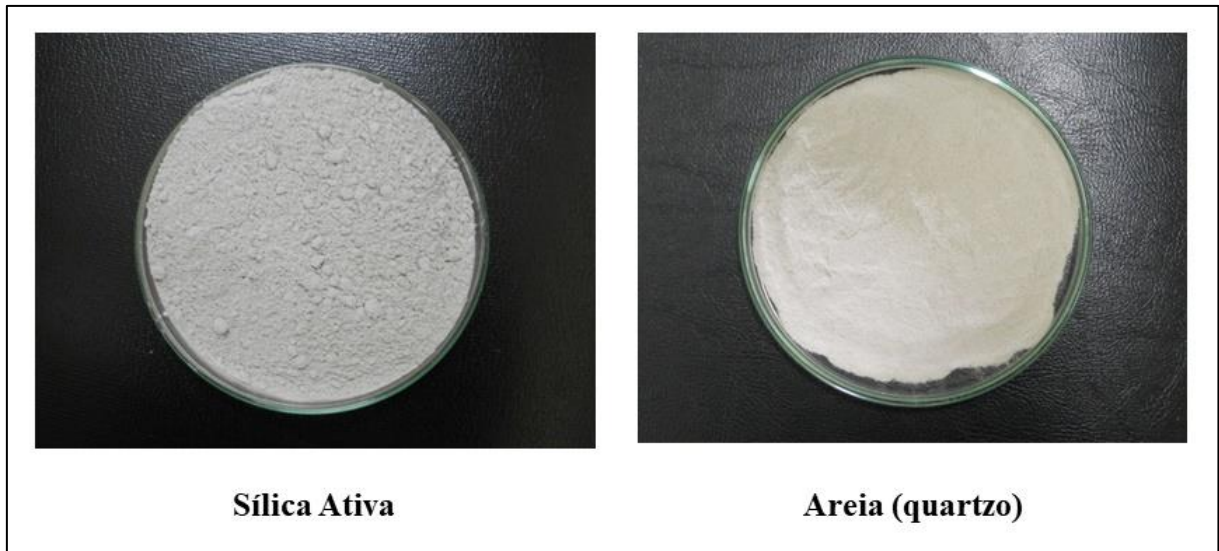


Figura 2 - Material utilizado: sílica ativa e areia de quartzo lavada.

Para alcançar os objetivos desta pesquisa nos estudos experimentais, fez--se necessário que os materiais passassem pelos mesmos ensaios e análises físico-químicas, a fim de que na caracterização, os materiais pudessem expressar os seus atributos, o comportamento físico e químico nos ensaios e análises, demonstrando a ocorrência ou não de bloqueamento do fosfato nos solos, pelo resíduo siderúrgico sílica ativa.

2.2. Teste de umedecimento

Foram utilizadas duas provetas de 50 cm³, previamente pesadas: proveta nº 1 pesando 64,08 g e proveta nº 2 pesando 56,31 g. Na proveta nº 1, foram adicionados 10 cm³ de sílica ativa e na proveta nº 2, 10 cm³ de areia de quartzo. Para isso foram utilizados cachimbos padronizados para o volume desejado. Posteriormente as provetas foram novamente pesadas: proveta nº 1 pesando 65,67 g e proveta nº 2 pesando 69,05 g.

Por diferença de massa das provetas cheias e vazias, chegou-se aos pesos dos materiais contidos em 10 cm³ de cada proveta, que foram: Sílica ativa 1,59 g e areia 12,74 g.

A cada uma das provetas também foram adicionados 10 cm³ de água destilada, e cada proveta ficou com um volume final de 20 cm³ preenchidos, sendo deixadas em repouso por 24 horas. Após este período foram avaliados os resultados.

2.3. Determinação da densidade aparente

O ensaio foi realizado para determinar a densidade aparente do resíduo sílica ativa e areia de quartzo. O método utilizado foi o da proveta, por ser uma determinação da densidade aparente em base seca e em amostras deformadas. A determinação envolveu duas etapas, onde se obteve a massa e o volume dos materiais.

As massas de sílica ativa e areia de quartzo foram obtidas por pesagem em balança de precisão, após secagem em estufa a 105° C e, colocadas em dessecador até total resfriamento. Duas provetas de 50 mL foram aferidas com água deionizada e secas antes do procedimento. Cada proveta recebeu um tipo de material e com o auxílio de um funil, transferiu-se para o interior de cada proveta, uma massa conhecida: de sílica ativa (1,59 g) e areia de quartzo (12,74 g) que ocuparam em cada proveta um volume de 10 cm³. A densidade aparente dos dois materiais foram calculadas antes da execução do teste de umedecimento e aproveitando a montagem para o mesmo. A relação massa e volume foram aferidas antes de ser introduzida a água aos recipientes (CAMARGO, MONIZ, *et al.*, 1986) (SAMPAIO e SILVA, 2007).

A densidade aparente ou densidade global de cada material foi calculada utilizando-se a fórmula (Equação1):

$$d_g = \frac{m_a}{V_T} \quad (\text{Equação1})$$

Onde:

d_g – Densidade aparente, em g.cm⁻³.

m_a – Massa da amostra seca a 105 °C, em g.

V_T – Volume total ocupado na provta de 50 cm³ em mL.

Por convenção:

d_{g1} – Densidade aparente da sílica ativa e d_{g2} – Densidade aparente da areia de quartzo.

2.4. Determinação da densidade de partículas

O método utilizado foi o do balão volumétrico. A determinação envolveu duas etapas, onde se obteve a massa e o volume dos materiais.

As massas de sílica ativa e areia de quartzo foram obtidas por pesagem em balança de precisão, após secagem em estufa a 105° C, e colocadas em dessecador até total resfriamento. Dois balões volumétricos de 50 mL foram aferidos com água deionizada antes do procedimento. Cada balão recebeu um tipo de material e com o auxílio de um funil, transferiu-se para cada balão, uma massa conhecida: de sílica ativa (4 g) e areia de quartzo (20 g).

Duas buretas com capacidade máxima de 50 mL, tiveram seus volumes preenchidos com álcool 92,8 % de pureza. Adicionou-se em cada balão contendo o material um volume inicial desse álcool suficiente para cobrir o material, aproximadamente 25 mL, foram levemente agitados para eliminar possíveis bolhas de ar e colocados em repouso por 30

minutos. Passado o tempo, os balões tiveram seus volumes completados e o volume de álcool gasto em cada bureta correspondente a cada material foi anotado: sílica ativa 48,4 mL e areia 42,98 (VIANA, TEIXEIRA e DONAGEMMA, 2017).

A densidade de partícula de cada material foi calculada utilizando-se a fórmula (Equação 2):

$$D_p = \frac{m_a}{(V_T - V_u)} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: g

D_p – Densidade de partículas, em g.cm^{-3} .

m_a – Massa da amostra seca a 105 °C, em g.

V_T – Volume total aferido do balão em mL.

V_u – Volume utilizado para completar o balão com a amostra, em mL

Por convenção:

D_{p1} – Densidade de partículas da sílica ativa e D_{p2} – Densidade de partículas da areia de quartzo.

2.5. Determinação da porosidade total

A porosidade total percentual da sílica ativa e areia de quartzo foram avaliadas a partir da densidade aparente e densidade de partículas através da seguinte relação (Equação 3) (CAMARGO, MONIZ, *et al.*, 1986):

$$P_{t(\%)} = \left(1 - \frac{D_g}{D_p}\right) \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

P_t – Porosidade total em porcentagem (%).

D_p – Densidade de partículas, em g.cm^{-3} .

d_g – Densidade aparente ou global, em g.cm^{-3} .

Por convenção:

P_{t1} – Porosidade total da sílica ativa e P_{t2} – Porosidade total da areia de quartzo.

2.6. Análise por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X

Em aplicações mineralógicas (geológicas) a fluorescência de raios X é muito utilizada quando se fala em procedimentos de rotinas analíticas rápidas, pois permitem analisar, ligas, pigmentos, rochas, cerâmicas e muitos outros materiais “*in situ*”, identificando suas composições. Apenas a sílica ativa passou pela análise mineralógica de fluorescência de raios-

X. A sílica ativa foi triturada em almofariz de ágata, passou por peneira com malha de 0,053 mm e em equipamento pastilhador de aço inox com área útil de 1,755 cm² e diâmetro de 1,495 cm, apropriado para o procedimento. Um volume de 2,5 cm³ foi submetido a pressão de aproximadamente 4,0 t.cm⁻² para confecção de pastilha com 0,2 cm de espessura, a qual foi utilizada para a análise de fluorescência de raios X e sua composição determinada (SOUZA, COSTA e FILHO, 2017) (TEIXEIRA, ROCHA, *et al.*, 2019).

2.7. Determinação da retenção de água no solo pelo método da centrífuga (Equivalente de umidade)

O ensaio foi realizado visando medir e comparar a capacidade que os dois materiais, a sílica ativa e areia de quartzo, têm em reter água.

Para realização dos ensaios, as amostras foram pesadas e foram feitas quatro repetições para cada material. Os pesos para sílica ativa foram iguais e de 7,0 g para cada uma das repetições. Os pesos para areia de quartzo foram iguais e de 20,0 g para cada uma das repetições. As amostras de sílica ativa e areia de quartzo foram transferidas para recipientes apropriados da centrífuga, que contêm fundo telado para permitir a saída da água no momento da centrifugação. E este telado foi coberto com papel filtro e os recipientes com as amostras, colocados em bandeja para saturação em água por um período de 24 horas. Após este período os recipientes com as amostras foram cuidadosamente retirados da bandeja e, transferidos para a centrífuga.

A centrífuga foi ajustada para atingir uma rotação máxima de 2500 rotações por minuto (RPM), durante um tempo de 30 minutos. Findo a centrifugação, as amostras de sílica ativa e areia de quartzo foram retiradas dos recipientes da centrífuga, colocadas em pequenas latas de alumínio com tampa cujos pesos eram conhecidos. As amostras de cada material foram pesadas juntamente com as latas, e, tiveram seus pesos anotados. Os pesos da lata com amostras de sílica ativa e areia de quartzo úmidas após centrifugação foram de:

Tabela 1- Pesos úmidos sílica ativa e areia de quartzo após centrifugação.

Latas contendo sílica ativa úmida					Latas contendo areia de quartzo úmida				
Latas nº	1	2	3	4	Latas nº	1	2	3	4
	g					g			
Pesos	37,69	40,38	43,20	39,20	Pesos	51,52	51,59	50,08	50,08

Imediatamente após a pesagem, as amostras nas latas, foram colocadas em estufa a 105 °C onde permaneceram por 24 horas. Após período de secagem na estufa, as amostras

foram novamente pesadas e os valores anotados. Os pesos da lata com amostras de sílica ativa seca e areia de quartzo seca foram de:

Tabela 2 - Pesos secos sílica ativa e areia de quartzo após 24 horas em estufa a 105 °C.

Latas contendo sílica ativa seca				Latas contendo areia de quartzo seca					
Latas nº	1	2	3	4	Latas nº	1	2	3	4
	g					g			
Pesos	31,49	32,66	36,22	32,38	Pesos	50,53	50,69	49,50	49,08

A retenção de água no solo pelo método da centrífuga (Equivalente de umidade) foi determinada em laboratório utilizando a força centrífuga exercida pela rotação de um rotor a velocidade aproximada de 250 vezes a aceleração da gravidade, simulando a força com que a água fica retida nas partículas da sílica ativa e da areia de quartzo, sendo uma simulação muito próxima (estimativa) ao que seria a capacidade de campo de um solo. Os resultados obtidos do equivalente de umidade de cada amostra de sílica ativa e areia foram calculados através da fórmula (Equação 4) (SÁ e VIANA, 2017):

$$U_{eq} = \frac{(P_{u_n} - P_{s_n})}{P_{a_n}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

U_{eq} – Equivalente de umidade (%).

P_{u_n} – Peso da amostra úmida + peso da lata de alumínio.

P_{s_n} – Peso da amostra seca (105 °C) + peso da lata de alumínio.

P_{a_n} – Peso da lata de alumínio com amostra seca (105 °C) – Peso da lata de alumínio.

2.8. Determinação da Retenção da água no solo pelo método da Câmara de Richards

A determinação da curva de retenção de água dos materiais sílica ativa e areia de quartzo foi realizada através da técnica tradicional de laboratório da Câmara de Richards. Utilizaram-se para cada material: sílica ativa e areia de quartzo, tensões de 10 kPa, 33 kPa, 100 kPa e 1500 kPa. As curvas características foram ajustadas de acordo com os pares de pontos de potencial e umidade, sendo que a umidade no potencial 1500 kPa corresponde ao que seria no solo o ponto de murcha permanente e no potencial 33 kPa à capacidade de campo.

A água disponível (AD) da sílica ativa e da areia de quartzo é calculada pela diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, ou seja, como trata-se de partículas de materiais distintos e não de solo, a AD é calculada pela diferença das umidades nos potenciais de 33 kPa e 1500 kPa, conforme a equação 5 (TEIXEIRA e BHERING, 2017). Após passarem por pressão negativa de 10, 33, 100 e 1500 KPa na câmara de Richards, as amostras de sílica ativa e areia de quartzo foram pesadas, os pesos anotados, e foram colocadas em estufa a 105 °C por 24 horas e novamente pesadas.

$$AD = U_{33\text{kPa}} - U_{1500\text{kPa}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde :

AD – Água disponível (%)

$U_{33\text{kPa}}$ – Umidade no potencial 33 kPa

$U_{1500\text{kPa}}$ – Umidade no potencial 1500 kPa

2.9. Determinação da área superficial pelo método de Brunauer, Emmet e Teller

A sílica ativa e areia de quartzo, foram submetidas a análise de determinação da área superficial específica pelo método de Brunauer, Emmet e Teller para adsorção de multicamadas de gases em superfícies sólidas. Nas análises foi utilizado como adsorbato o gás o nitrogênio (N_2), na temperatura de evaporação (77 K) sobre a superfície dos materiais sílica ativa e areia de quartzo, os adsorventes (REIS, 2013). Os resultados foram expressos por gráficos e em $m^2 \cdot g^{-1}$.

2.10. Determinação da solubilidade em Hidróxido de Sódio

A realização do teste de solubilização do Si contido nos materiais sílica ativa e areia de quartzo, foi feita em água e hidróxido de sódio nas concentrações de 0,01; 0,02; 0,1; 0,5; 1,0; 2,0 mol.L⁻¹.

Os materiais foram padronizados em peneira com malha de 0,150 mm e, para cada concentração de NaOH bem como para a H₂O, foram pesadas amostras de 2,5 g de sílica ativa e 2,5 g de areia. Em seguida as amostras de cada material foram colocadas em erlenmayer de 125 mL sendo adicionados 50 mL de H₂O e as soluções de NaOH nas concentrações definidas. O procedimento foi feito com três repetições em H₂O e por concentração de NaOH, para cada material. Os erlenmeyers foram colocados em agitadora horizontal orbital, agitando a 125 rotações por minuto (RPM) durante um período de 15 minutos com intervalos de uma hora após cada agitação. No total, foram feitas seis agitações.

Os sobrenadantes foram filtrados em papel de filtragem lenta e a eficiência foi determinada comparando-se a massa das amostras dos materiais retidos nos filtros, imediatamente após a filtragem e a massa dos materiais retidos nos filtros após secagem em estufa a 105 °C por 24 horas (AQUINO, BARRETO, *et al.*, 2016).

Os filtrados de ambos os materiais foram encaminhados para leitura em Absorção atômica para quantificação de Si extraído em cada tipo de material.

2.11. Difratometria de Raios-X

Para ambos os materiais sílica ativa e areia de quartzo foram montadas lâminas escavadas e as leituras das lâminas foram feitas por difratometria de raios-X (DRX). A técnica de difração de raios X demonstra que o perfil de difração é característico para cada fase cristalina, sendo uma técnica rápida, simples e possibilita análise qualitativa inclusive de materiais compostos (COSTA, KER, *et al.*, 2009) (GONÇALVES, 2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

3.1. Teste de umedecimento

Sabendo-se que a densidade do Si de acordo com a tabela periódica é de $2,39 \text{ g.cm}^{-3}$, o teste de umedecimento foi feito visando saber se a sílica ativa flutuaria ou afundaria em contato com a água e para observar se ocorreria expansão ou contração do material.

Após 24 horas do teste montado, observou-se que ocorreu a contração, ou seja, a redução do volume inicial de 10 cm^3 da sílica ativa para um volume final de $4,5 \text{ cm}^3$. Por outro lado, não houve alteração no volume inicial da areia de quartzo de 10 cm^3 (Figura 3).

Verificou-se também que a água ocupou espaços diferentes nos materiais. Na proveta com a sílica ativa, que apresentou volume final de 55 % menor, quando comparado ao da areia de quartzo, pode-se inferir que os espaços vazios entre as partículas da sílica ativa são muito maiores que o apresentado pela areia de quartzo. O resultado mostra que há uma possibilidade da sílica ativa apresentar uma estrutura muito porosa, enquanto que a areia mostra-se uma estrutura com macroporos formados pelos contatos entre as partículas.

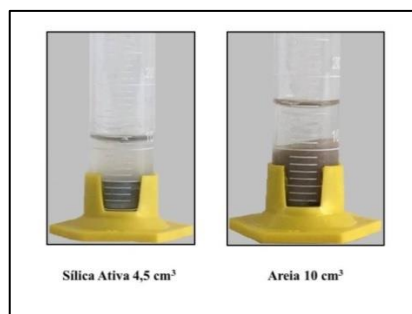


Figura 3 - Sílica ativa e areia no interior das provetas de 50 cm^3 no teste de umedecimento.

3.2. Densidade aparente

Os valores de dg_1 – densidade aparente da sílica ativa e dg_2 – densidade aparente da areia de quartzo, determinadas simultaneamente pelo método da proveta foram de $dg_1 = 0,159 \text{ g.cm}^{-3}$ e $dg_2 = 1,274 \text{ g.cm}^{-3}$, inferindo que a sílica ativa pode ser muito porosa, quando comparada a areia de quartzo.

3.3. Densidade de partícula

Os valores de Dp_1 – densidade de partículas da sílica ativa e Dp_2 – densidade de partículas da areia de quartzo, determinadas simultaneamente pelo método do balão volumétrico foram de $Dp_1 = 2,53 \text{ g.cm}^{-3}$ e $Dp_2 = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$. Os resultados comprovam que a sílica ativa tem uma alta densidade de partícula confirmando o alto teor de sílica do material, pois, encontra-se na faixa de densidade de partícula do mineral quartzo. Infere-se que a sílica ativa é um material muito poroso e a areia de quartzo, em função de sua formação mineralógica, confirma a densidade desse tipo de material.

3.4. Porosidade total

Os valores de Pt_1 – porosidade total da sílica ativa e Pt_2 – porosidade total da areia de quartzo, determinadas simultaneamente foram de 93,7 % e 52 %, respectivamente (Equação 3). Os resultados inferem que a sílica ativa possui uma alta porosidade total entre partículas, ou seja, apresentando macroporos e podendo apresentar também alta microporosidade, levando-se em consideração que há a possibilidade desta microporosidade ser composta pela fase interior das esferas da sílica ativa. A areia de quartzo, material natural de forma maciça, característica que possibilita apenas formação de macroporos devido ao arranjo das partículas unidas entre si.

3.5. Fluorescência de Raios X

A espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) teve o objetivo de identificar e quantificar a composição química da sílica ativa, a fim de fornecer informações sobre este material. Verificou-se que o principal composto foi o SiO_2 com 96,063 % em média do total da amostra. Esse resultado (Tabelas 3 e 4) confirma o alto potencial de silício deste material e, sua alta pureza possibilita a utilização deste no solo, como possível bloqueador da adsorção do fosfato, ação que pode vir a minimizar as constantes utilizações safra a safra de fertilizantes fosfatados na produção agrícola sobre solos altamente intemperizados, um desafio que preocupa pesquisadores e profissionais envolvidos com a difícil arte de produzir melhor e de forma sustentável.

Tabela 3 – Atributos químicos da sílica ativa por meio de fluorescência de raios X

Pastilha	Composição química Sílica ativa - Fluorescência de raios X						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	%	Fe ₂ O ₃	MnO	ZnO
P 001	96,6108	1,6129	1,5171		0,1280	0,0543	0,0384
P 002	96,4018	1,2603	1,7935		0,0649	0,0277	0,0121

Tabela 4 – Atributos Químicos da Sílica ativa por meio de fluorescência de raios X

Pastilha	Composição química Sílica ativa - Fluorescência de raios X						
	Cr ₂ O ₃	CuO	P ₂ O ₅	%	SO ₃	Yb ₂ O ₃	Sc ₂ O ₃
P 001	0,0234	0,0152
P 002	0,0420	0,0137	0,2476		0,1186	0,0159	0,0019

3.6. Retenção de água no solo pelo método da centrífuga (Equivalente de umidade)

Os resultados foram calculados utilizando-se a (equação 4) os resultados expressos de sílica ativa na Tabela 5 e de areia de quartzo na tabela 6.

Tabela 5 - Resultado dos cálculos do equivalente de umidade da Sílica ativa conforme equação descrita acima.

Amostra	Equivalente de umidade da Sílica ativa					
	Peso da Lata	Pu _{Si}	PS _{Si}	Pa	Ueq	Média Ueq
	g				%	
1	26,3800	37,6900	31,4900	5,1100	1,2133	1,1790
2	26,4200	40,3800	32,6600	6,4200	1,2371	
3	30,2500	43,2000	36,2200	5,9700	1,1691	
4	26,1600	39,2000	32,3800	6,2200	1,0964	

Pu_{Si} - (Peso Sílica ativa úmida + Peso da Lata); PS_{Si} - (Peso Sílica ativa seca + Peso da Lata); Pa - (Peso da Sílica ativa seca sem a lata) - as amostras foram secas a 105 °C por 24 horas

Tabela 6 – Cálculo do equivalente de umidade da Areia de quartzo conforme equação descrita acima.

Amostra	Equivalente de umidade da Areia de Quartzo					
	Peso da Lata	PU _{Si}	PS _{Si}	Pa	Ueq	Média Ueq
	g				%	
1	31,0100	51,5200	50,5300	0,9900	0,0507	0,0506
2	31,2500	51,5900	50,6900	0,9000	0,0463	
3	29,6400	50,0800	49,0500	1,6400	0,0530	
4	30,0000	50,0800	49,0800	1,0000	0,0524	

Pu_A - (Peso da Areia úmida + Peso da Lata); PS_A - (Peso da Areia seca + Peso da Lata); Pa - (Peso da Areia seca sem a lata) - as amostras foram secas a 105 °C por 24 horas.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se um equivalente de umidade médio correspondente a um valor aproximado da capacidade de campo da sílica ativa de 117,90% e

da areia de quartzo de 5,06%. A sílica ativa por ser um material pozolânico, sua forma esférica, porosidade total alta, permite maior acesso a água no interior destes, assim como, devido a sua morfologia, terá um índice maior de água adsorvida em sua superfície. A areia devido a sua estrutura maciça e por apresentar menor porosidade total, mostrou valores muito menores que o da sílica ativa, no que diz respeito a retenção de água. Fazendo uma relação entre U_{eq1}/U_{eq2} temos; $1,1790/0,0506 = 23,3000$, ou seja, a sílica ativa tem uma capacidade em reter água 23,3000 vezes maior que a areia de quartzo.

3.7. Retenção da água do solo pelo método da Câmara de Richards

A água disponível foi calculada utilizando-se a (equação 5) e os resultados estão expressos na Figura 4 e tabela 7 a seguir para a sílica ativa e a areia de quartzo.

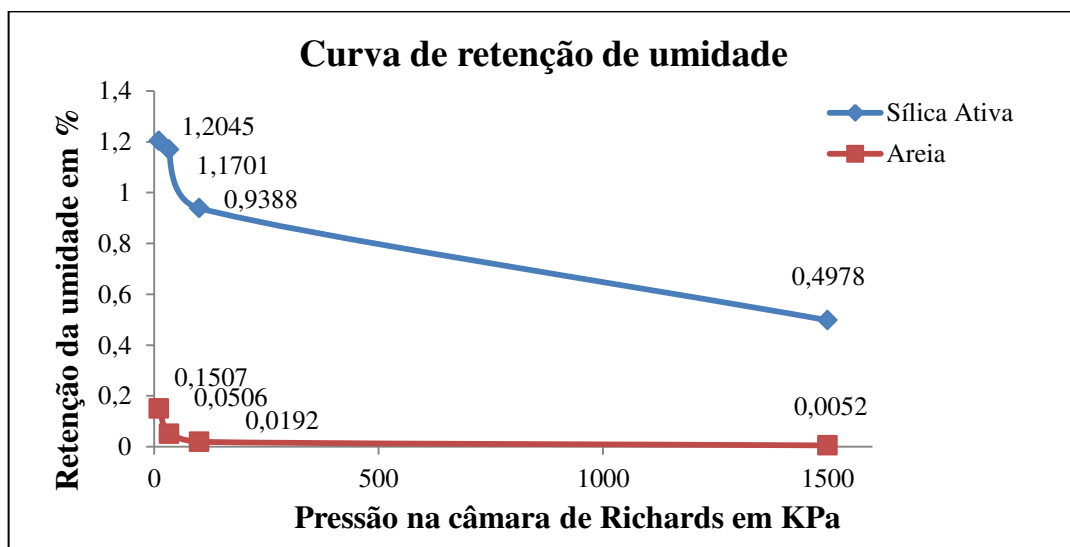


Figura 4 - – Curva de retenção de umidade obtida pelo método da Câmara de Richards dos materiais Sílica ativa e Areia de quartzo.

Tabela 7 – Resultados dos cálculos da curva de retenção de água de acordo com o método da câmara de Richards e equações descritas acima.

Amostra	10	33	100	1500
	KPa			
	%			
SA	1.2045	1.1701	0.9388	0.4978
AQ	0.1507	0.0506	0.0192	0.0052

SA – Sílica ativa; AQ – Areia de quartzo.

A areia caracteriza-se pela baixa capacidade de retenção de água, causada principalmente pela formação de grande porosidade (macroporos) entre suas partículas, favorecendo um escoamento rápido da água de percolação mesmo em baixas tensões, onde

percebem-se pequenas quantidades de água retida, explicando a rápida inclinação da curva. Ao calcular-se a água disponível de acordo com a fórmula descrita, a areia de quartzo reteve e tem disponível 4,54% do seu peso em água, possivelmente água superficial, que deverá ser perdida rapidamente em situações de *stress* hídrico.

A sílica ativa, material pozzolânico artificial, apresenta alta uniformidade estrutural decorrente do processo de produção estável, tanto em relação às propriedades físicas, como a composição química. São esféricas, ocas, material muito poroso, e sua textura proporciona alta superfície específica. O alto teor de SiO₂ amorfo, aliado a finura das partículas, proporciona reatividade, permitindo adsorção da água superficial, por preenchimento das regiões porosas e por capilaridade, retendo a água com muita eficiência. Apresenta um comportamento muito semelhante a argilas de solos melhores estruturados como por exemplo, os latossolos. Nota-se pelo gráfico a maior retenção de água deste material em baixas pressões e, mesmo sob altas tensões a perda de umidade foi de forma mais lenta, comprovada pela suave inclinação da curva de retenção de água. Ao calcular-se a água disponível de acordo com a fórmula descrita, a sílica ativa reteve e tem, disponível 67,23% do seu peso em água. Água que em situações de *stress* hídrico será mantida por mais tempo, devido às forças de tensão exercidas pela capilaridade, além da água retida no interior dos poros e superficialmente.

3.8. Área superficial pelo método de Brunauer, Emmet e Teller

A sílica ativa, material pozzolânico em sua forma natural e sendo um pó muito fino da ordem de 0,1µm, em presença de água aumenta em muito as possibilidades de reações químicas com outros materiais, mas principalmente aumentam suas reações de adsorção a outras partículas do meio onde se encontra.

Devido à sua alta área de superfície específica, ao seu alto teor de SiO₂ amorfo e aliado a uma elevada finura, a sílica ativa tem a possibilidade de ser um material bastante reativo (composição química e da microestrutura da sílica ativa), o que proporciona a possibilidade de reagir quando em contato com outro elemento ou substância, também formando compostos estáveis com poder aglomerante, principalmente quando em presença de água.

Os resultados das análises de área superficial específica (figura 5) e (tabela 8) confirmam a possibilidade dessas características de ação. As isotermas apresentadas na análise da sílica ativa são representações características de adsorventes porosos. As isotermas auxiliam na determinação da capacidade de adsorção do material.

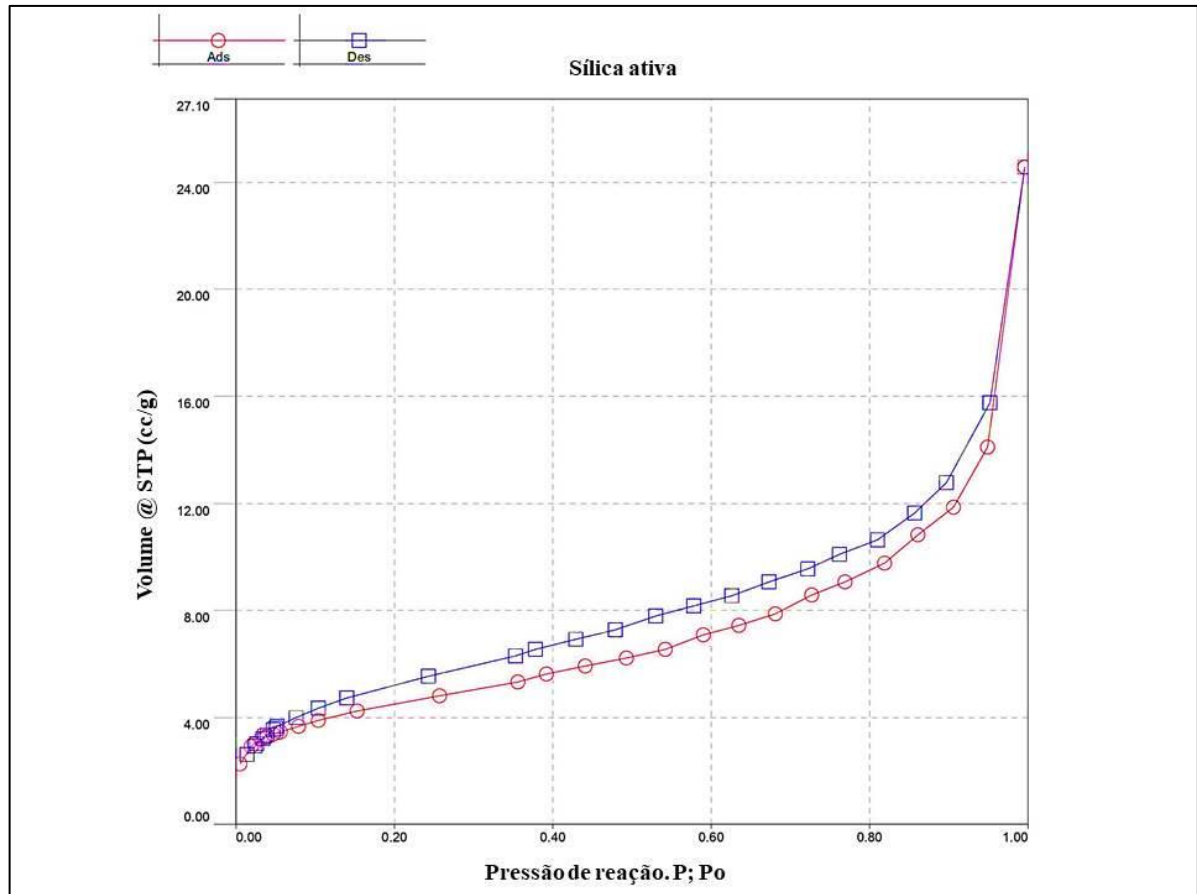


Figura 5– Curvas de desorção e adsorção da análise de área superficial específica da Sílica ativa.

Tabela 8 – Dados da BET análise da sílica ativa

Equipamento	Tipo de Gás	Tempo de análise	Área Superficial Específica
		min	m ² /g
Qcdata	Nitrogênio	196,6	15,270

QCdata – Quantachrome Instruments Optimizing particle performance; as análises foram feitas nos laboratórios do DPS – UFV.

A areia de quartzo, material compacto, de estrutura muito estável, tem sua reatividade química dependente da quantidade de Si livre em sua superfície e também de seu diâmetro.

A análise de área superficial específica indica pequena área superficial (Tabela 9), apesar da areia de quartzo ter sido triturado a dimensões equivalentes a da sílica ativa, confirmando sua baixa reatividade pelas curvas de desorção e adsorção expressas na Figura 6. As isotermas apresentadas na análise da areia de quartzo são representações características de adsorventes não porosos. A inferência de menor porosidade da areia de quartzo não é muito desejável ao ambiente solo no tocante à conservação de água.

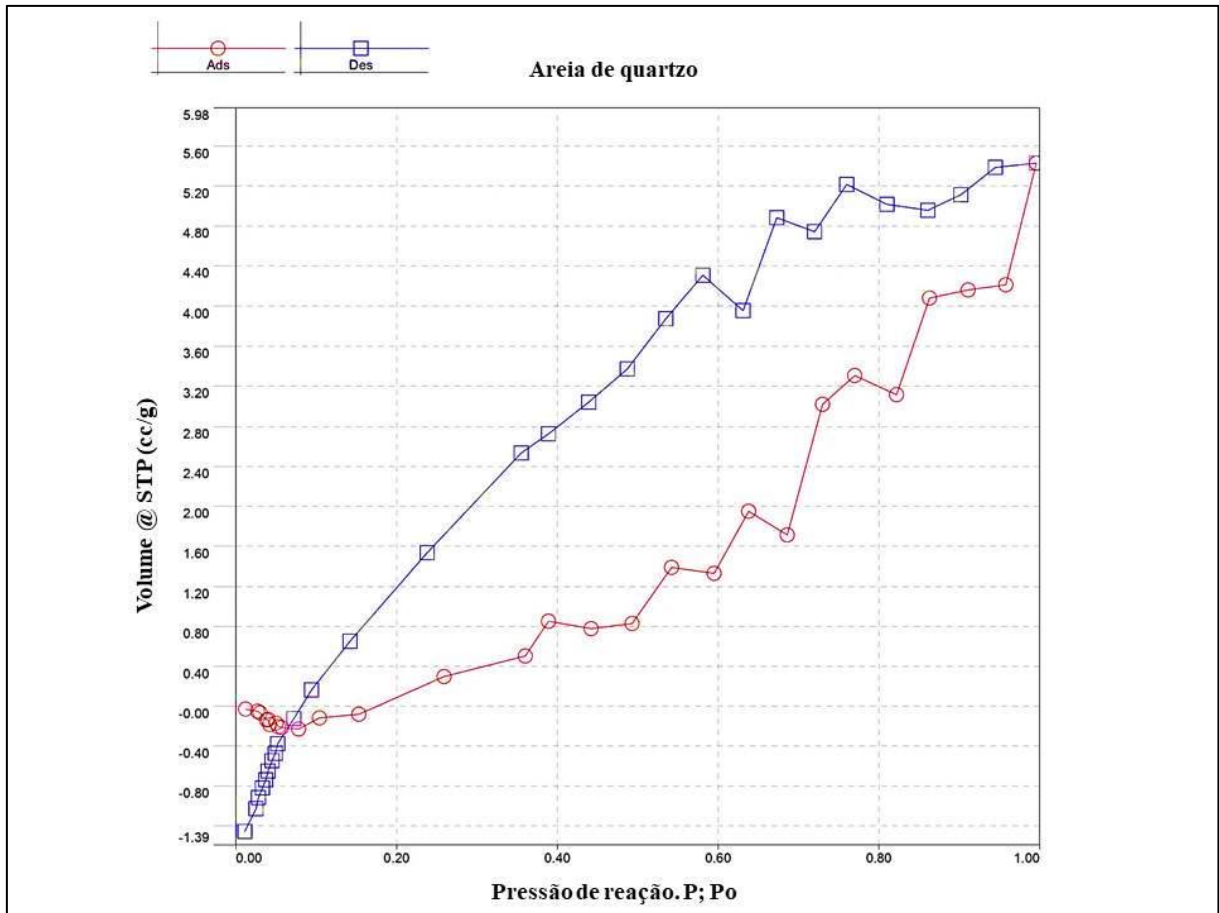


Figura 6 - Curvas de desorção e adsorção da análise de área superficial específica da Areia de quartzo.

Tabela 9 – Dados da BET análise da Areia de quartzo

Equipamento	Tipo de Gás	Tempo de análise	Área superficial específica
		mim	m ² /g
Qcdata	Nitrogênio	201,1	1,298

QCdata – Quantachrome Instruments Optimizing particle performance; as análises foram feitas nos laboratórios do DPS – UFV.

Segundo (PEREIRA , NEVES, *et al.*, 2017) (CARMO, 2006) que escreveram a respeito da sílica ativa e areia de quartzo o fizeram descrevendo em seus trabalhos de pesquisa sobre as reações pozolânicas e álcali. Ambas com alta reatividade e eficiência de resultado, uma vez que acontecem em meio alcalino devido a reação com o Hidróxido de Cálcio (Ca(OH)₂), meio em que o Si da sílica ativa e quartzo possuem alguma solubilidade ficando livre e propício a ligações químicas. Sendo a sílica ativa um material pozolânico, a reação é chamada pozolânica e a areia de quartzo material inerte natural, a reação é denominada álcali. A solubilidade dos materiais foi descrita no ensaio de solubilidade destes.

3.9. Solubilidade em Hidróxido de Sódio

Os valores das concentrações de Si para os materiais sílica ativa e areia de quartzo foram expressos em mg/L (Tabela 10).

Tabela 10 – Dados da solubilização em NaOH

R	H ₂ O			[NaOH]																	
				0,01			0,02			0,1			0,5			1,0			2,0		
				mol/L																	
				mg/L																	
SA	80	80	102	229	250	232	308	341	379	453	462	453	585	717	746	1124	1072	1247	1696	1604	1742
AQ	23	34	36	49	42	44	38	42	43	22	16	16	16	17	19	29	20	19	14	17	15

R- Tipo de reagente – água - H₂O e Hidróxido de sódio NaOH expresso em mol/L; A – amostras expresso em mg/L; SA – Sílica ativa; AQ – Areia de quartzo.

Os resultados das solubilizações da sílica ativa e da areia de quartzo foram comparados em gráfico e, comprovam a relação direta do aumento das concentrações de NaOH, bem como a diferença de solubilidade dos dois materiais (Figura 7).

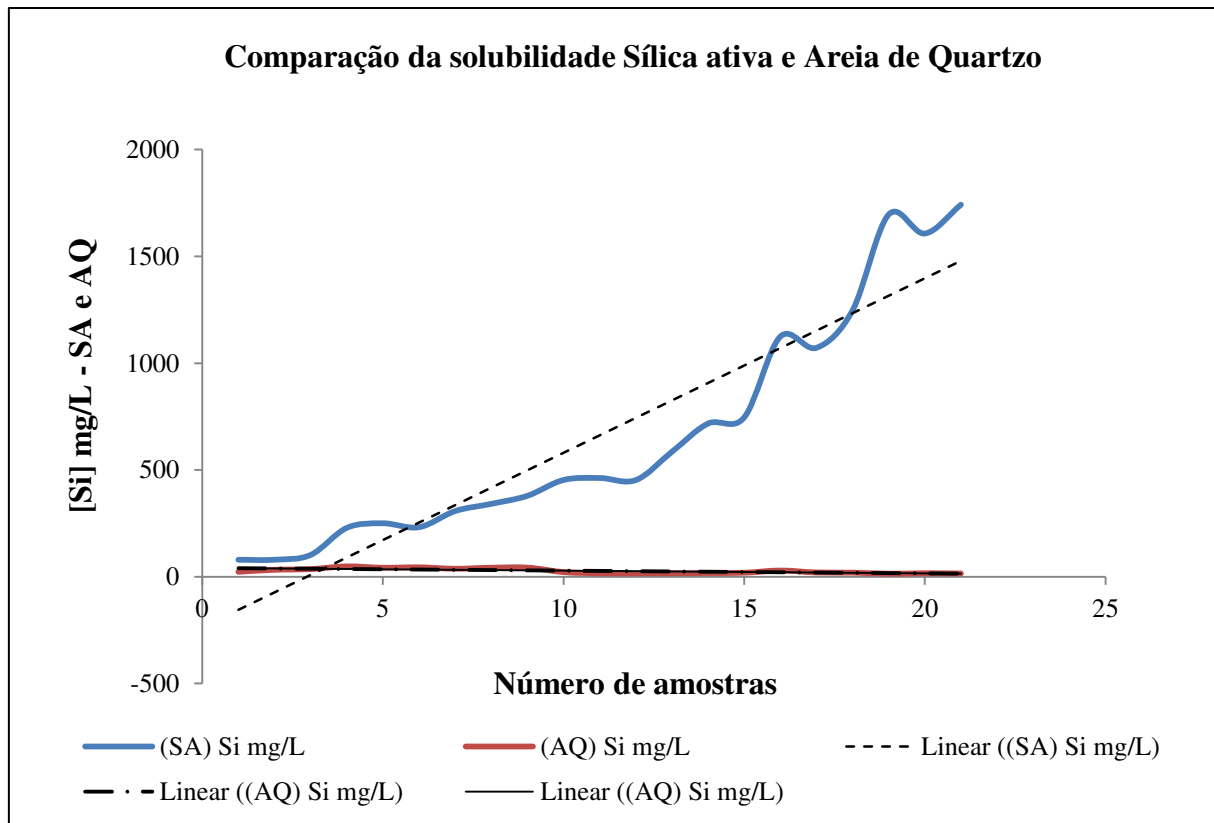


Figura 7 – Solubilidade dos materiais sílica ativa e areia de quartzo.

Os resultados comprovam as análises de área superficial específica e mostram que a sílica ativa ao ter maior exposição superficial ao reagente, mostrou-se com maior capacidade

reativa quando comparado a areia de quartzo (material cristalino). Os resultados também mostram que a sílica ativa teve maior solubilidade em água e, solubilidade crescente com o aumento da concentração de NaOH, demonstrando que mesmo em níveis mais altos de pH a solubilidade é grande em comparação com a areia de quartzo, fator primordial para o uso da sílica ativa como bloqueador do P, pois no solo mesmo em diferentes níveis de pH a sílica ativa fornecerá Si solúvel à solução do solo, aumentando a competição com o P pelos sítios de adsorção no solo. A areia de quartzo responde diferentemente, apresentando menor solubilidade em água que a sílica ativa e, sua solubilidade é maior na concentração de NaOH 0,01 mol/L, diminuindo com o aumento das concentrações das soluções de NaOH. A sílica ativa é um material muito fino, portanto a areia de quartzo foi moída até atingir a mesma granulometria, a fim de demonstrar as diferenças das interações físicas e químicas dos materiais, apesar de terem a mesma composição química. As concentrações de Si solubilizadas no procedimento com NaOH foram determinadas em equipamento de espectrometria de absorção atômica.

3.10. Difratometria de Raios-X

Nas análises de difratometria de raios-X, a sílica ativa, mostra uma configuração do SiO₂ amorfa. Essa característica somada à alta área superficial específica confirma ser a sílica ativa um material de alta reatividade. A areia de quartzo, um material cristalino e compacto, sob o aspecto mineralógico, apesar de possuir a mesma composição química, seu difratograma, apresenta dois picos de SiO₂, característicos de quartzo. Essas características para definição de alta e baixa reatividade também se confirmam nos ensaios de solubilização em H₂O e em NaOH, onde a sílica ativa mostrou-se muito mais solúvel em contato com estes reagentes, quando comparados com a areia de quartzo. Nos difratogramas nota-se uma destacada diferença dos materiais sílica ativa (Figura 8) e areia de quartzo (Figura 9).

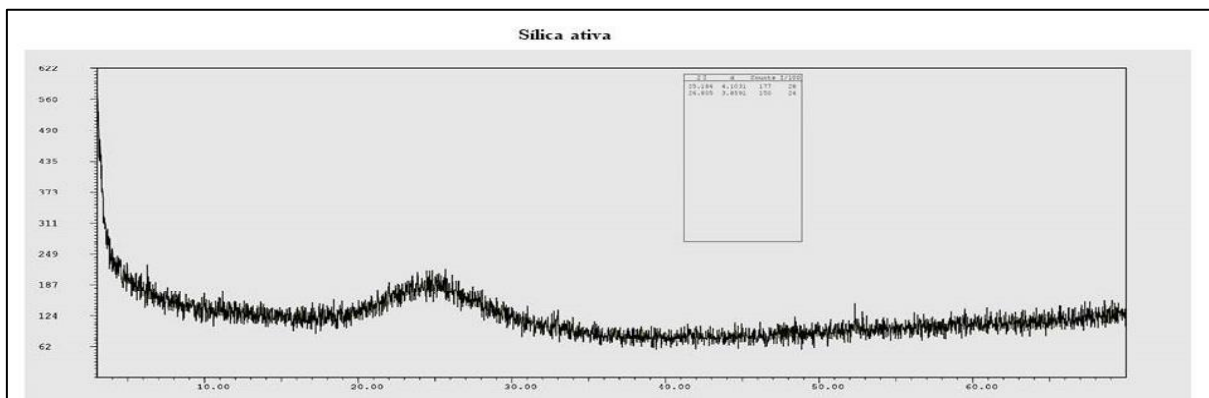


Figura 8 – Difrátograma de Raios X (DRX) do material sílica ativa

A sílica ativa apresenta traços que se assemelham a gráficos de ruídos sonoros, e a presença de um alo bastante aberto, ao qual denomina-se “alo amorfo”.

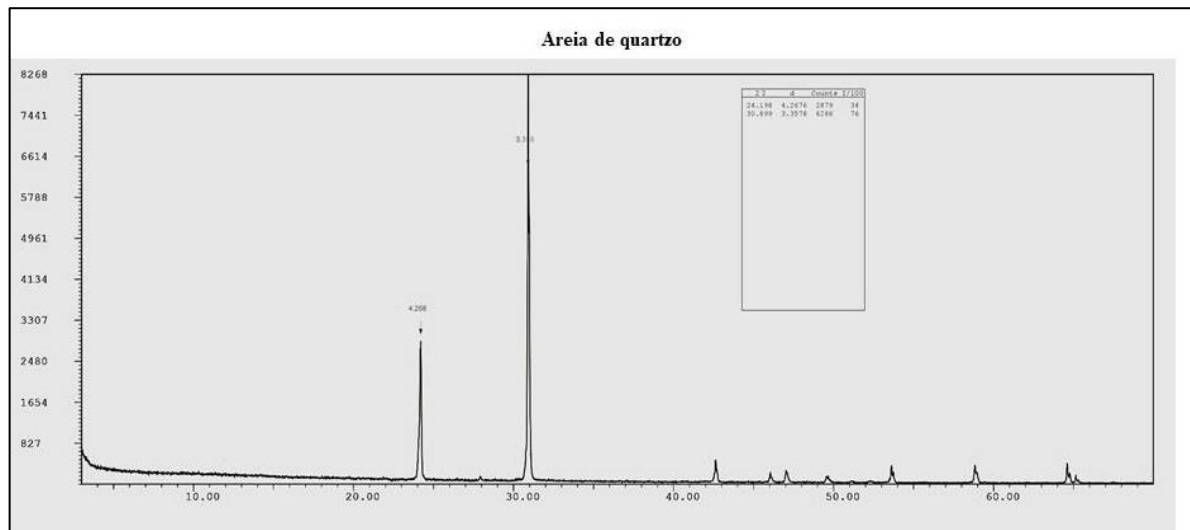


Figura 9 – Difratograma de Raios X (DRX) do material areia de quartzo

No gráfico da areia de quartzo, o traço é uma linha contínua e bem definida com a presença de dois picos, sem a formação de alos abertos e cujas amplitudes o classificam mineralogicamente como quartzo.

4. CONCLUSÕES

Após as análises físico-químicas comparativas para a sílica ativa e areia de quartzo, conclui-se que: a sílica ativa apresenta-se como um material amorfo, com alta pureza na ordem de 97% verificado na análise de fluorescência de raios X. Em função do resultado da determinação da porosidade total, pode-se inferir a possibilidade de ser um material muito poroso, propriedade que permite a retenção de água disponível na ordem de 67,23% do seu peso, 23,30 vezes maior que a areia de quartzo, fatores determinados respectivamente pelo método da câmara de Richards e equivalente de umidade pelo método da centrífuga. A sílica ativa possui também ótima solubilidade em H₂O e em NaOH mostrando-se crescente mesmo em índices de pH mais altos (alcalinos), somados a uma alta área superficial específica na ordem de 15,270 m².g⁻¹, possibilitando ótima afinidade com reagentes, resultados que caracterizam ser este um material de alta reatividade, conferindo-lhe uma boa possibilidade de formação de outros compostos quando em contato com outros elementos, mas principalmente no tocante à sua possível adsorção a partículas de argila do solo que poderá lhe conferir a propriedade de bloqueador da adsorção do fosfato no solo e também como condicionador de solo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AQUINO, I. B. D. M. et al. Análise da solubilidade da sílica cristalina em meio a soluções de hidróxido de sódio. **Congresso Técnico da Engenharia e da Agronomia**, Foz do Iguaçu, I, n. 1, 29 agosto 2016. 4.
- CAMARGO, O. A. D. et al. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. 1ª. ed. Campinas: IAC, v. I, 1986. 69-70 p. ISBN 0100-3100. Boletim técnico do Instituto Agrônomo de Campinas.
- CARMO, J. B. M. D. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos de sílica ativa e metacaulim face a resistência mecânica e à viabilidade econômica**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, v. I, 2006. 23-37 p.
- COSTA, M. D. G. A. et al. **Mineralogia e mapeamento de solos desenvolvido de rochas pelíticas em Curvelo MG**. 1ª. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, v. I, 2009. 115 p.
- GASIK, M. **Handbook Ferroalloys**. 1ª. ed. Aalto: Butterworth-Heinemann, v. I, 2013. 536 p. ISBN 9780080977539.
- GONÇALVES, G. D. S. **Otimização da resistência á compressão de pastas cimentícias com superdosagem de aditivo dispersante e adição de sílicas ativa e sol-gel**. 1ª. ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, v. I, 2018. 73-74 p. Dissertação de Mestrado.
- GUERRA, R. S. D. T. O que é microsílca e microsílca ativa. **Clube do concreto**, 28 novembro 2013. ISSN 0. Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/11/o-que-e-microsilica-e-microsilica-ativa.html>>. Acesso em: 01 janeiro 2020.
- HECK, N. C. **Metalurgia Extrativa dos metais não-ferrosos**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, v. I, 2007. 25-30 p. ISBN 0.
- LUDKE, C. **A ROTA METALÚRGICA DO SILÍCIO: DA EXTRAÇÃO DO QUARTZO À OBTENÇÃO DO SILÍCIO DE GRAU FOTOVOLTAICO**. 1ª. ed. Araranguá: Universidade Federal de Santa Catarina, v. I, 2018. 77 p.
- LUZ, A. B. D.; LINS, F. **Rochas e minerais industriais - usos e especificações**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: CETEM - , v. I, 2008. 107 p. ISBN 978-85-61121-37-2. pesquisa no Capítulo 5 - Área industrial.
- PEREIRA, M. et al. Avaliação da reatividade potencial de rochas utilizadas como agregados na construção civil no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Matéria**, Canoas, v. XXIII, n. III, p. 1-10, 18 Setembro 2017. ISSN 1517-7076.
- REIS, D. C. N. D. S. P. **Importância do estudo da área superficial específica e porosidade do Estearato de magnésio para o setor farmacêutico**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Fiocruz, v. I, 2013. 71 p.

SÁ, M. A. C. D.; VIANA, J. H. M. Retenção de água do solo pelo método da centrífuga. In: SOLOS, E. B. D. P. A.- **Manual de métodos de análise de solos**. 3ª. ed. Brasília: EMBRAPA, v. I, 2017. Cap. 6, p. 53-64.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. D. **Tratamento de Minerais**: práticas laboratoriais. [S.l.]: CETEM/MCT, v. 1, 2007.

SANTOS, L. R. S. et al. A UTILIZAÇÃO DE AGLOMERANTE QUÍMICO NA COMPOSIÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO. **VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação - CONNEPI**, Bahia, v. I, n. 1, p. 1-8, Agosto 2013. ISSN 0.

SOUZA, A. E. D.; FONSECA, D. S. Agência Nacional de Mineração. **Site da Agencia Nacional de Mineração**, 14 jun 2017. ISSN ISBN. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-2-fosfato>>. Acesso em: 14 ago 2019. Não consta ISBN.

SOUZA, G. T.; GOUVEIA, F. P.; CUNHA, R. R. Estudo da aplicação do resíduo da produção de silício metálico como adição mineral na produção de cimento AÇAÏ. **Revista de Engenharia Civil**, Tucuruí, v. 55, n. 1, p. 29-35, 03 julho 2018.

SOUZA, L. M. T.; COSTA, L. M.; FILHO, E. I. F. **Modelagem de processos erosivos em áreas de contato geológicos no Alto Paranaíba**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, v. I, 2017. 144 p.

SUZUKI, C. K.; PEREIRA, J. T. V. Energia solar e produção de silício metálico baseado no programa QITS("Quartz Industrial Trade System"). **ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**, Campinas, v. 3, 2000. Disponível em: <>. Acesso em: 01 janeiro 2020..

TEIXEIRA, R. C. et al. Quantificação química em perfis de antropossolos por fluorescência de raios X com vistas a identificação de descontinuidades de camadas. **Quaternary and Environmental Geosciences**, Viçosa, v. 10, n. 1/2, p. 10-17, out. 2019.

TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B. Retenção de água no solo pelos métodos da Mesa de tensão e da Câmara de Richards. In: SOLOS, E. B. D. P. A.- **Manual de métodos de análise de solos**. 3ª. ed. Brasília: EMBRAPA, v. I, 2017. Cap. 4, p. 33-46. ISBN 978-85-7035-771-7.

VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade de partículas. In: SOLOS, E. B. D. P. A.- **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3ª. ed. Brasília: EMBRAPA, v. I, 2017. Cap. 8, p. 76-81. ISBN 978-85-7035-771-7.

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO DO USO DO RESÍDUO SÍLICA ATIVA COMO BLOQUEADOR DO FOSFATO NOS SOLOS ALTAMENTE INTEMPERIZADOS

RESUMO

Os elementos Si e P possuem dinâmica comum no solo, pois ambos são adsorvidos pelos óxidos de Fe e Al na fração argila. Silício pode deslocar P adsorvido das superfícies oxídicas obtendo com essa interação, a aplicação de dosagens menores de adubação fosfatada no solo, reduzindo o custo da produção vegetal de alimentos. A aplicação de Si torna-se importante, não somente para promover o efeito como bloqueador da adsorção do P, mas também promover a ressilificação dos solos altamente intemperizados, que tiveram esse elemento perdido no desenvolvimento pedogenético desses solos. Há a estimativa que nos últimos 50 anos, desde o início da utilização de P na agricultura brasileira, 32,8 milhões de toneladas de fósforo estejam adsorvidos ao solo e indisponíveis para as plantas cultivadas. Estima-se que até 2050 este resíduo de fósforo retido por adsorção aos solos altamente intemperizados, alcance valores próximos a 105 milhões de toneladas. Devido ao desenvolvimento de manejos cada vez mais eficientes, a agricultura brasileira se adaptou e desenvolveu a capacidade de trabalhar duas a três safras por ano numa mesma área. Cada uma dessas safras gera a necessidade de aplicação de mais fertilizante inorgânico sendo o fósforo elemento vital para a saúde, vigor das plantas para a produção de alimentos. Cerca de 60% do volume de P utilizado na produção de fertilizantes são importados. Este trabalho propôs como estratégia alternativa de manejo para reduzir o uso do P importado e usar de forma mais eficiente o P, avaliar o bloqueio da adsorção do P nos solos oxídicos ácidos, através da introdução da forma amorfa do resíduo siderúrgico sílica ativa, material amorfo de alta pureza na ordem de 98%, testando quais as melhores doses a serem aplicadas ao solo, bem como mensurando as respostas da adsorção do Si bloqueando a adsorção do P, ação importante para tornar a agricultura brasileira mais sustentável no futuro. Os solos utilizados para realização deste trabalho, os Latossolos oxídicos ácidos, com alta capacidade de adsorção de P foram coletados de duas diferentes regiões, um Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf) e um Latossolo Vermelho Perférrico típico (LVj). O experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado, com 3 repetições, no fatorial 2 x 10 x 2. Foram verificadas respostas positivas para o efeito do bloqueio da adsorção de P pelo Si da sílica ativa. Na forma de aplicação seca, o LVwf respondeu positivamente ao efeito de bloqueio da adsorção do P pelo Si da sílica ativa, com um aumento de 36,46% do teor de P remanescente e, 8,64% de redução

da capacidade máxima de adsorção do P. Para um LVj o aumento do teor de P remanescente foi de 19,89% e 4,87% de redução da capacidade máxima de adsorção do P. Na forma de aplicação em suspensão, o LVwf também resultou respostas positivas ao efeito do bloqueio da adsorção do P pelo Si da sílica ativa, 72,56% de aumento do P remanescente e 63,50% de redução da capacidade máxima de adsorção do P. Para um LVj o aumento do teor de P remanescente foi da ordem de 45,83% e 15,75% de redução da capacidade máxima de adsorção do P.

Palavra Chave: Fósforo. Adsorção do fósforo. Bloqueador da Adsorção do fosfato.

ABSTRACT: EVALUATION OF THE USE OF ACTIVE SILICA WASTE AS A PHOSPHATE BLOCKER IN HIGHLY WEATHERED SOILS

The elements Si and P have common dynamics in the soil, as both are adsorbed by Fe and Al oxides in the clay fraction. Silicon can displace adsorbed P from oxidic surfaces, obtaining, with this interaction, the application of lower doses of phosphate fertilizer in the soil, reducing the cost of vegetable food production. The application of Si becomes important, not only to promote the effect as a blocker of P adsorption, but also to promote the resilification of highly weathered soils, which had this element lost in the pedogenetic development of these soils. It is estimated that in the last 50 years, since the beginning of the use of P in Brazilian agriculture, 32.8 million tons of phosphorus are adsorbed to the soil and unavailable to cultivated plants. It is estimated that by 2050 this phosphorus residue retained by adsorption to highly weathered soils will reach values close to 105 million tons. Due to the development of increasingly efficient managements, Brazilian agriculture has adapted and developed the ability to work two to three crops a year in the same area. Each of these crops generates the need to apply more inorganic fertilizer, phosphorus being a vital element for health, vigor of plants for food production. About 60% of the volume of P used in the production of fertilizers is imported. This work proposed as an alternative management strategy to reduce the use of imported P and to use P more efficiently, to evaluate the blocking of P adsorption in the acidic oxide soils, by introducing the amorphous form of the silica active steel residue, amorphous material high purity in the order of 98%, testing which are the best doses to be applied to the soil, as well as measuring the adsorption responses of Si blocking the adsorption of P, an important action to make Brazilian agriculture more sustainable in the future. The soils used for this work, the oxic acid oxisols, with high P adsorption capacity, were collected from two different regions, a typical Red Acriferic Latosol (LVwf) and a typical Peripheral Red Latosol (LVj). The experiment was set up in a completely randomized design, with 3 replications, in a 2 x 10 x 2 factorial. Positive responses were verified for the effect of blocking the P adsorption by Si of the active silica. In the dry application form, LVwf responded positively to the blocking effect of P adsorption by Si from active silica, with a 36.46% increase in the remaining P content and an 8.64% reduction in maximum adsorption capacity. of P. For an LVj the increase in the remaining P content was 19.89% and 4.87% of reduction in the maximum adsorption capacity of P. In the form of suspension application, LVwf also resulted in positive responses to the effect of blockage of P adsorption by Si from active silica, 72.56% increase in the remaining P and 63.50% reduction in the maximum P adsorption capacity. For

an LVj the increase in the remaining P content was in the order of 45 , 83% and 15.75% reduction in the maximum P. adsorption capacity.

Keywords: Phosphorus. Phosphorus adsorption. Phosphate adsorption blocker.

1. INTRODUÇÃO

Em países situados nas faixas tropicais onde as temperaturas são mais elevadas, alta pluviosidade e conseqüentemente maior atividade biológica, há uma intensa ação do intemperismo químico. Minerais primários sob a ação deste intenso intemperismo químico resultam em solos com maior frequência de minerais secundários. Nestas condições, em áreas sob influência do clima tropical, ocorre a predominância de solos muito intemperizados, de baixa fertilidade, oxídicos com altos teores de óxidos de ferro e alumínio, caulíníticos possuindo atributos morfológicos, químicos, propriedades físicas e propriedades hídricas bastante heterogêneas (ZARONI, SANTOS e CLEMENTE, 2005).

O Brasil tem quase toda sua área territorial localizada dentro da faixa que determina a zona tropical do hemisfério sul, que compreende aproximadamente da latitude 5 graus Norte até aproximadamente 23,5 graus ao Sul do equador (ALMEIDA, ZARONI e SANTOS, 2005).

Segundo a classificação de solos utilizada pela Embrapa, quatorze são as classes de solos classificados no Brasil, sendo que as classes mais importantes são os latossolos, que se desenvolvem sobre todos os tipos de rocha e são os mais importantes em termos de extensão ocupada. São solos que variam de coloração sendo que estas variações vão do amarelo, vermelho-amarelo, vermelho e vermelho escuro. Latossolos são solos muito desenvolvidos, profundos, com horizonte A podendo chegar a mais de dois metros, possuindo baixa capacidade de troca de cátions (CTC), presença de argila de baixa atividade, com alta concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, característicos de regiões de clima tropical úmido e semiúmido e aparecem em áreas planas e levemente onduladas (BRANCO, 2014).

Os solos altamente intemperizados (SAI), cujo desenvolvimento está mais relacionado a transformação e remoção, sobrando resíduos pouco solúveis, compostos de um material com alto grau de intemperização, apresentam pouca capacidade de reter cátions fator preponderante ao suporte da atividade agrícola economicamente viável. Os SAI possuem quatro classificações taxonômicas, os solos vérticos, ândicos, hísticos e átricos, sendo esta última classificação taxonômica a escolhida para a realização deste trabalho (MELO e ALLEONI, 2009).

No Brasil as regiões na faixa de clima tropical úmido e semiúmido têm solos com máximo acúmulo de minerais oxídicos, os denominados solos átricos. Estão localizados em áreas de intensiva atividade agrícola. Átrico, do grego *akros*, que significa “na ponta”, “no fim”, ou seja, solo que sofreu intenso processo de intemperismo. Estes solos apresentam

horizontes ácricos com carga líquida positiva, ou seja, maior capacidade de troca de ânions (CTA) que capacidade de troca de cátions (CTC). A perda de sílica é intensa e muito importante no processo de intemperismo e desenvolvimento dos solos ácricos, promovendo o acúmulo de óxidos de Fe (goethita e hematita) e óxidos de Al (gibbsita) e também caulinita, resultando em índice Kr (índice de intemperismo do solo pela relação sílica/óxido de ferro + óxido de alumínio) menor que 0,75 (MELO e ALLEONI, 2009).

No município de Lagoa Formosa no estado de Minas Gerais, os SAI (Latosolos Vermelhos, Cambissolos Háplicos e Neossolos Litólicos) foram desenvolvidos em materiais originários de rochas metassedimentares neoproterozoicas do Grupo Bambuí, sedimentares do Grupo Areado, vulcânicas do Grupo Mata da Corda e cobertura parcialmente laterizadas cenozoicas areno-argilosas e, cada um desses solos proporcionam usos e ocupações diferentes no município. Em função da predominância de terrenos planos houve o desenvolvimento de solos muito profundos, ou seja, com fertilidade variada em função do material de origem. O uso e ocupação desses terrenos planos, estão fortemente ligados à prática da agricultura sobre um Latossolo Vermelho que apresenta baixos índices de Ki (índice de intemperismo do solo pela relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) e Kr, indicando ser solo com alto teor de óxidos de ferro, ou seja, oxídicos ácricos (SOUZA, 2017).

O ferro tanto em suas formas bivalente (Fe^{2+}) e trivalente (Fe^{3+}) têm a capacidade de formar compostos estáveis. Mesmo em pequenas quantidades, quando na forma de óxidos e hidróxidos, o ferro influencia atributos físicos e químicos no solo, tais como a cor, cimentação de partículas e cargas dependentes de pH. A presença de óxidos e hidróxidos de ferro em altas concentrações, a dessilificação devido ao clima tropical úmido, imprime ao solos altamente intemperizados, um índice baixo de Kr, favorecendo a adsorção de ânions.

A classificação de solos no Brasil, já considerava a influência das concentrações de ferro, como determinador da coloração destes, atribuindo denominações como Roxos, Vermelhos ou Amarelos. Posteriormente, também devido a este atributo químico, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) criou uma subdivisão no terceiro nível categórico em função da concentração dos teores de ferro, separando os solos em Hipoférricos, mesoférricos, férricos e perférricos. No Brasil duas regiões destacam-se pela grande ocorrência dos solos perférricos, o Quadrilátero ferrífero, com Itabiritos e Itabiritos dolomíticos do paleoproterozóico e a Serra dos Carajás com Jaspelitos do neoarqueano. O solo perférrico do Quadrilátero ferrífero foi utilizado devido à sua característica oxídica ácrica (MACHADO, 2018).

As reações de adsorção que ocorrem em componentes que possuem elevada superfície específica. Dois tipos são identificados, os íons indiferentes que adsorvem quando há carga superficial e os íons transferidores de carga promovendo a desprotonação e protonação da superfície dos grupos funcionais com adição de H^+ ou OH^- , o que alteram suas características adsorptivas. Outros íons também podem ser transferidores de carga. Neste trabalho, avaliou-se o efeito da adsorção de ânions, mais especificamente Si e P (MELO e ALLEONI, 2009).

A adsorção de P e do Si no solo ocorre nas interfaces, quimicamente e até mesmo fisicamente, em superfícies chamadas de adsorventes com íons fosfato e silicato, os adsorvatos. A disponibilidade do P, inicialmente adsorvido nas superfícies de agregados, e posteriormente difundido para o interior destes, os quais possuem uma grande quantidade de microporos, torna a disponibilidade desse íon ainda mais difícil, ou seja, aumenta a retenção, que é a soma da adsorção e penetração (NOVAIS, ALVAREZ V., *et al.*, 2007).

Os latossolos oxídicos ácricos apresentam fertilidade natural muito baixa de elementos nutricionais importantes para a produção vegetal, sendo um dos principais o P, apresentando concentrações disponíveis muito baixas e, limitantes para o desenvolvimento de todas as culturas cultivadas nestes solos. A disponibilidade desse nutriente é ainda mais agravada, pois o P é facilmente adsorvido nos minerais de argila do tipo 1:1, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, dificultando o manejo da adubação fosfatada transformando essa ação em um verdadeiro desafio.

Outro elemento nutriente é o Si, que mesmo sendo considerado como essencial recentemente, sabe-se que para culturas principalmente a do arroz e da cana-de-açúcar tem efeito muito benéfico e influencia na produtividade, assim como o P. A adsorção do Si ocorre envolvendo sesquióxidos presentes em solos tropicais. Em suas formas solúveis e, facilmente aproveitáveis pelas plantas e adsorvidos pelos SAI, apresentam-se no solo o ácido monossilícico (H_4SiO_4), sílicas biogênicas, silício estrutural em minerais silicatados. Outras substâncias não silicosas no solo são capazes de adsorver o Si sendo elas os óxidos de Fe, Al e Mg, com mais eficiência de adsorção e com menor eficiência de adsorção do Si, os alcalinos terrosos (BRAIT, 2008).

Os elementos Si e P possuem dinâmica comum no solo, pois ambos são adsorvidos pelos óxidos de Fe e Al na fração argila, onde o silício pode deslocar P adsorvido das superfícies oxídicas, obtendo com essa interação, a aplicação de dosagens menores de adubação fosfatada no solo, reduzindo o custo da produção vegetal de alimentos e salientando a importância da aplicação de Si, não somente como bloqueador da adsorção do P, mas

também na ressificação dos SAI, que tiveram esse elemento perdido no desenvolvimento pedogenético desses solos. (BRAIT, 2008).

Os SAI's têm sua fertilidade limitada em função da baixa disponibilidade do P, tema muito discutido pelos estudiosos em ciências do solo, pois constitui um desafio no manejo agrônomico e econômico da fertilidade do solo. Trabalhar a eficiência da adubação fosfatada na agricultura é um grande desafio, especialmente devido ao fenômeno da adsorção do P na solução do solo por argilas do tipo 1:1, óxidos e hidróxidos de Fe e Al, pois uma grande parte do P fornecido na adubação fosfatada fica "retida", fazendo com que uma grande quantidade de fosfato seja aplicada, para viabilizar a produção agrícola (ALCARDE, 1992) (RESENDE e NETO, 2007).

Nos anos de 1960 iniciaram-se na agricultura brasileira, as aplicações de fósforo na forma de fertilizantes fosfatados e, estudo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA aponta que aproximadamente 46 milhões de toneladas de fósforo foram aplicadas desde então nos últimos 50 anos. O problema está no fato de o Brasil ter suas terras agricultáveis na forma de solos altamente intemperizados, o que favorece a adsorção do fósforo às partículas destes solos. A estimativa é que, 32,8 milhões de toneladas de fósforo estão adsorvidos ao solo e indisponíveis para as plantas cultivadas, podendo estimar que até 2050 este resíduo de fósforo retido por adsorção aos SAI's alcance valores próximos a 105 milhões de toneladas, considerando a expectativa de expansão da agricultura brasileira (DIAS, 2018).

De acordo com (COSTA, TRONTO, *et al.*, 2010) o silício tem símbolo Si, número atômico 14, massa atômica 28,08; pode ser encontrado na tabela periódica na posição dos elementos do Grupo 14/IV e no terceiro período. O fósforo com símbolo P, tem número atômico 15, massa atômica 30,97, pode ser encontrado na tabela periódica na posição dos elementos do Grupo 15/V, também no terceiro período, Si classificados como semimetal e P como ametal.

A proximidade Si e P na tabela periódica apesar de não pertencerem à mesma classe, suas propriedades físicas e químicas conferem a estes elementos, dinâmicas semelhantes na solução do solo.

O silício apresenta-se na fase sólida do solo na forma de silicatos ou como óxidos e, na solução do solo na forma solúvel. A determinação dos teores desta última, tem importância para a compreensão de determinados fenômenos dos processos pedogenéticos, levando em consideração que dessificação é um dos principais aspectos do intemperismo químico dos

solos de clima tropical e também relevante para entender sua dinâmica no solo (OLIVEIRA, 1984).

O P um dos elementos constituintes de vários compostos orgânicos. É fundamental à vida animal e vegetal, pois, participa como constituinte de moléculas importantes como: ácidos nucleicos, fósfolipídeos, fosfatos de adenosina, dentre outros. É fundamental para o desenvolvimento normal das plantas, as quais precisam que este elemento esteja em sua forma assimilável, em quantidades adequadas e em equilíbrio com os demais elementos no solo, para que ocorra o ciclo produtivo completo. O P sofre influência do Si no solo, principalmente no aumento da absorção de P, aumento do transporte do P das raízes para a parte aérea das plantas, aumento da eficiência da utilização do P pelas plantas e correção do desbalanceamento de nutrientes. E a interação desses dois elementos no solo e nas plantas (OLIVEIRA, 1984).

As reações químicas de fixação aniônicas em que o ânion é capaz de formar um precipitado insolúvel com algum cátion trocável são denominadas adsorção química. Já a adsorção física se dá por ligações eletrostáticas, interações fracas de natureza física entre adsorvente e adsorvato. Esses dois processos estão envolvidos na adsorção do P e também do Si na solução do solo e, dependentes das áreas superficiais dos minerais e das áreas disponíveis dos grupamentos ativos para a adsorção (BAHIA FILHO, 1982).

A adsorção do fosfato é influenciada por vários fatores dos solos, existindo correlação entre adsorção máxima e teores de Al, Fe, matéria orgânica, cátions trocáveis, pH e argila.

Três são os grupos de reação que, fixam fosfato: adsorção, substituição isomórfica e precipitação. Mas nos solos a adsorção e a precipitação são os principais mecanismos de retenção do fósforo (LÓPEZ-HERNÁNDEZ e BURNHAM, 1974) (CAPUANI, 2017). Nos solos oxidicos o fósforo na forma inorgânica, seja de compostos naturais ou de fertilizantes aplicados, encontra-se ligado a óxidos e hidróxidos de Fe e Al e em solos com pH acima de 7,0, ligados a Ca e, dependente do pH, ou seja, quanto maior o pH menor adsorção máxima de P, no entanto compostos amorfos de alumínio adsorvem mais P do que compostos amorfos de Fe por unidade de peso. A proporção chega a ser da ordem de 160:1, ou seja, os óxidos de Al adsorvem 160 vezes mais que óxidos de Fe, destacando-se esse fenômeno em latossolos que apresentam fração argila com acúmulo de óxidos e muito pouco P disponível (CAPUANI, 2017). A adsorção de P ocorre nas superfícies dos minerais e, na precipitação deste na forma de fosfatos de baixa solubilidade com maior frequência com os óxidos e hidróxidos de Al e, com menor frequência com os óxidos e hidróxidos de Fe, comum em solos altamente intemperizados (CAPUANI, 2017).

A adsorção do P também sofre influência da Matéria Orgânica do Solo (MOS), pois o caráter aniônico da MOS, processa-se positivamente diante de “pontes” de cátions metálicos Fe e Al entre MOS e ânion fosfato.

Altos teores de P também podem estar associados aos óxidos de Fe que encontram-se ligados a compostos orgânicos, assim como a dinâmica do P no solo associa-se a fatores de caráter ambiental que controlam a atividade microbiana, que imobilizam ou liberam íons ortofosfato, assim como as propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo. Em solos altamente intemperizados há a predominância de formas inorgânicas ligadas com alta energia à fração mineral e às formas orgânicas estabilizadas físico-quimicamente, que de acordo com o grau de estabilidade são conhecidas como formas lábeis e formas não lábeis. Considera-se como lábeis o conjunto de compostos fosfatados, que são rapidamente repostos à solução do solo ao serem absorvidos pelas plantas. As frações lábeis da solução do solo mostram-se dependentes da mineralogia, do grau de intemperismo dos solos, da textura, da quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo, das características físico-químicas, da atividade da biota do solo e da vegetação predominante. Os fosfatos são transformados geoquimicamente e biologicamente em formas orgânicas e inorgânicas estáveis, transferindo o P para os compartimentos do ambiente (CARVALHO, 2014) (WALKER e SYERS, 1976).

O fósforo é absorvido pelas plantas na forma de íon fosfato (H_2PO_4^-) mas, de acordo com a natureza do composto a que está ligado o fósforo no solo, este poderá estar na forma de fósforo inorgânico e fósforo orgânico. O fósforo inorgânico poderá ocorrer no solo em solução disponível, adsorvido às superfícies dos minerais da fração argila e precipitado com os óxidos de Fe e Al. As formas precipitadas e adsorvidas, normalmente costumam estar em equilíbrio com a solução do solo, compondo a fração lábil de fósforo no solo, sendo a fração não-lábil os compostos de baixa solubilidade, ou seja, as formas de fósforo mineralogicamente estáveis ou adsorvidos às partículas de solo e que não se encontram equilibradas de forma imediata ao fósforo em solução (NOVAIS e SMYTH, 1999).

Segundo (SANYAL e DE DATTA, 1991), o P nos solos altamente intemperizados, apresenta predominância de formas inorgânicas adsorvidas em minerais de argila e sesquióxidos de Fe e Al e, também as formas associadas à MOS como parte integrante desta. Os autores também mencionam a ocorrência da adsorção do fosfato aos óxidos de Fe e Al nas formas de baixa cristalinidade e grande desbalanceamento de cargas. De acordo com (RHEINHEIMER, ANGHINONI e KAMINSKI, 2000), nos denominados sítios ácidos de Lewis, a adsorção ocorre nos grupos $-\text{OH}$ e $-\text{OH}^{2+}$ ligados monocoordenadamente a metal Fe

e Al, nos quais ocorrem a troca pelo fosfato, processo de troca de ligantes, ligações estas que possuem alta estabilidade, promovendo ao fosfato uma solubilidade reduzida.

Considerando a dinâmica e biodisponibilidade, de 20% a 80% do fósforo total nos solos tropicais estão em sua forma orgânica e são fontes de fósforo às plantas.

Algumas das principais formas já identificadas são: fosfolipídios, ácidos nucleicos, ésteres fosfatos, fosfato de inositol, cuja estabilidade é dependente de sua natureza, bem como sua interação com a fração mineral, os quais também são utilizados por microrganismos como fonte de carbono e elétrons, resultando na mineralização e disponibilização do P orgânico (CAPUANI, 2017).

Dependendo da forma com que o Si se encontra em solução, diversos fatores influenciam a adsorção deste. Devido a facilidade com que o Si reage com o Oxigênio, formam óxidos e são denominados silicatos. Apresentam-se na forma de dióxido de silício e diversos alumino silicatos. Quartzo, feldspato, plagioclásio e ortoclásio são algumas das formas cristalinas dos silicatos, minerais secundários ricos em silício argiloso, o caulim, a vermiculita, a esmectita e as formas amorfas formam o “esqueleto do solo”. No entanto para que o Si tenha eficiência no solo, principalmente nos processos de adsorção, onde o Si poderá competir com o P nos sítios de ligação e deixar P prontamente livre para as plantas, é necessário que tenha boa solubilidade. Três são os grupos de silício solúvel, ácidos monossilícicos, polissilícicos e organo-silícico, fracamente adsorvidos (MATICHENKOV e BOCHARNIKOVA, 2001).

Dentre materiais não naturais introduzidos ao solo neste trabalho, a sílica ativa apresenta-se como uma alternativa melhor que outras fontes de silicatos, devido à sua solubilidade em água.

Um material de baixa solubilidade pode ser descartável como fonte potencial, porque está sempre combinado com outros elementos e as fontes naturais são insolúveis (OLIVEIRA, 1984). Com a decomposição dos silicatos, o Si entra na solução do solo na forma de ácido silícico Si(OH)_4 , mas para que ocorra o pH precisa estar abaixo de 9,0 e a decomposição se dá por hidrólise (MCKEAGUE e CLINE, 1963) (MCPHAIL, PAGE e BINGHAM, 1972). No entanto a adsorção do ácido silícico é dependente do aumento de temperatura, redução do pH do solo e da natureza da superfície onde o Si irá se adsorver. (MCKEAGUE e CLINE, 1963), também afirmam que o carbonato é um influenciador da adsorção do Si e outros elementos. O silício adsorve mais nos óxidos e hidróxidos de alumínio que nos óxidos e hidróxidos de ferro e, também a adsorção do silício aumenta com o aumento da desorganização das estruturas minerais.

Determinados compostos inorgânicos podem competir com o P pelo mesmo sítio de adsorção e serem adsorvidos quimicamente pelas superfícies dos minerais, são eles os silicatos, molibdatos, sulfatos e outros. Neste trabalho avaliou-se uma forma amorfa de dióxido de silício (SiO_2) um silicato não natural, possuidora de determinada solubilidade em água e que foi introduzida ao solo com esta finalidade: bloquear a adsorção do fosfato pelos minerais, óxidos e hidróxidos de Fe e Al.

É muito comum a utilização de escórias de siderurgia trituradas muito finas, a fim de imprimir ao silício, principal componente destas escórias, certa solubilidade quando na solução do solo. Estas escórias, aplicadas ao solo tem uma boa concentração de Ca, Mg e outros elementos, assim a utilização destes silicatos têm a finalidade de fazer a correção de sua acidez, que além de aumentar o pH, podem também aumentar a disponibilidade de P para as plantas, deslocando P adsorvido para a solução do solo, ou bloqueando os sítios de adsorção pelos silicatos (RAIJ, 1981).

Dentre os ânions inorgânicos que produzem o aumento da disponibilidade de fósforo no solo, o silício é o que tem maior efetividade, também em camadas mais superficiais do solo, ocorre um efeito residual do silício no aumento da disponibilidade de fósforo (OLIVEIRA, 1984).

Ácido monossilícico interage naturalmente com fosfatos, uma reação de troca de ânions silicato e ânions fosfato, também ocorre devido a introdução de materiais silícicos ao solo, oriundos de produção siderúrgica, sendo estes dióxidos amorfos de silício ou silicatos, com a finalidade de aumentar a quantidade de fosfatos móveis no solo (MATICHENKOV e BOCHARNIKOVA, 2001).

Com o aumento da concentração de ácido monossilícico e sua adsorção por fosfato solúveis de Ca, Al, Férrico e Mg, e posteriormente a troca de ânions fosfato por ânions silicato, tendo como resultado final a dessorção do ânion fosfato para a solução do solo. Parte destes fosfatos móveis, volta a se adsorver em novas superfícies e parte permanece na solução do solo e disponível para as plantas (MATICHENKOV e BOCHARNIKOVA, 2001).

Devido à sua posição tropical e aos atributos dos SAI's favoráveis a agricultura, bem como, o desenvolvimento de manejos cada vez mais eficientes que proporcionam alta produtividade de alimentos, a agricultura brasileira se adaptou e desenvolveu a capacidade de trabalhar duas a três safras por ano numa mesma área, e a cada uma dessas safras gera a necessidade de aplicação de mais fertilizante inorgânico a base de NPK, de forma mais intensiva, pois o fósforo é elemento vital para a saúde e o vigor das plantas, sendo ao lado do

nitrogênio e potássio, um dos três elementos mais importantes para as plantas na produção de alimentos.

Há um importante debate a respeito da escassez do P. Com a expansão agrícola brasileira tem aumentado, a necessidade de fertilizantes inorgânicos, em especial as formulações fosfatadas, uma vez que os SAI's adsorvem o P, fazendo com que grandes quantidades sejam aplicadas com o objetivo de parar a rápida imobilização do P pelos óxidos de Fe e Al da fração argila. Como as reservas de P brasileiras são de origem ígnea, devido a baixa solubilidade das rochas fosfáticas, apenas uma pequena quantidade de P, de forma limitada, é fornecida, além do alto custo de processamento, 60% dos fertilizantes inorgânico usados na nossa agricultura são importados, e como as demandas pelo P são altas, nossa agricultura fica vulnerável à futura escassez deste recurso natural finito (WITHERS, RODRIGUES , *et al.*, 2018).

Este trabalho propôs como estratégia alternativa de manejo para reduzir o uso do P importado e usar de forma mais eficiente o P, avaliar o bloqueio da adsorção do P nos solos oxídicos ácidos, através da introdução da forma amorfa do resíduo siderúrgico sílica ativa, testando quais as melhores dosagens a serem aplicadas ao solo, bem como mensurando as respostas da adsorção do Si bloqueando a adsorção do P, ação importante para tornar a agricultura brasileira mais sustentável no futuro (WITHERS, RODRIGUES , *et al.*, 2018).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Solos utilizados

2.1.1 Localização

Os solos utilizados para realização deste trabalho, os Latossolos oxídicos ácidos, foram previamente escolhidos, principalmente pela alta capacidade de adsorção de P que esses solos têm, e foram coletados de duas diferentes regiões (Figura 1).

Uma das amostras de solo utilizado no trabalho foi coletada na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Centro-oeste do estado de Minas Gerais, no município de Lagoa Formosa, equidistante 377 Km de Belo Horizonte e 27 Km de Patos de Minas cuja região tem como principais atividades de ocupação e uso do solo a agricultura intensiva, destacando-se a cultura do milho e a pecuária de corte, numa área que corresponde a aproximadamente 70% do município (SOUZA, 2017).

A outra amostra de solo utilizada no experimento foi coletada na Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, no município de Nova Lima, que faz divisa com o centro

sul da cidade de Belo Horizonte, cuja região tem a extração do minério de ferro como atividade principal de ocupação e uso do solo (MACHADO, 2018).

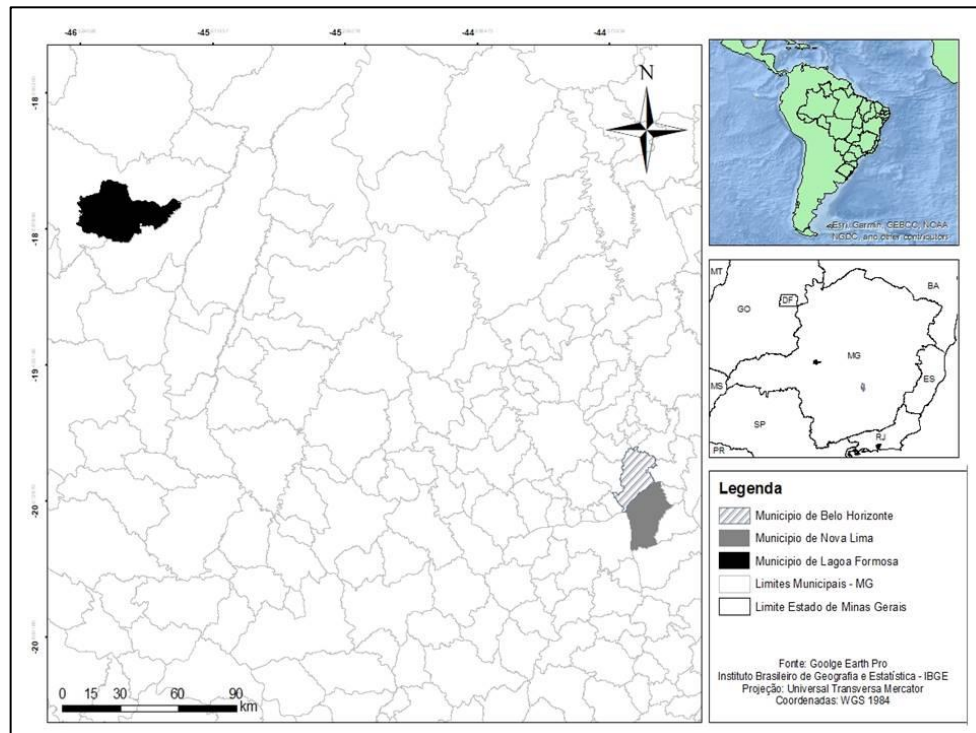


Figura 10 Mapa de localização dos municípios de Lagoa Formosa e Nova Lima estado de Minas Gerais – Fonte: IBGE 1984.

2.1.2. Geologia

Quatro são as unidades geológicas que se apresentam no município de Lagoa Formosa, no estado de MG, que se situa no Vale do Rio São Francisco. Grupo Bambuí, do período Neoproterozoico, Grupo Areado e Grupo Mata da Corda, do período Mesozoico e Coberturas terciárias do Cenozoico. O embasamento do Cráton São Francisco encontra-se recoberto pelo grupo Bambuí que é o principal afloramento de rochas metamorfizadas, as denominadas pelíticas do Bambuí. Fazem parte da formação Lagoa Formosa, os diamictitos, arenitos, siltitos, argilitos e jaspelitos (SOUZA, 2017) (BAPTISTA, 2004).

Formado por sedimentação que se iniciou no Cretáceo inferior, o Grupo Areado é composto por conglomerados, arenitos e pelitos. Os diferentes tipos de deposição como leques–aluviais resultaram na formação Abaeté, a lacustre na formação Quiricó, assim como a sedimentação fluvio-deltaica, fluvial-meandrante e eólica resultaram na formação de maior extensão a denominada Três Barras (SEER, MORAES e FOGAÇA, 1989).

No Cretáceo superior um evento magmático formou o Grupo Mata da Corda, sendo composto por rochas vulcânicas e vulcanoclásticas sobre o Grupo Areado e sobre o embasamento do Grupo Bambuí. O grupo Mata da Corda é composto de duas formações que

são: Formação Patos e Formação Capacete. O grupo Mata da Corda apresenta sua base composta por rochas ígneas alcalinas, que contém rochas de derrame, condutos vulcânicos, diques e depósitos piroplásticos. Tais rochas são ricas em piroxênio, apresenta também peroviskita, leucita, olivina, flogopita, nefalina, apatita e fase vítrea (SEER, MORAES e FOGAÇA, 1989) (SOUZA, 2017). Os solos previamente escolhidos desta região, desenvolveram-se a partir destes materiais de origem.

No município de Nova Lima no estado de Minas Gerais, o Quadrilátero Ferrífero possui uma diversidade mineralógica muito grande, devido aos diversos e sucessivos processos geológicos na formação ao longo da escala geológica e, que dividem o Quadrilátero Ferrífero em quatro grandes grupos, possuidores de características únicas. São eles: Embasamento Cristalino, Super grupo Rio das Velhas, Super grupo Minas e Grupo Itacolomi. Considerando o solo previamente escolhido para realização deste trabalho, as descrições serão focadas no Super grupo Rio das Velhas (VARAJÃO, SALGADO, *et al.*, 2009).

Segundo (CARNEIRO, 1992) (MACHADO, 2018), através de estratigrafia da área acima do embasamento encontra-se a sequência green stone belt do supergrupo Rio das Velhas com sua unidade basal, grupo Nova Lima datando, de 2,7 a 2,8 milhões de anos, seguido pelo Grupo Maquiné. O Grupo Nova Lima apresenta em sua composição filitos, clorita-xistos, metagrauvas, rochas máficas e ultra-máficas como serpentinitos com antigorita, olivina ou pseudomorfos de olivina e magnetita, além de formações ferríferas bandadas, metacherts e metadolomitos (DORR, 1969) (RAPOSO, 1996).

2.1.3. Solos

O solo da região do município de Lagoa Formosa utilizado na realização do trabalho, foi coletado pelo estudante de Doutorado Djalma Pereira da Silva e cedido pelo banco de solos do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (Figura 2).

Na área de coleta do solo, o perfil foi amostrado e classificado de acordo com (SANTOS, SANTOS, *et al.*, 2015) (SANTOS, JACOMINE, *et al.*, 2013), como Latossolo Vermelho Acriférico típico (LVwf), apresentando: A moderado, textura muito argilosa, fase cerrado subcaducifólio, relevo suave ondulado, cuja coordenada geográfica de coleta 18° 45' 06,81" S e 46° 23' 26,89" W, a uma altitude de 928 m em relação ao nível do mar, pertencente ao Grupo Mata da Corda (SOUZA, 2017). Os latossolos do município de Lagoa formosa estão todos em áreas de relevo plano, levemente ondulado.

Os resultados das análises físicas e mineralógicas do solo expressos na Tabela 1 e Tabela 2.



Figura 11 – Perfil Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LV wf) – Grupo Mata da Corda – Lagoa Formosa – Minas Gerais -Fonte: (SOUZA, 2017).

Tabela 11 – Granulometria e coloração do perfil do LVwf coletado em Lagoa Formosa, MG – fonte: (SOUZA, 2017)

Horizonte	Profundidade (cm)	Areia Grossa	Areia Fina	Silte g.kg ⁻¹	Argila	ADA	Cor Úmida	Cor Seca
LVwf - Latossolo Vermelho Acriférrico típico								
A	0 - 20	91,00	68,00	272,00	569,00	67,00	2,5YR3/2	2,5YR3/4
A/B	20 - 52	80,00	94,00	266,00	560,00	2,00	2,5YR3/2	2,5YR3/4
Bw1	52 - 97	85,00	76,00	245,00	594,00	143,00	2,5YR2,5/4	2,5YR3/6
Bw2	97 - 130+	88,00	70,00	249,00	593,00	161,00	2,5YR2,5/4	2,5YR3/6

Tabela 12 – Propriedades físicas do solo coletado em Lagoa Formosa, MG – Fonte: (SOUZA, 2017)

Horizonte	Profundidade (cm)	Densidade Aparente kg.dm ⁻³	Densidade de Partícula	Porosidade Total	Relação Silte/Argila
A	0 - 20	1,14	2,98	61,87	0,48
A/B	20 - 52	1,17	3,08	61,94	0,48
Bw1	52 - 97	1,17	3,11	62,39	0,41
Bw2	97 - 130+	1,12	3,09	62,84	0,42

A textura argilosa deste Latossolo está relacionada à sedimentação areno-argilosa do terciário na região e, pelo intemperismo das rochas do Grupo Mata da Corda (MOTTA, BARUQUI e SANTOS, 2004). O alto teor de gibbsita em especial os Latossolos, contribuem para a estabilidade dos agregados, no entanto são solos mais oxídicos, coloração mais

avermelhada devido a presença da hematita, principalmente nas regiões onde a drenagem é favorecida, contrariamente às regiões de drenagem mais restritas onde a goethita é mais presente.

Na região do município de Nova Lima o solo utilizado na realização do trabalho, foi coletado em perfil (Figura 3) de solo, também previamente escolhido devido à sua característica oxidica, a presença do ferro tanto na sua forma (Fe^{2+}) e (Fe^{3+}) na condição de óxidos e hidróxidos, que interferem em seus diversos atributos.



Figura 12 – Perfil Latossolo Vermelho Perférico típico (LV j) – Quadrilátero ferrífero - Grupo Nova Lima – Nova Lima – Minas Gerais.

O perfil foi amostrado e as análises físicas e mineralógicas expressos na Tabela 3 e tabela 4, permitiram este solo ser classificado de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS, SANTOS, *et al.*, 2015) (SANTOS, JACOMINE, *et al.*, 2013), como Latossolo Vermelho Perférico típico (LVj).

Tabela 13 – Granulometria e coloração do perfil do LVj coletado em Nova lima, MG – fonte: (ABRAHÃO, SCHEAFER, *et al.*, 2016)

Horizonte	Profundidade (cm)	Areia				Argila			Cor Úmida	Cor Seca
		Areia	Areia	Silte	Argila	ADA	Cor Úmida	Cor Seca		
A1	0 - 12	32,0	6,0	20,0	42,0	22,0	10R 3/3	10R 3,5/4		
A2	12 - 35	35,0	6,0	15,0	44,0	16,0	10R 3/3,5	10R 3,5/4		
AB	35 - 55	31,0	5,0	18,0	46,0	29,0	10R 3/4	10R 3,5/5		
BA	55 - 80	26,0	5,0	20,0	49,0	27,0	10R 3/6	10R 3,5/6		
BW1	80 - 115	21,0	5,0	21,0	53,0	1,0	10R 3/6	10R 3,5/6		
BW2	115 - 150	26,0	8,0	24,0	42,0	5,0	10R 3/6	10R 3,5/6		
BW3	150 - 190	15,0	6,0	21,0	58,0	35,0	10R 3/6	10R 3,5/6		
BW4	190 - 215	14,0	7,0	21,0	58,0	52,0	10R 3/6	10R 3,5/6		
BW5	215 - 285	15,0	6,0	21,0	58,0	—	10R 3/6	10R 3,5/6		

Tabela 14 – Propriedades físicas do solo coletado em Nova Lima, MG – Fonte: (ABRAHÃO, SCHEAFER, *et al.*, 2016)

Horizonte	Profundidade	Densidade Aparente	Densidade de Partícula	Porosidade Total	Relação Silte/Argila
		kg.dm ⁻³			
A1	0-12	1,23	3,40	64,0	0,48
A2	12-35	1,19	3,43	65,0	0,34
AB	35-55	1,24	3,54	65,0	0,39
BA	55-80	1,18	3,55	67,0	0,41
BW1	80-115	1,17	3,51	67,0	0,40
BW2	115-150	1,64	3,53	54,0	0,57
BW3	150-190	1,68	3,43	51,0	0,36
BW4	190-215	1,59	3,47	54,0	0,36
BW5	215-285	–	–	–	–

O LVj, apresenta A moderado, muito profundo, fase campo cerrado, relevo suave ondulado, cuja coordenada geográfica de coleta 20° 07' 07,1" S e 43° 58' 5,0" W, a uma altitude de 1200 m em relação ao nível do mar, pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas, Grupo Nova Lima (MACHADO, 2018) (ABRAHÃO, SCHEAFER, *et al.*, 2016).

Estando associados a litologias ricas em ferro duas regiões no Brasil destacam-se pela grande ocorrência desses solos, sendo um deles os do Quadrilátero Ferrífero com Itabiritos e Itabiritos dolomíticos do Paleoproterozóico. Com os aprimoramentos das técnicas o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos, subdividiu a um terceiro nível categórico, que separa estes solos em hipoférricos, mesoférricos, férricos e perférricos (MACHADO, 2018).

2.2. Experimento

Antes de iniciar os ensaios foram realizadas as análises químicas de rotina destes solos cujos resultados seguem na Tabela 5 abaixo.

Tabela 15 – Características Químicas do Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf) e Latossolo Vermelho Perférrico típico (LVj).

Solos	pH H ₂ O	pH KCl	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H + Al	
	mg.dm ⁻³			cmol _c .dm ⁻³				
LVwf	5,56	5,47	1,9	148	1,9	1,11	5,3	
LVj	6,79	5,95	3,2	6	4,18	0,4	4,2	
Solos	Al ³⁺	SB	t	T	V	m	P rem	
cmol _c .dm ⁻³			(%)			(%)	(mg.L ⁻¹)	
LVwf	0,00	3,39	#	3,39	8,69	39,00	0,00	7,90
LVj	0,00	4,60	#	4,60	8,80	52,30	0,00	6,60

O experimento foi realizado em casa de vegetação cedida pelo Professor Gilberto Bernardo de Freitas, do setor de Fruticultura do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, Minas Gerais. Os solos Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf) e Latossolo Vermelho Perférrico típico (LVj) das amostras coletadas nos perfis a profundidade de 0 – 20 cm, foram secos ao ar e depois destorroados e peneirados em peneira com malha de 2 mm (TFSA). Os dois tipos de solos foram colocados em vasos com capacidade volumétrica de 1 dm³.

2.2.1. Delineamento

O experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado, com três (3) repetições, no fatorial 2 x 10 x 2, sendo dois (2) solos, um (1) material (sílica ativa) aplicado em dez (10) doses e de duas formas de aplicação: seca e suspensão em água. O experimento totalizou 87 vasos, aos quais foram distribuídos os solos LVwf e LVj, e, cada vaso recebeu 1 dm³ de solo, seguindo os parâmetros estabelecidos no delineamento.

2.2.2. - Formas de aplicação

Cada vaso contendo 1 dm³ de solo recebeu a dose definida do material sílica ativa conforme tabela inserida na Figura 4.

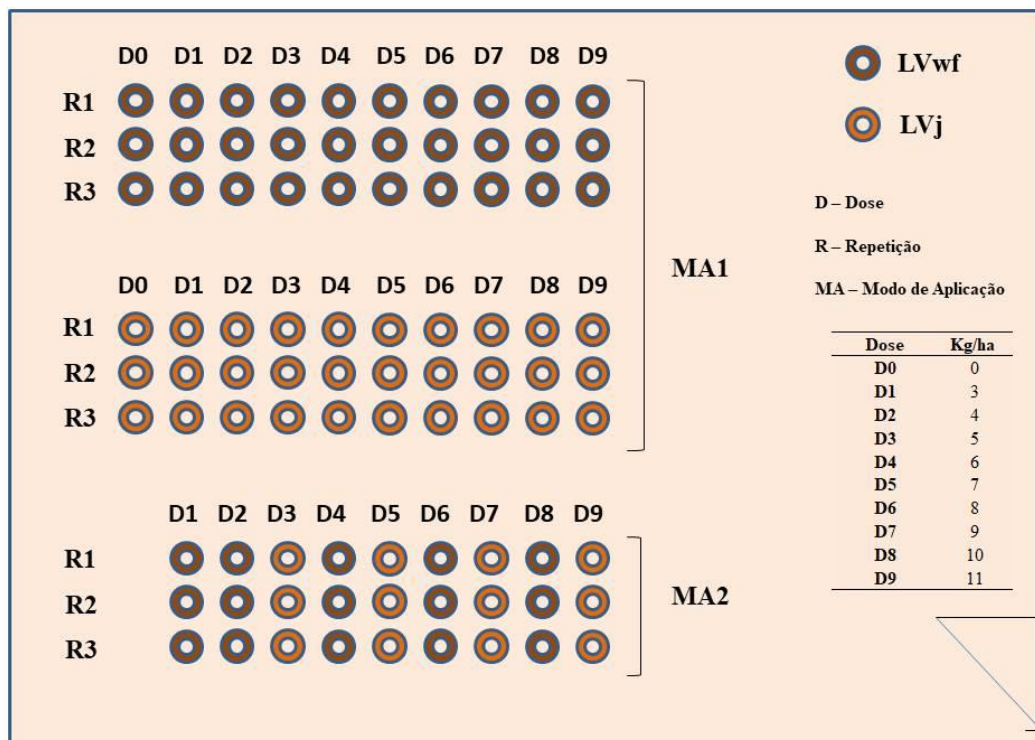


Figura 13 – Esquema do delineamento experimental dentro da estufa setor de fruticultura do Departamento de Fitotecnia.

Para aplicação a seco, ou seja, sílica ativa pó, aplicada diretamente ao solo, foi adotado o seguinte procedimento: Primeiramente cada dose de sílica ativa proposta no delineamento foi pesada em triplicata, atendendo ao requisito das três repetições por dose. O solo contido em cada vaso, um de cada vez, foi transferido para um pote com capacidade de 3 dm³ e recebeu a dose em g.dm⁻³ correspondente a dose em t.ha⁻¹ a campo. O pote foi fechado e agitado por um tempo de 1 min manualmente, e a mistura adicionada ao vaso. Todos os vasos correspondentes ao ensaio com solos LVwf e LVj passaram pelo mesmo procedimento e foram posicionados de acordo com o delineamento na estufa (Figura 4).

Para a aplicação da sílica ativa suspensa em água, foi feito o seguinte procedimento: as doses também foram pesadas em triplicata e, cada dose da sílica ativa transferida para frascos contendo 100 mL de água, agitado por 1 min manualmente e, essa mistura sílica ativa e água, vertida sobre o solo no vaso. Esse procedimento foi feito para todos os vasos, dos dois solos LVwf e LVj e foram posicionados na estufa conforme delineamento proposto (Figura 4).

Imediatamente após os vasos que receberam a sílica ativa suspensa em água (segunda forma de aplicação) serem posicionados na estufa, os vasos que receberam a sílica ativa pó seco (primeira forma de aplicação) foram irrigados. Essa irrigação repetiu-se em todos os vasos das duas formas de aplicação, por todo o tempo de reação da sílica ativa aos solos, estabelecidos para o experimento que foram de 15 e 30 dias.

Ao fim do primeiro tempo de retenção, que foi de 15 dias, foram feitas amostragens da mistura sílica ativa com o solo, com a finalidade de proceder as análises dos teores de P remanescente (P rem), P disponível e Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP). As amostras foram retiradas em cada vaso, utilizando-se um tubo inox com diâmetro interno de 2,54cm perfurando-se todo o perfil de solo no vaso, sendo o solo amostrado retirado por um embolo introduzido no tubo pelo lado posterior ao de perfuração. Cada amostra de solo foi colocada em copos plásticos devidamente identificados e, na sequência secos ao ar, foram destorroados e passados em peneira com malha de 2 mm, TFSA e levadas para análises laboratoriais. Findo o segundo tempo de retenção que foi de 30 dias, a amostragem procedeu-se da mesma forma que o anterior. No intervalo entre o primeiro e segundo tempo de retenção os vasos continuaram a receber irrigação diariamente.

2.3. Análises laboratoriais

2.3.1. Determinação do teor de fósforo remanescente (P rem)

As amostras de solo dos vasos, foram para laboratório para determinação do P rem, e para tanto, utilizou-se a metodologia descrita pelo Manual de Métodos de Análises de Solo

(Embrapa Solos 2018), no qual para cada amostra, 5 cm³ de solo, foi transferida para erlenmeyer de 125 mL com solução de CaCl₂ contendo 60 mg.L⁻¹ de P. A solução foi agitada e deixada em repouso por 16 horas. Após o período de repouso, retirou-se uma alíquota de 0,2 mL do sobrenadante da solução, diluída com água destilada a 5 mL e adicionando-se 5 mL do reagente de trabalho (RT) que é composto por subcarbonato de bismuto e molibdato de amônia. Aguardou-se o tempo de reação de 30 minutos e a reação colorimétrica analisada pela absorvância em espectrofotômetro com comprimento de onda de 725 nm, cujas concentrações de P foram obtidas através da curva de calibração.

2.3.2. Determinação do teor de fósforo disponível

O P das amostras de solo dos vasos foi extraído conforme metodologia descrita pelo Manual de Análises de Solo (Embrapa Solos 2018), utilizando-se solução ácida extratora Mehlich-1. Foram retirados de cada amostra 5 cm³ de solo e transferidos para erlenmeyer de 125 mL com solução Mehlich-1 (HCl 0,05 mol.L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol.L⁻¹). As amostras foram agitadas por 5 minutos em agitador circular horizontal com 125 oscilações por minuto e colocado em repouso por 16 horas. Ao fim do tempo de repouso, retirou-se uma alíquota de 5 mL do sobrenadante e adicionaram-se 5 mL do RT, aguardou-se um tempo de reação de 30 minutos e a reação colorimétrica analisada pela absorvância em espectrofotômetro com comprimento de onda de 660 nm, cujas concentrações de P foram obtidas através de curva de calibração.

2.3.3 Determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)

A Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo foi estimada em função dos valores determinados de P remanescente pela Equação 1 ajustada por NEVES⁴ 2018 com base em vários trabalhos desenvolvidos com Oxisols do Brasil.

$$\text{CMAP (mg/g)} = - 373,721 \text{ LnPrem.60} + 1816,1 \text{ onde } R^2=0,75^{**}, n=62 \quad (\text{Equação 1})$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resultados das análises para LVwf e LVj

No experimento, foi feita análise química para os dois solos LVwf e LVj, com a finalidade de determinar os teores de fósforo remanescente (P rem), utilizando-se os procedimentos descritos pelo Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa solos 2018). A capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) foi estimada de acordo com a equação proposta por NEVES⁴ (2018), para os dois tempos de incubação que foram de 15 e 30 dias,

⁴ Professor Júlio César Lima Neves, Departamento de Solos, UFV – MG (Comunicação pessoal).

nas 10 doses de sílica ativa adicionadas ao solo nas formas de aplicação sendo: aplicação - 1 pó seco adicionado direto ao solo e, aplicação 2 - em suspensão, cada tratamento com 3 repetições, seguindo as regras estabelecidas pelo delineamento e os resultados expressos e discutidos nos gráficos das figuras que seguem abaixo.

3.1.1 LVwf modo de aplicação 1

O resultado expresso na Figura 5, primeira avaliação aos 15 dias após a adição da sílica ativa no modo de aplicação 1 para um LVwf, demonstra claramente que os resultados dos teores de P rem são crescentes para os aumentos das doses de sílica ativa a partir da dose de 4 t.ha⁻¹ e. A Figura 6 expressa os resultados da CMAP, que mostram que com o aumento das doses de sílica ativa, há a diminuição da CMAP, evidenciando respostas positivas em relação à ação de bloqueio da adsorção do P pela sílica ativa.

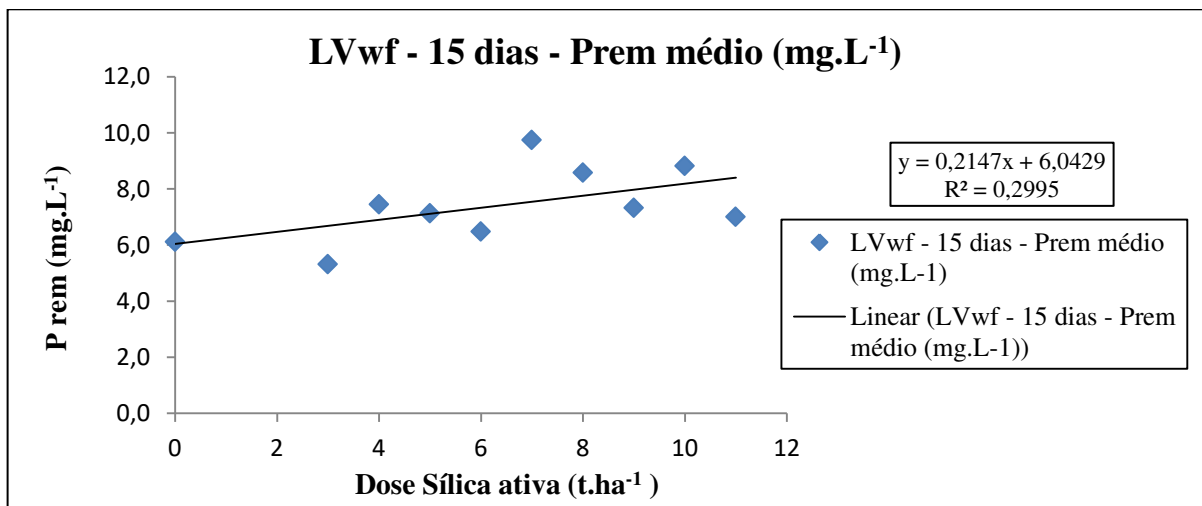


Figura 14 – Valores médios de P rem Lvwf - 15 dias de incubação.

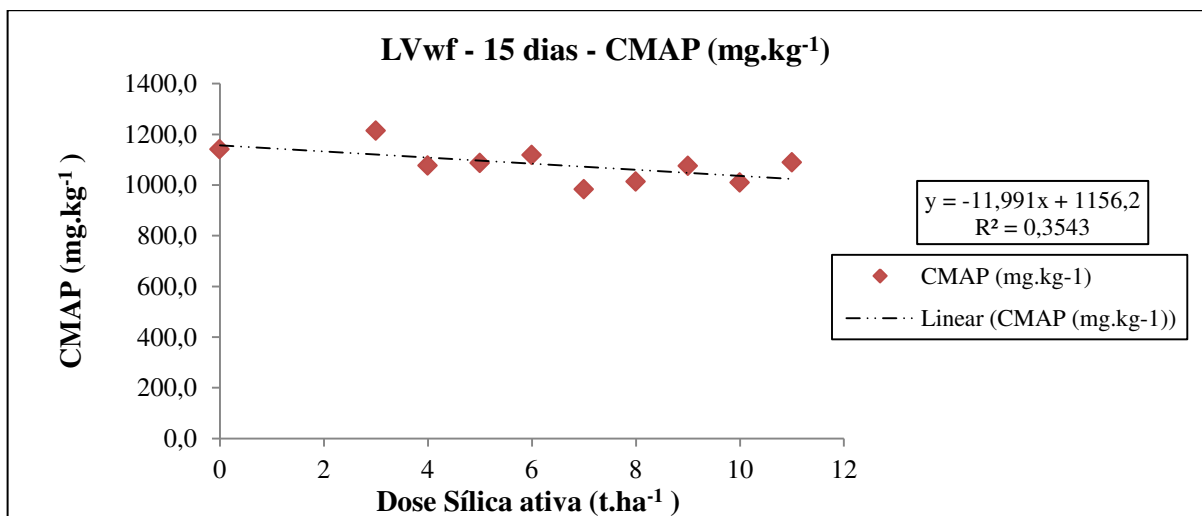


Figura 15 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de NEVES para 15 dias de incubação.

A Figura 7, segunda avaliação aos 30 dias após a adição da sílica ativa no modo de aplicação 1 para um LVwf, demonstra claramente que os resultados dos teores de P rem são crescentes para os aumentos das doses de sílica ativa a partir da dose de 3 t.ha⁻¹. A Figura 8 que expressa os resultados da CMAP, mostram que com o aumento das doses de sílica ativa, há a diminuição da CMAP, comprovando as respostas positivas em relação à ação de bloqueio da adsorção do P pela sílica ativa.

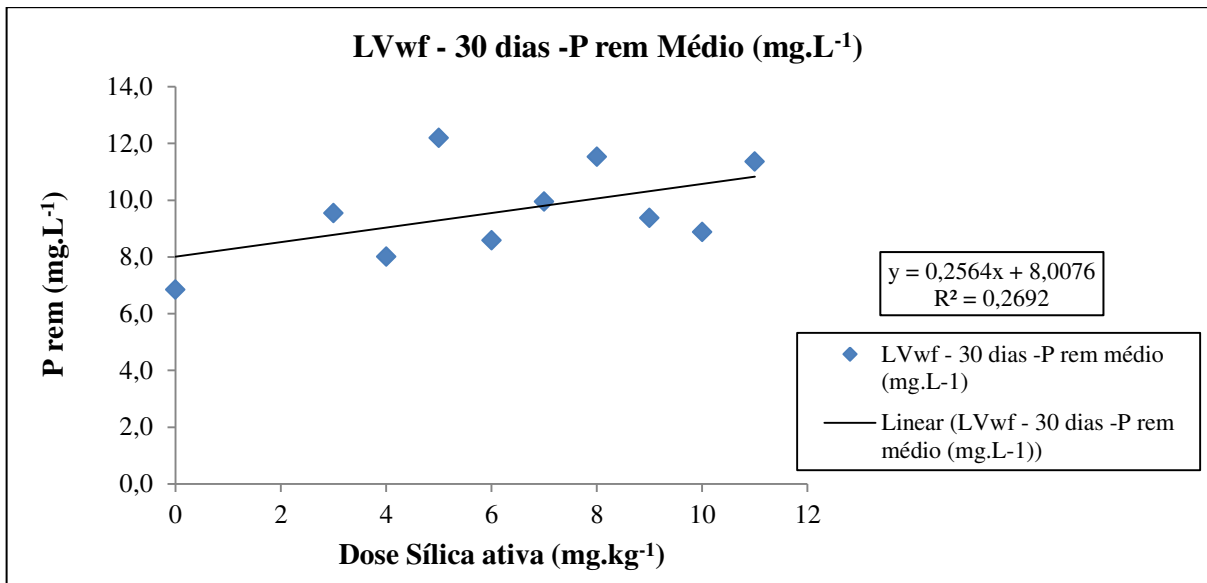


Figura 16 – Valores médios de P rem 30 dias de incubação LVwf.

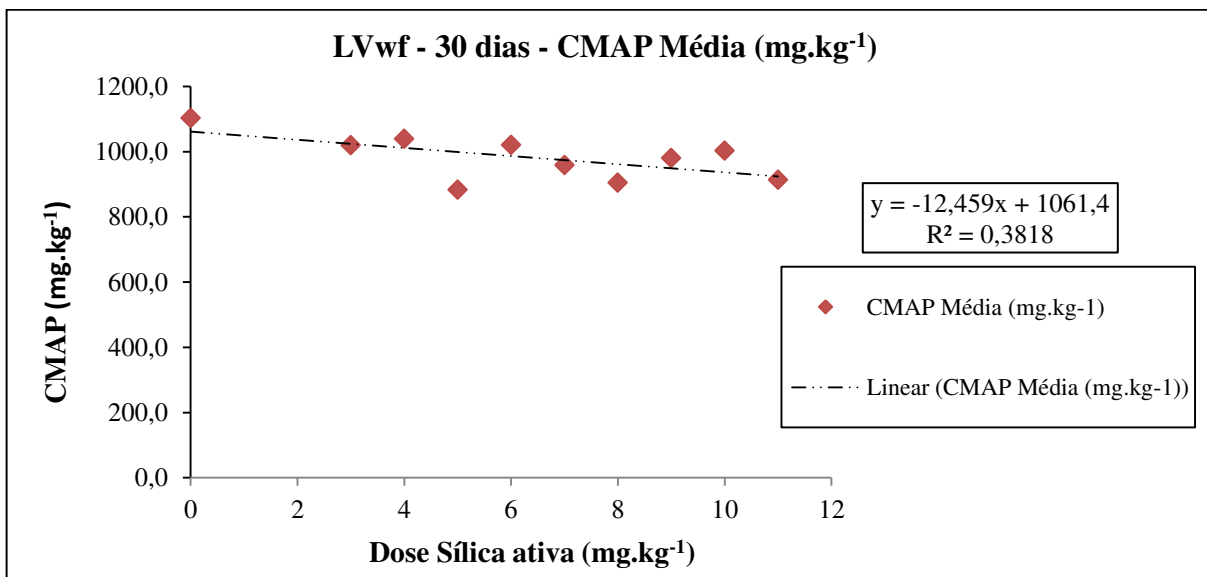


Figura 17 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 30 dias de incubação LVwf.

Quando confrontados os resultados das avaliações de P rem e da CMAP, dos tempos de 15 e 30 dias em um LVwf e para as doses de sílica ativa adicionadas ao solo no modo de

aplicação 1, demonstrados na Figura 9, observa-se que houve considerável aumento dos valores de P rem no intervalo entre as duas análises, exceto nas doses de 4 t.ha⁻¹ e 7 t.ha⁻¹ que apresentaram menor variação, evidenciando que o fator tempo é preponderante para aumentar a eficiência do bloqueio da adsorção do P pelo Si da sílica ativa. Ao se relativizar os teores de P rem e verificando o percentual de aumento dos mesmos para as doses de sílica ativa, nota-se que os aumentos oscilam, mas em média para as doses de sílica ativa dos tratamentos é da ordem de 36,46%. De forma inversa verifica-se a diminuição da CMAP estimada para as doses de sílica ativa, ou seja, o resultado esperado. Observa-se que houve diminuição dos valores da CMAP no intervalo entre as duas análises, exceto nas doses de 4 t.ha⁻¹ e 7 t.ha⁻¹ apresentando menor variação, e ao relativizar os índices da CMAP para as doses de sílica ativa dos tratamentos é da ordem de 8,64%.

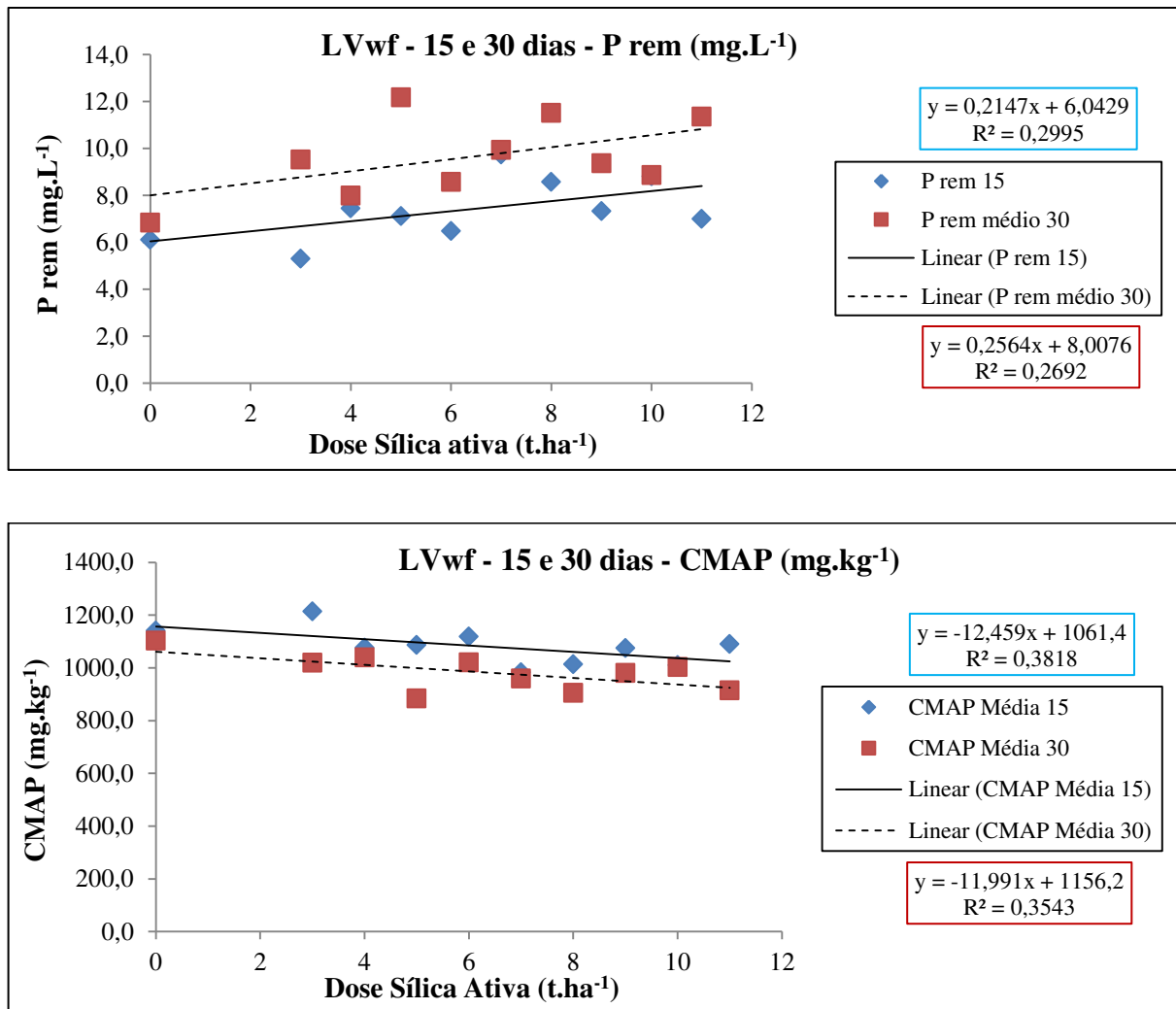


Figura 18 - Valores médios de P rem e da CMAP para 15 e 30 dias de incubação no LVwf.

3.1.2. LVj modo de aplicação 1

A Figura 10, expressa o resultado da primeira avaliação aos 15 dias após a adição da sílica ativa no modo de aplicação 1 para um LVj. Nota-se claramente que os resultados dos teores de P rem são maiores que a do tratamento testemunha para os aumentos das doses de sílica ativa, exceto no tratamento na dose de 7 e 11 t.ha⁻¹. A Figura 11 que expressam os resultados da CMAP, mostra que há a diminuição da CMAP em relação ao tratamento testemunha, com o aumento das doses de sílica ativa, exceto nas doses de 7 e 11 t.ha⁻¹, também evidenciando respostas positivas em relação à ação de bloqueio da adsorção do P pela sílica ativa.

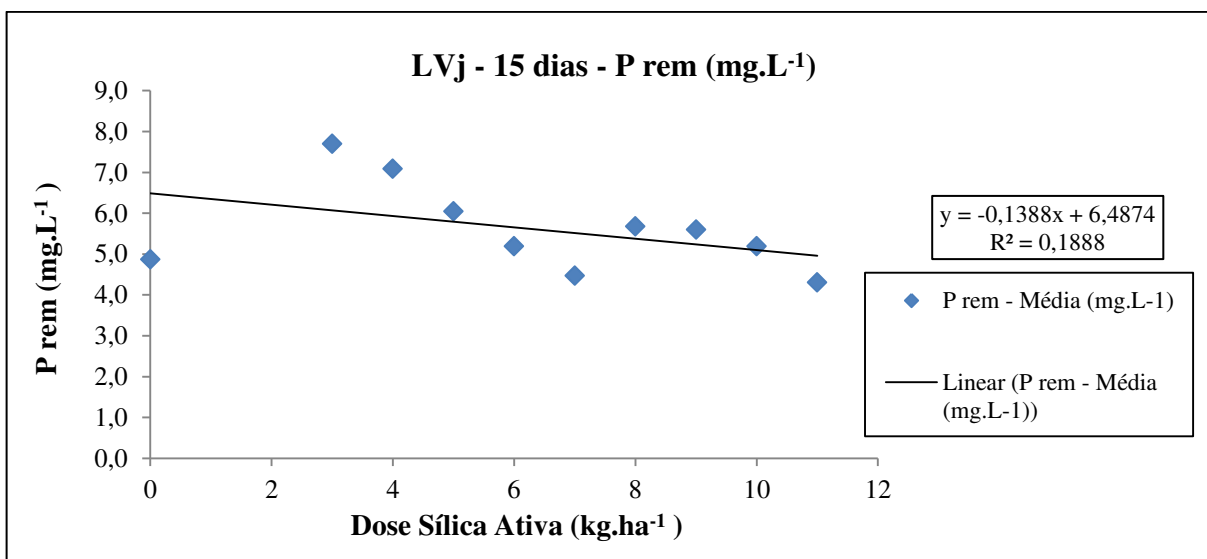


Figura 19 – Valores médios de P rem Lvj - 15 dias de incubação.

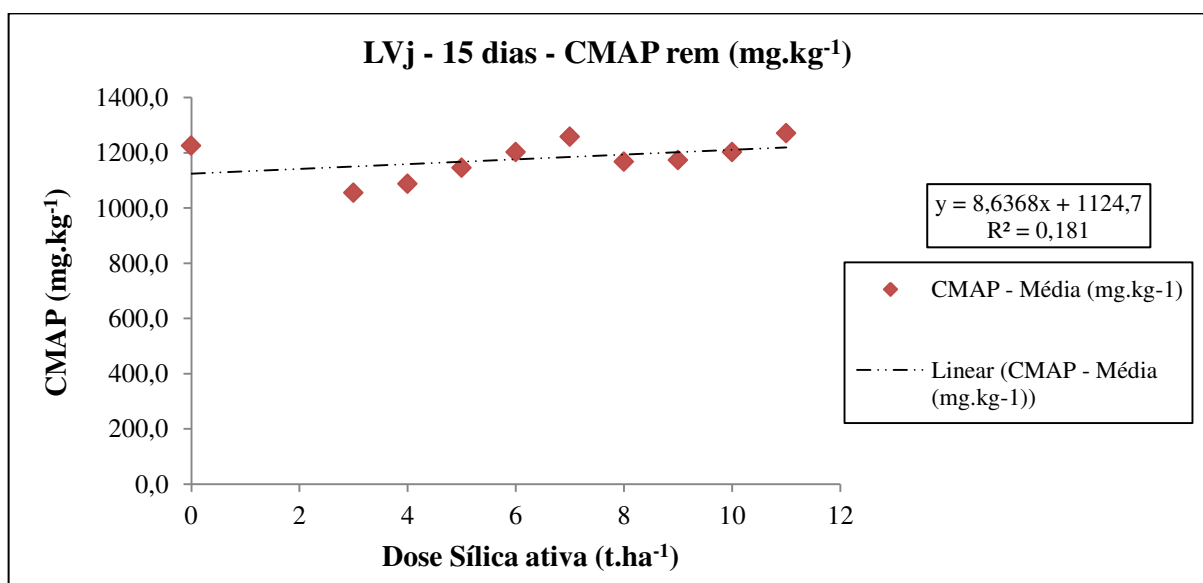


Figura 20 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 15 dias de incubação.

Na segunda avaliação aos 30 dias após a adição da sílica ativa no modo de aplicação 1 para um LVj (Figura 12), nota-se claramente que os resultados dos teores de P rem crescem para as doses de sílica ativa de 4, 7, 8 e 10 t.ha⁻¹ e as doses 3, 5, 6, 9, e 11 t.ha⁻¹ os teores de P rem estão abaixo do teor de P rem da testemunha. Na Figura 13 que expressam os resultados da CMAP, verifica-se, que com o aumento das doses de sílica ativa e teores maiores de P rem em relação ao tratamento testemunha, há a diminuição da CMAP, comprovando para estas doses, a evidência de respostas positivas em relação à ação de bloqueio da adsorção do P pela sílica ativa.

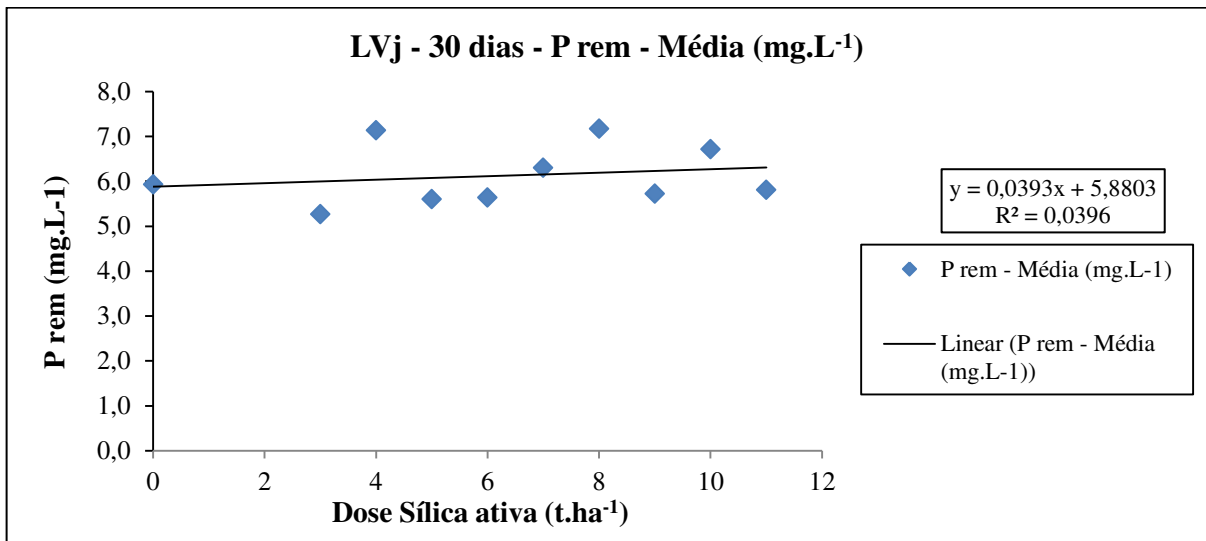


Figura 21 – Valores médios de P rem 30 dias de incubação LVj.

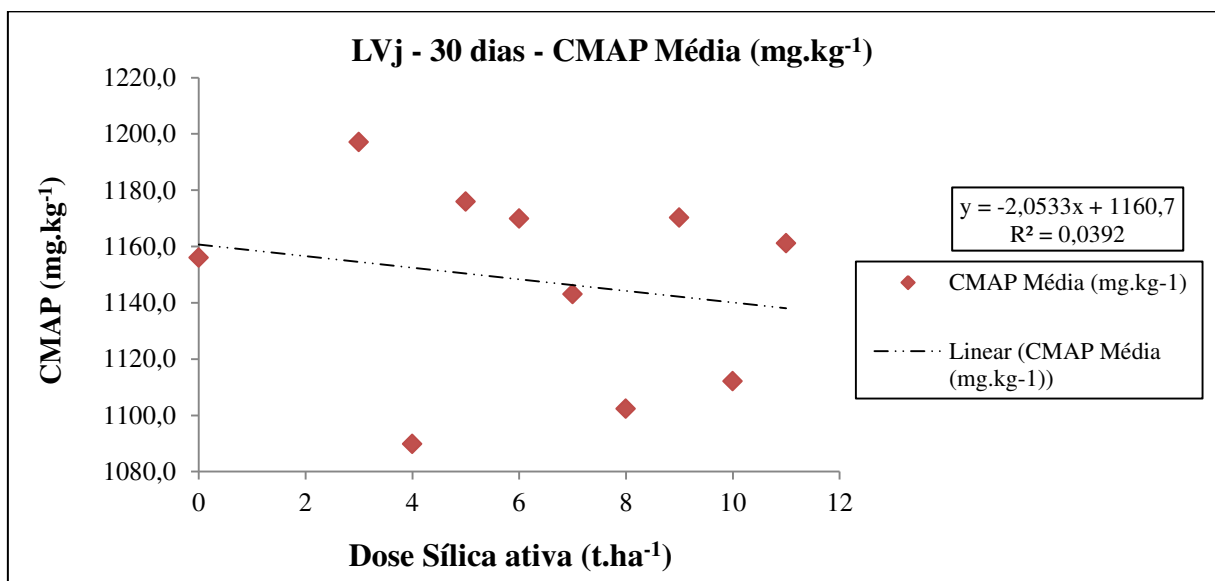


Figura 22 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 30 dias.

Os resultados das avaliações de P rem e da CMAP, dos tempos de 15 e 30 dias em um LVj e para as doses de sílica ativa inseridas ao solo no modo de aplicação 1, ao serem

confrontados, (Figura 14), demonstram que houve aumento dos valores de P rem no intervalo entre as duas análises e, evidenciam que o fator tempo é preponderante para aumentar a eficiência do bloqueio da adsorção do P pelo Si da sílica ativa. Ao se relativizar os teores de P rem e verificando o percentual de aumento dos mesmos para as doses de sílica ativa, nota-se que os aumentos oscilam, mas, em média é da ordem de 19,89 %. Na CMAP estimada para as doses de sílica ativa, verifica-se que houve diminuição dos valores no intervalo entre as duas análises, resultado que confirma o bloqueio da adsorção do P pelo silício da sílica ativa, e ao se relativizar os índices da CMAP para os tratamentos, a média de diminuição é da ordem de 4,87 %.

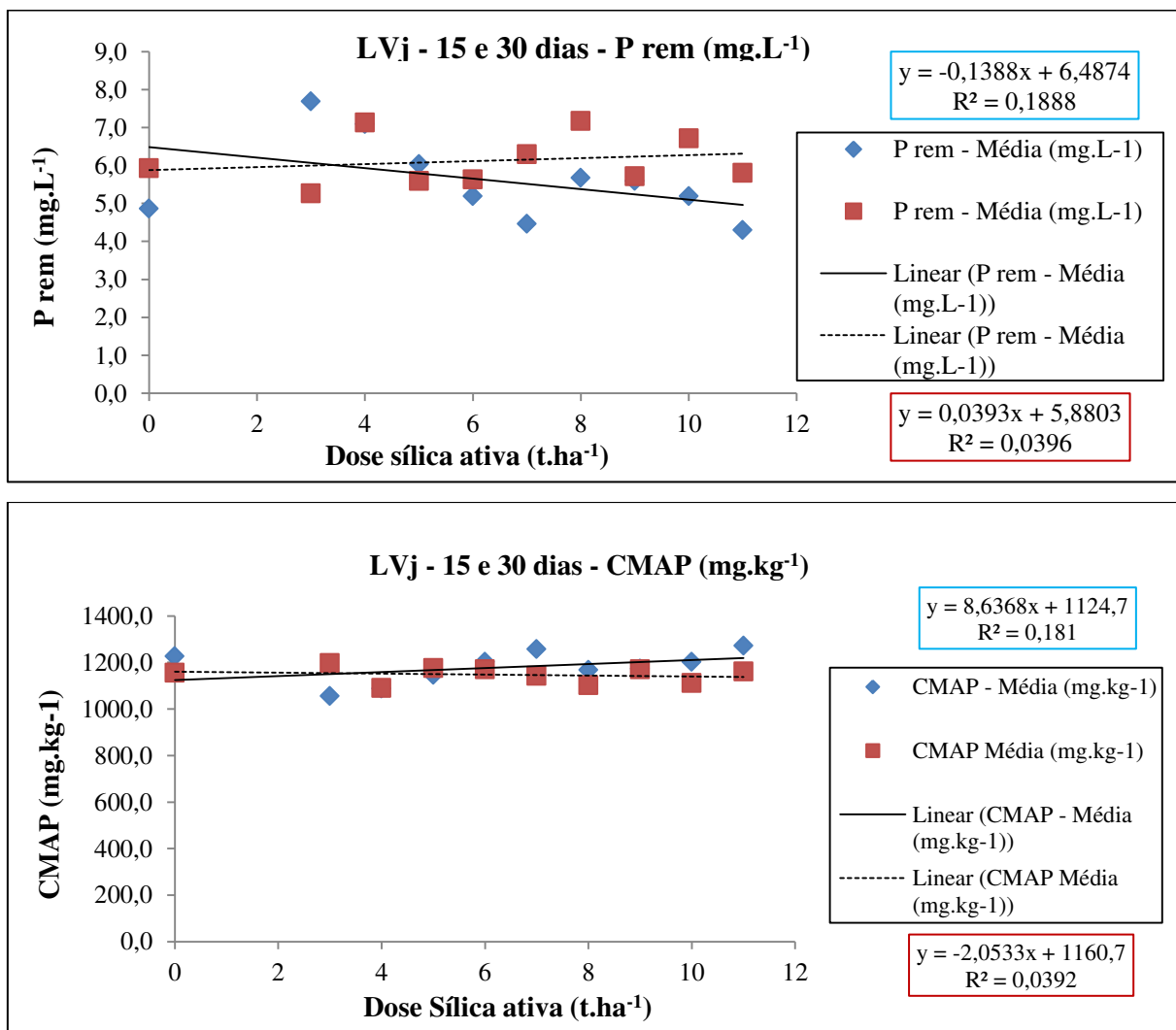


Figura 23 - Valores médios de P rem e da CMAP para 15 e 30 dias de incubação no LVj. Aumento da P rem indica maior adsorção do Si bloqueando a adsorção do P, e diminuição da CMAP, indicando maior P desorvido.

3.1.3 LVwf modo de aplicação 2

A Figura 15, expressa o resultado da primeira avaliação aos 15 dias após a introdução da sílica ativa no modo de aplicação 2, para um LVwf. Nota-se que os resultados dos teores de P rem são maiores que a do tratamento testemunha para as doses de sílica ativa, exceto no tratamento na dose de 3, 4 e 10 t.ha⁻¹. A Figura 16 que expressam os resultados da CMAP, mostra que há a diminuição da CMAP, para as doses de sílica ativa, 6 e 8 t.ha⁻¹, mas, tendendo a aumento não sendo possível ainda avaliar resposta em relação à ação de bloqueio da adsorção do P pela sílica ativa.

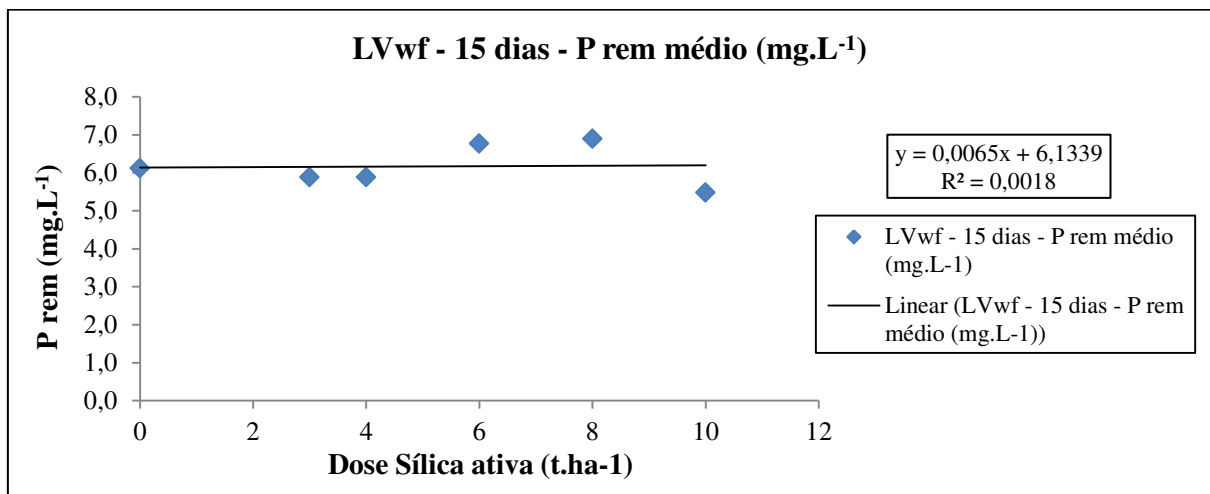


Figura 24 – Valores médios de P rem 15 dias de incubação LVwf – modo 2.

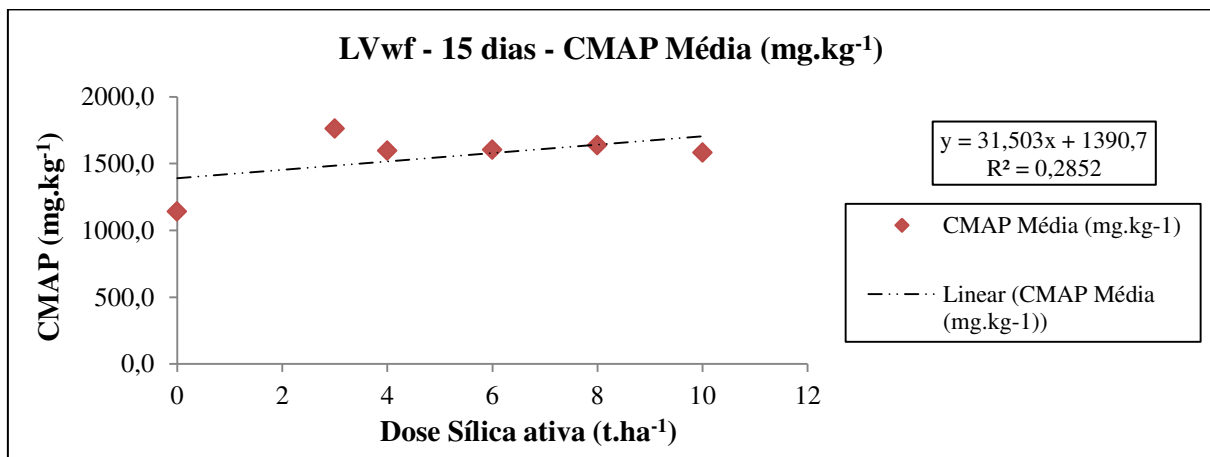


Figura 25 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 15 dias de incubação LVwf – modo 2.

Na segunda avaliação aos 30 dias após a introdução da sílica ativa no modo de aplicação 2 para um LVwf (Figura 17), demonstra que os resultados dos teores de P rem crescem para as todas as doses de sílica ativa em relação a testemunha. A Figura 18 expressa os resultados da CMAP, mostrando, que com o aumento das doses de sílica ativa e aumento dos teores de P rem em relação ao tratamento testemunha, há a diminuição da CMAP,

comprovando para todas doses, a evidencia de respostas positivas em relação à ação de bloqueio da adsorção do P pela sílica ativa.

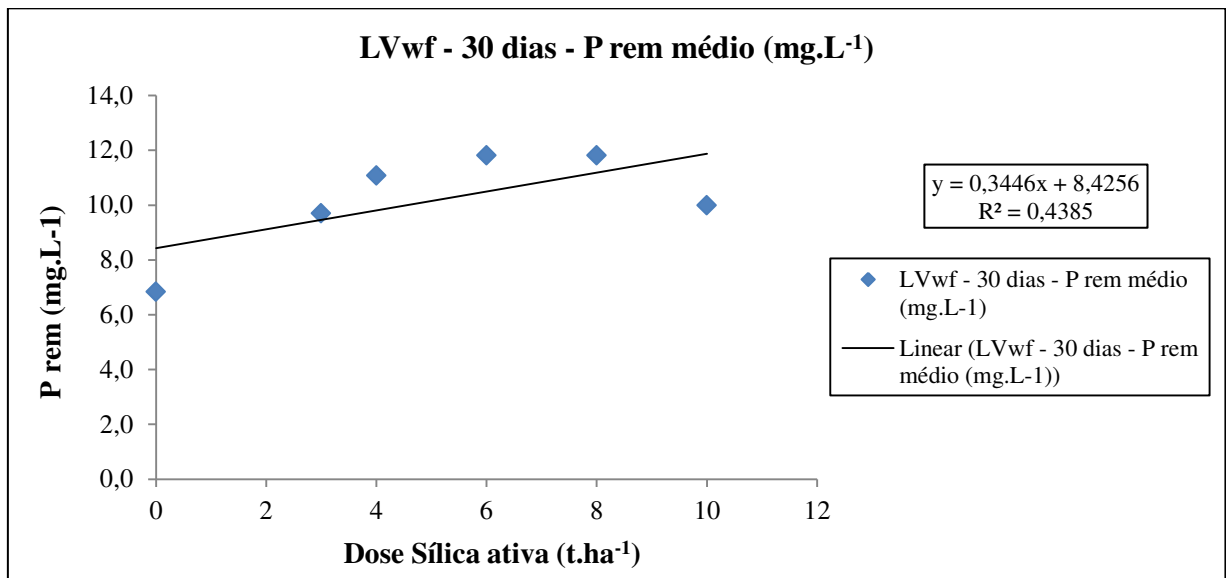


Figura 26 – Valores médios de P rem 30 dias de incubação LVwf – modo 2.

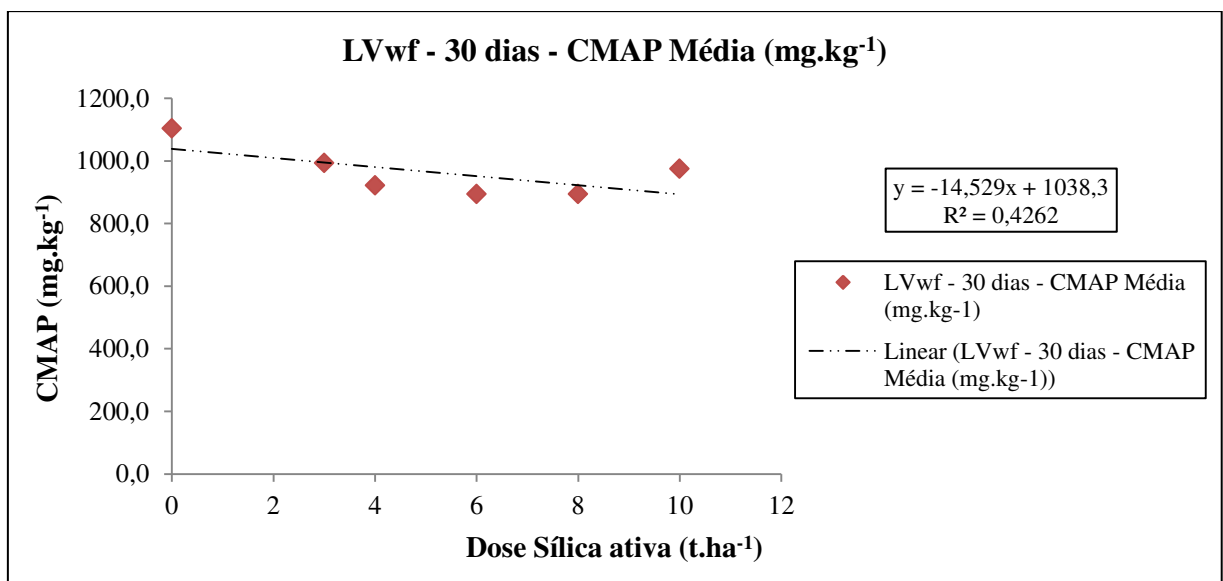


Figura 27 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 30 dias de incubação LVwf – modo 2.

Os resultados das avaliações de P rem e da CMAP, dos tempos de 15 e 30 dias em um LVwf, para as doses de sílica ativa inseridas ao solo no modo de aplicação 2, ao serem confrontados (Figura 19), demonstram que houve um aumento considerável dos valores de P rem no intervalo entre as duas análises evidenciando que o fator tempo e o modo de aplicação foram preponderantes para aumentar a eficiência do bloqueio da adsorção do P pelo Si da sílica ativa. Ao se relativizar os teores de P rem, o percentual de aumento para as doses de sílica ativa, é em média da ordem de 72,56 %. Na CMAP estimada para as doses de sílica

ativa, verifica-se que houve diminuição dos valores no intervalo entre as duas análises, resultado que confirma o bloqueio da adsorção do P pelo silício da sílica ativa, e ao se relativizar os índices da CMAP obteve-se uma média de diminuição da ordem de 63,50 %.

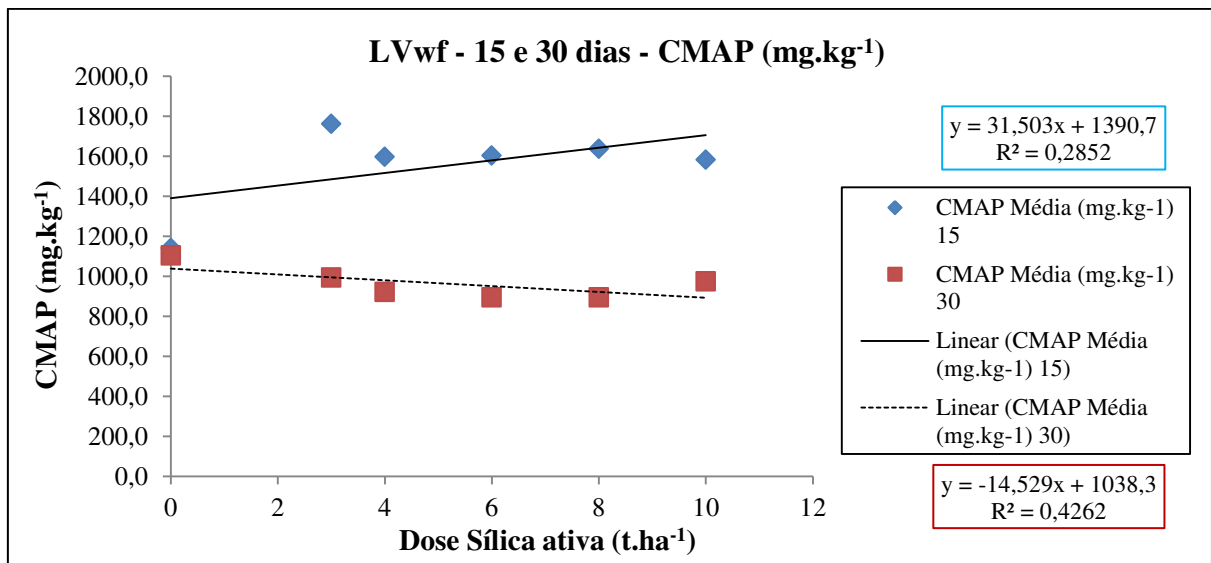
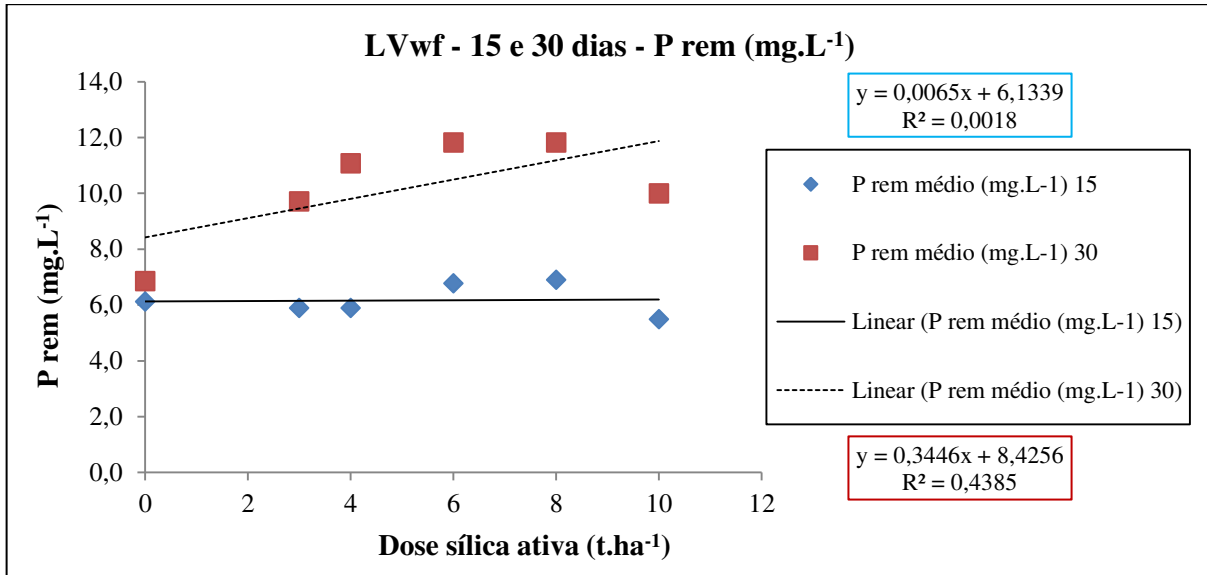


Figura 28 - Valores médios de P rem e da CMAP para 15 e 30 dias de incubação no LVwf. Aumento da P rem indica maior adsorção do Si bloqueando a adsorção do P, e diminuição da CMAP, indica maior P desorvido – modo de aplicação 2.

3.1.4. LVj modo de aplicação 2

Os resultados da primeira avaliação aos 15 dias após a introdução da sílica ativa no modo de aplicação 2, para um LVj (Figura 20), demonstram que os resultados dos teores de P rem decrescem nas doses de 5 e 7 t.ha⁻¹ e são maiores que a do tratamento testemunha para as doses de sílica ativa, nas doses de 9 e 11 t.ha⁻¹. A Figura 21 que expressam os resultados da

CMAP, mostra que há a diminuição desta, para as doses de sílica ativa, 9 e 11 t.ha⁻¹, mas, os valores expressos para o P rem e CMAP não caracterizam ainda uma forma de avaliar a resposta em relação à ação de bloqueio da adsorção do P pela sílica ativa.

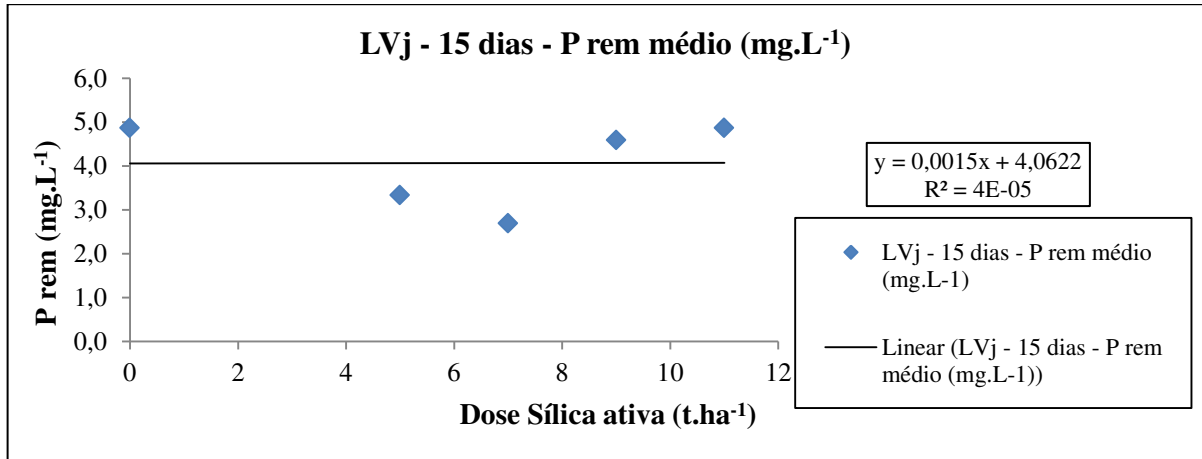


Figura 29 – Valores médios de P rem 15 dias de incubação LVj – modo 2.

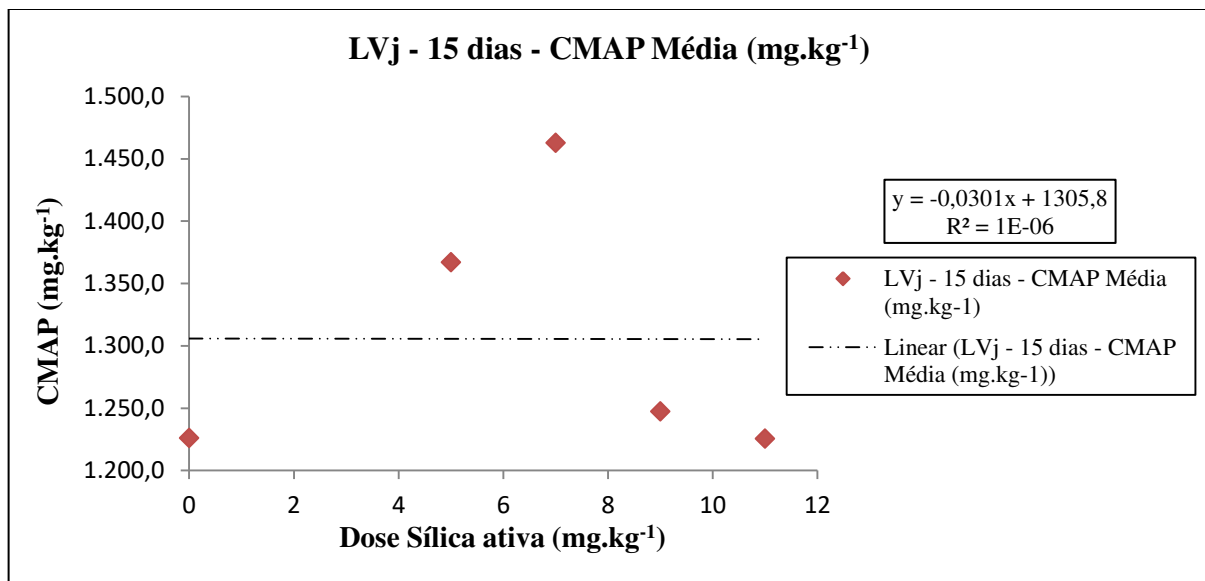


Figura 30 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 15 dias de incubação LVj – modo 2.

Na avaliação aos 30 dias após a introdução da sílica ativa no modo de aplicação 2 para um LVwf (Figura 22), verifica-se que os resultados dos teores de P rem em relação a testemunha, aumenta para as doses de sílica ativa 7 e 11 t.ha⁻¹. A Figura 23 que expressam os resultados da CMAP, mostra, que as doses de sílica ativa que tiveram aumento dos teores de P rem em relação ao tratamento testemunha, há a diminuição da CMAP, comprovando para estas doses, a evidencia de respostas positivas em relação à ação de bloqueio da adsorção do P pela sílica ativa.

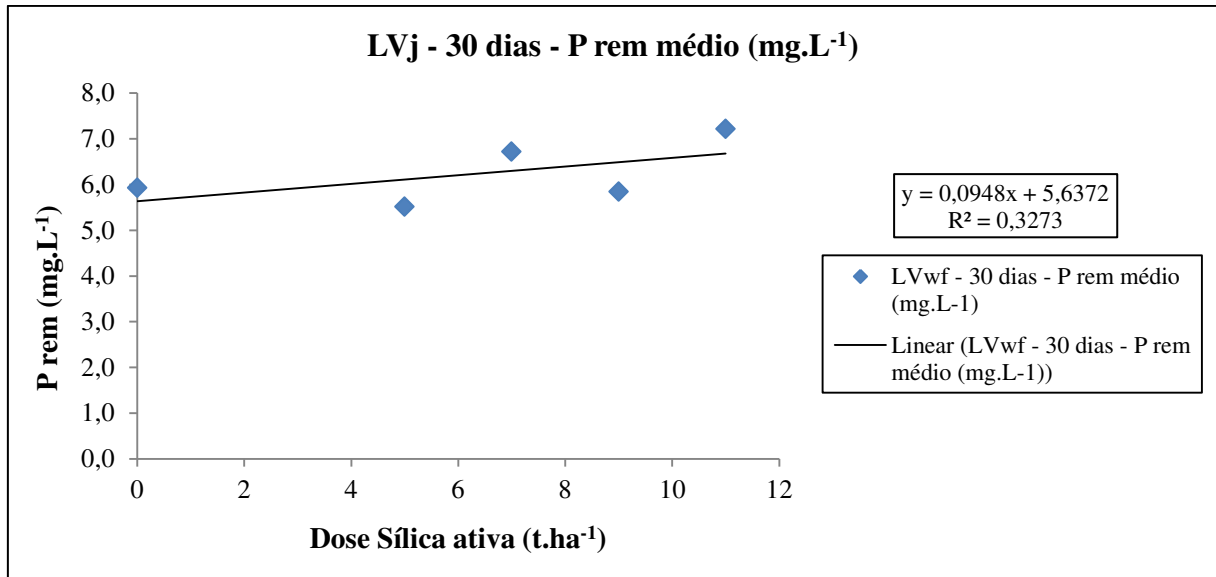


Figura 31 – Valores médios de P rem 30 dias de incubação LVj – modo 2.

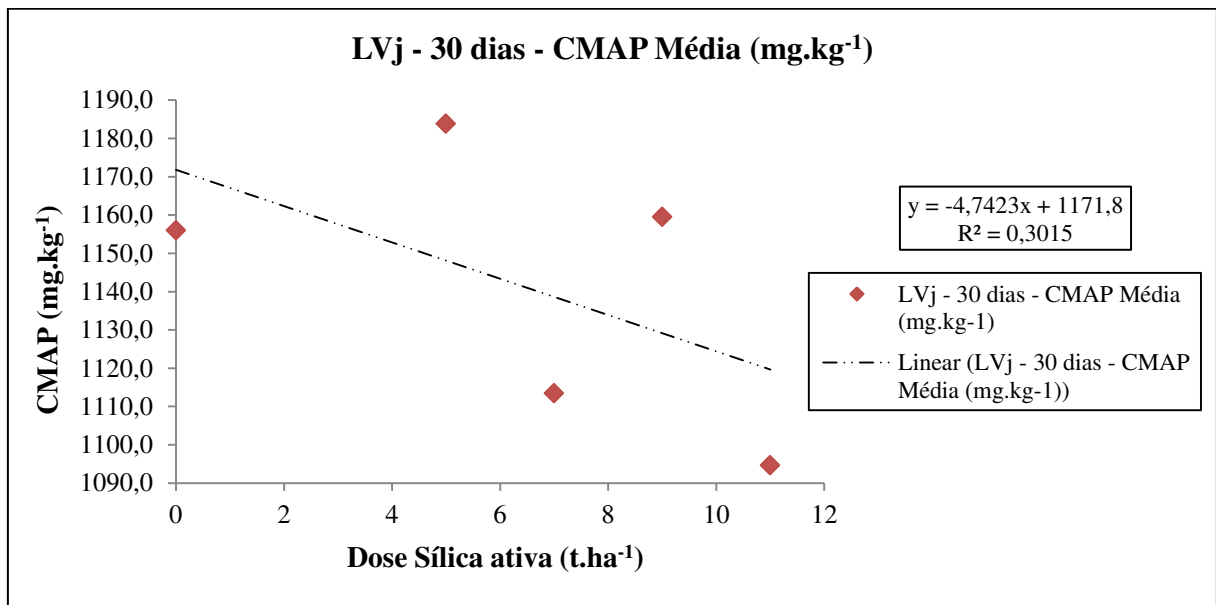


Figura 32 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 15 dias de incubação LVj – modo 2.

Confrontando os resultados das avaliações de P rem e da CMAP, dos tempos de 15 e 30 dias em um LVj, para as doses de sílica ativa inseridas ao solo no modo de aplicação 2, na Figura 24, observa-se que houve um aumento considerável dos valores de P rem no intervalo entre as duas análises evidenciam que o fator tempo e o modo de aplicação foram preponderantes para aumentar a eficiência do bloqueio da adsorção do P pelo Si da sílica ativa. Ao se relativizar os teores de P rem, o percentual de aumento para as doses de sílica ativa, é em média da ordem de 45,83 %. Na CMAP estimada para as doses de sílica ativa, verifica-se que houve diminuição dos valores no intervalo entre as duas análises, resultado

que confirma o bloqueio da adsorção do P pelo silício da sílica ativa, e ao se relativizar os índices da CMAP obteve-se uma média de diminuição da ordem de 15,75 %.

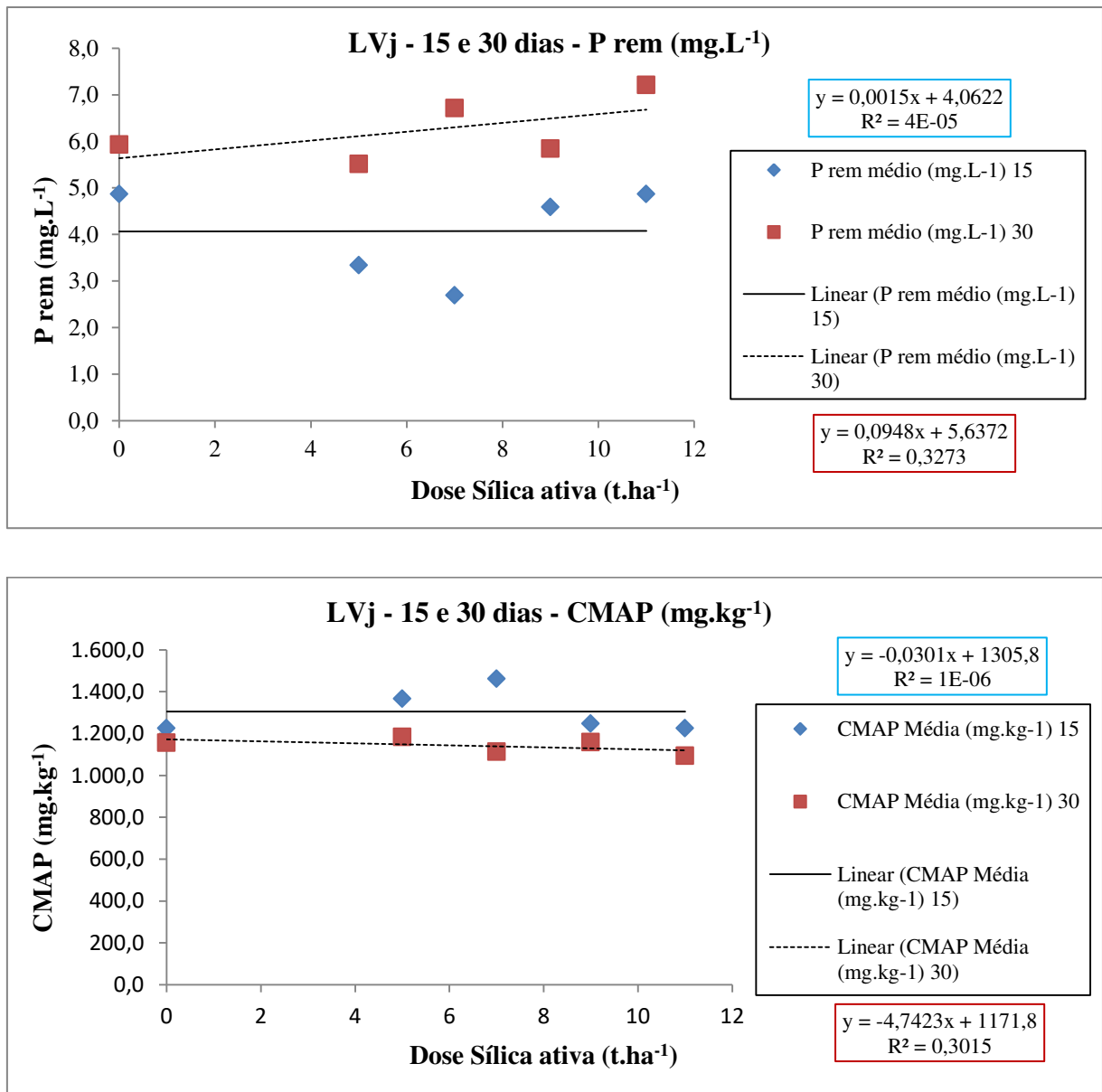


Figura 33 - Valores médios de P rem e da CMAP para 15 e 30 dias de incubação no LVj. Aumento da P rem indica maior adsorção do Si bloqueando a adsorção do P, e diminuição da CMAP, indica maior P dessorvido.

O comportamento descrito pelas curvas das figuras de número 6 a 24 explicam o comportamento do efeito do bloqueio da adsorção de P pelo Si da sílica ativa, nas amostras dos solos, coletados de um LVwf e de um LVj, e que foram adequadamente expressos pela determinação dos teores de P rem, assim como os valores expressos da CMAP. Os comportamentos sortivos do P e Si, poderão ser visualizados através dos dados de P rem que aumentaram e das CMAP's que diminuiram em relação aos teores obtidos de P rem e CMAP

dos tratamentos testemunhas. Esses efeitos são melhores visualizados nas curvas confrontadas para os dois tempos. Quando se comparam os valores determinados no experimento, percebe-se a similaridade do comportamento sortivo do P e do Si. Essa similaridade do comportamento sortivo está representada pelos valores do aumento da adsorção do Si, representado pelo aumento dos valores do P rem e dessorção (sorção) do P representado pela diminuição dos valores da CMAP.

Devido ao alto teor de Fe do LVj, há um fator importante, que pode vir a interferir a eficiência da adsorção do Si da sílica ativa aos componentes do solo que é o fato de a sílica ativa em solução, apresentar valores de pH médio da ordem de 8,2. Assim o Fe ao se aproximar do Si, com este nível de pH, pode estar precipitando e encapsulando a molécula de Si, dificultando a ação do efeito de bloqueio do P. A sílica ativa possui finíssimas partículas e o contato com a água diariamente durante as irrigações dos vasos, permitiu com que a solubilidade do SiO₂ da sílica ativa se pronunciasse na solução do solo favorecendo a reação de adsorção do Si à superfície dos minerais de argila, por precipitação dos óxidos de Fe, ou até mesmo por reações de substituição isomórficas, e em função do Si solúvel da sílica ativa apresentar valor médio de pH em água acima de 8,0, fatores que favorecem o bloqueio da adsorção do fósforo.

3.2. Análises Estatísticas

A análise estatística foi realizada com o objetivo de avaliar os efeitos das doses dentro de cada uma das combinações de solo e tempo, por meio da regressão, uma vez que dose é fator quantitativo. Os desdobramentos das combinações foram: dose *versus* solo; solo *versus* tempo; dose *versus* tempo e dose *versus* solo *versus* tempo. Os efeitos foram avaliados estatisticamente significativos quando $p < 0,10$. Sendo dose um fator quantitativo, também foram feitos os desdobramentos dos Graus de liberdade de dose em efeito. Foram avaliados o efeito linear, o efeito quadrático, e o efeito cúbico.

Tabela 16 – Quadro da ANOVA para o experimento. Modo 1 de Aplicação – Sílica ativa em Pó seco direto ao solo

Fonte de Variação	GL	PREM_SQ	PREM_QM	PREM_F	PREM_p	CMAP_SQ	CMAP_QM	CMAP_F	CMAP_p
Solo	1	208,968	208,968	70,635	0,000000	520212	520212	79,32	0,000000
Dose	9	46,240	5,138	1,737	0,094134	110864	12318	1,88	0,067129
tempo	1	56,359	56,359	19,050	0,000038	125377	125377	19,12	0,000037
Dose*Solo	9	53,140	5,904	1,996	0,050406	150307	16701	2,55	0,012625
Solo*tempo	1	21,971	21,971	7,427	0,007892	33235	33235	5,07	0,027122
Dose*tempo	9	18,585	2,065	0,698	0,708794	34430	3826	0,58	0,807096
Dose*Solo*tempo	9	50,450	5,606	1,895	0,064491	119388	13265	2,02	0,047193
Error	80	236,674	2,958			524683	6559		
Total	119	692,387				32572504			
<i>Efeito de Dose dentro do Solo 1 e Tempo = 15 dias</i>	9	48,138	5,349	1,8079	0,079477	126718	14080	2,1468	0,034693
<i>Efeito de Dose Linear</i>	1	14,440	14,440	4,8810	0,030014	44902	44902	6,8464	0,010616
<i>Efeito de Dose Quadratico</i>	1	2,604	2,604	0,8801	0,350987	4303	4303	0,6560	0,420368
<i>Efeito de Dose Cúbico</i>	1	9,531	9,531	3,2217	0,076446	28686	28686	4,3738	0,039669
<i>Desvios da Regressão</i>	6	21,563	3,5938	1,2148	0,307452	48828	8138	1,2408	0,294530
<i>Efeito de Dose dentro do Solo 1 e Tempo = 30 dias</i>	9	76,251	8,472	2,8638	0,005584	125997	14000	2,1346	0,035765
<i>Efeito de Dose Linear</i>	1	20,525	20,525	6,9378	0,010129	47855	47855	7,2966	0,008431
<i>Efeito de Dose Quadratico</i>	1	6,750	6,750	2,2815	0,134868	12778	12778	1,9484	0,166624
<i>Efeito de Dose Cúbico</i>	1	2,691	2,691	0,9097	0,343076	1075	1075	0,1639	0,686631
<i>Desvios da Regressão</i>	6	46,285	7,7142	2,6075	0,023263	64288	10715	1,6337	0,148637
<i>Efeito de Dose dentro do Solo 2 e Tempo = 15 dias</i>	9	31,8798	3,5422	1,1973	0,308399	128701	14300	2,1804	0,031901
<i>Efeito de Dose Linear</i>	1	6,0188	6,0188	2,0345	0,157660	23296	23296	3,5520	0,066756
<i>Efeito de Dose Quadratico</i>	1	6,1089	6,1089	2,0649	0,154622	27102	27102	4,1324	0,048745
<i>Efeito de Dose Cúbico</i>	1	6,6128	6,6128	2,2353	0,138828	20406	20406	3,1114	0,085382
<i>Desvios da Regressão</i>	6	13,139	2,1899	0,7402	0,618817	57897	9649	1,4713	0,212721
<i>Efeito de Dose dentro do Solo 2 e Tempo = 30 dias</i>	9	12,147	1,350	0,4562	0,899414	33573	3730	0,5688	0,818756
<i>Efeito de Dose Linear</i>	1	0,482	0,482	0,1628	0,687683	1317	1317	0,2008	0,655315
<i>Efeito de Dose Quadratico</i>	1	0,123	0,123	0,0415	0,839156	95	95	0,0145	0,904300
<i>Efeito de Dose Cúbico</i>	1	0,780	0,780	0,2636	0,609069	1375	1375	0,2096	0,648340
<i>Desvios da Regressão</i>	6	10,763	1,7938	0,6063	0,724503	30786	5131	0,7823	0,586242

Células em cor verde Significativo para $P < 0,10$.

Tabela 17 – Quadro da ANOVA para o experimento. Modo 2 de Aplicação – Sílica ativa suspensão em água e direto ao solo.

Fonte de Variação	GL	PREM_SQ	PREM_QM	PREM_F	PREM_p	CMAP_SQ	CMAP_QM	CMAP_F	CMAP_p
Dose	5	35,643	7,129	1,6595	0,182800	70717	14143	1,936	0,125491
tempo	1	146,782	146,782	34,1699	0,000005	283297	283297	38,775	0,000002
Dose*tempo	5	21,597	4,319	1,0055	0,435858	39742	7948	1,088	0,392318
Error	24	103,096	4,296			175350	7306		
Total	35	307,118				4221149			
<i>Desdobrando a Interação DosexTempo, efeito de Dose x tempo</i>									
<i>Modo =2 e Solo=1</i>									
<i>Efeito de Dose dentro do Solo=1 e Tempo=15 dias</i>	5	4,5762	0,9152	0,2131	0,953592	14185	2837	0,3883	0,851884
<i>Efeito de Dose Linear</i>	1	0,0082	0,0082	0,0019	0,965448	19	19	0,0026	0,959872
<i>Efeito de Dose Quadrático</i>	1	0,7857	0,7857	0,1829	0,672699	2729	2729	0,3735	0,546832
<i>Efeito de Dose Cúbico</i>	1	3,6190	3,6190	0,8425	0,367823	10472	10472	1,4333	0,242922
<i>Desvios da Regressão</i>	2	0,1633	0,0816	0,0190	0,981188	965	482	0,0660	0,936281
<i>Efeito de Dose dentro do Solo=1 e Tempo=30 dias</i>	5	52,664	10,533	2,4520	0,062548	96274	19255	2,6354	0,049037
<i>Efeito de Dose Linear</i>	1	23,093	23,093	5,3759	0,029254	5458	5458	0,7470	0,395972
<i>Efeito de Dose Quadrático</i>	1	27,880	27,880	6,4904	0,017670	368	368	0,0503	0,824425
<i>Efeito de Dose Cúbico</i>	1	1,282	1,282	0,2984	0,589960	3287	3287	0,4499	0,508771
<i>Desvios da Regressão</i>	2	0,4090	0,2045	0,0476	0,953598	87161	43581	5,9648	0,007890
<i>Modo = 2 e Solo =2</i>									
Fonte de Variação	GL	PREM_SQ	PREM_QM	PREM_F	PREM_p	CMAP_SQ	CMAP_QM	CMAP_F	CMAP_p
Dose	4	9,5153	2,3788	1,5098	0,237166	73993	18498	2,729	0,058153
tempo	1	35,3860	35,3860	22,4594	0,000126	201979	201979	29,799	0,000024
Dose*tempo	4	8,3069	2,0767	1,3181	0,297349	75556	18889	2,787	0,054558
Error	20	31,5112	1,5756			135560	6778		
Total	29	84,7194				2754128			
<i>Desdobrando a Interação DosexTempo, efeito de Dose x tempo</i>									
<i>Modo=2 e Solo=2</i>									
<i>Efeito de Dose dentro do Solo=2 e Tempo=15 dias</i>	4	11,9581	2,9895	1,8974	0,150301	133608	33402	4,9280	0,006260
<i>Efeito de Dose Linear</i>	1	0,0005	0,0005	0,0003	0,986484	12005	12005	1,7711	0,198218
<i>Efeito de Dose Quadrático</i>	1	9,3657	9,3657	5,9444	0,024220	2975	2975	0,4390	0,515177
<i>Efeito de Dose Cúbico</i>	1	0,1094	0,1094	0,0694	0,794847	326	326	0,0481	0,828694
<i>Desvios da Regressão</i>	1	2,4825	2,4825	1,5756	0,223863	118302	118302	17,4538	0,000464
<i>Efeito de Dose dentro do Solo=2 e Tempo=30 dias</i>	4	5,8641	1,4660	0,9305	0,466187	15942	3985	0,5880	0,675099
<i>Efeito de Dose Linear</i>	1	1,9195	1,9195	1,2183	0,282795	186	186	0,0274	0,870188
<i>Efeito de Dose Quadrático</i>	1	1,1319	1,1319	0,7184	0,406698	114	114	0,0168	0,898183
<i>Efeito de Dose Cúbico</i>	1	0,0227	0,0227	0,0144	0,905744	18	18	0,0027	0,959414
<i>Desvios da Regressão</i>	1	2,7901	2,7901	1,7708	0,198252	15624	15624	2,3051	0,144596

Células em cor verde Significativo para P<0,10.

Para amostras de um LVwf que tiveram tempo de incubação de 15 dias, com aplicação de sílica ativa diretamente ao solo, no modo de aplicação 1 (sólido seco), o efeito de redução da adsorção do P foi significativo com aumento do P rem e diminuição da CMAP. As amostras de um LVwf com tempo de incubação de 30 dias, aplicadas diretamente ao solo, no modo de aplicação 1, o efeito de redução da adsorção do P foi significativo tanto para o aumento do P rem como para a diminuição da CMAP, nas doses de sílica ativa dos tratamentos.

Já para amostras de um LVj com tempo de incubação de 15 dias, aplicadas diretamente ao solo, no modo de aplicação 1, o efeito de redução da adsorção do P foi não significativo para aumento do P rem e significativo para a diminuição da CMAP. As amostras de um LVj com tempo de incubação de 30 dias, aplicadas diretamente ao solo, no modo de aplicação 1, o efeito de redução da adsorção do P foi não significativo para o aumento do P rem e diminuição da CMAP, nas doses de sílica ativa dos tratamentos.

No modo de aplicação 2, sílica ativa suspensa em água, aplicada diretamente ao solo para os dois solos LVwf e LVj e nos dois tempos de incubação que foram de 15 e 30 dias, estatisticamente não tiveram resposta ao efeito de alteração do P rem e CMAP, de acordo com a tabela 24 quadro da ANOVA.

Para os tratamentos, utilizando-se a média, observa-se um aumento do P rem e diminuição da CMAP, ou seja, uma alteração matemática clara. O solo mesmo que na forma de pequenos corpos, formando pequenos ambientes, sob condições controladas, como é o caso do experimento, as respostas físico-químicas das reações ocorridas são pertinentes às condições que aquele microambiente oferece. Cada dose do tratamento impõe condições diferentes e únicas de um para outro vaso nas três repetições de cada tratamento, configurando uma grande variação de respostas, fatores que acabam afetando os dados, assim como um grande intervalo de valores das doses como por exemplo no modo de aplicação 1, onde temos o tratamento testemunha (0 t.ha^{-1}) e o subsequente é 3 t.ha^{-1} , não havendo entre 0 e 3 tratamentos com dosagens menores e no modo de aplicação 2, além de se ter um número menor de tratamentos por tipo de solo, tem-se para um LVj um intervalo ainda maior entre as doses que é de 0 t.ha^{-1} e o subsequente 5 t.ha^{-1} , o que acaba gerando resultados que não tenham significância estatística, apesar dos dados matemáticos serem satisfatórios. Essas variações são naturais das dinâmicas dos compostos no ambiente da solução do solo, e possivelmente são fatores resultantes de grande variação de resultados impedindo que a análise estatística identificasse um número maior de diferenças significativas.

4. CONCLUSÕES

Os solos Latossolo Vermelho Acriférrico típico e o Latossolo Vermelho Perférrico típico, previamente escolhido e que receberam as doses estabelecidas pelo delineamento do resíduo siderúrgico sílica ativa, apesar das condições oxídicas que normalmente esta classe de solo tem, assim como a maioria dos solos de clima tropical mais brandamente, característica típica de solos altamente intemperizados, tiveram em ambas as formas de aplicação, a adsorção de fosfato bloqueada pelo Si da sílica ativa, com maior ou menor intensidade para este efeito, verificado nas elevações dos teores de fósforo remanescente e diminuição da capacidade máxima de adsorção de fósforo.

A sílica ativa é um subproduto da produção do silício metálico, uma variedade amorfa de sílica, composta basicamente de dióxido de silício de elevada pureza, esta sendo na ordem de 98% quando é produzido silício metálico grau metalúrgico. A avaliação das características físico-químicas da sílica ativa mostrou-se um material volumoso, aparentemente muito poroso, apresentando uma capacidade de retenção de água 23 vezes maior que o material de quartzo em sua forma natural, podendo reter até 67% do seu peso em água, bem como apresenta alta área superficial específica, proporcionando a este material uma ótima capacidade reativa, que aliados às características físicas também o coloca com um possível condicionador de solo, na manutenção da água por mais tempo, significando a redução de stress hídrico às plantas cultivadas.

A sílica ativa utilizada como bloqueadora da adsorção do fosfato na solução do solo mostrou-se eficiente, de acordo com os resultados estipulados de P rem e CMAP, mostrando que tem eficiência reativa na solução do solo que seja por se adsorver em sítios não ocupados pelo fosfato, quer seja deslocando fósforo dos sítios de adsorção, deixando fósforo prontamente disponível para as plantas cultivadas.

Sugere-se que as pesquisas com este material continuem a serem feitas para que se possa entender melhor a dinâmica do silício no solo, e como essa dinâmica físico-química pode alterar as propriedades da solução do solo, visando o uso na agricultura.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ABRAHÃO, W. A. P. et al. **Banco de solos do estado de Minas Gerais, Monolitos: Descrição dos Perfis**. 1ª. ed. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, v. I, 2016. ISBN CDU: 631.472.
- ALCARDE, J. C. **Conceitos da acidez do solo: Características e interpretações técnicas**. 2ª. ed. São Paulo: ANDA, v. BT6, 1992.
- ALMEIDA, D. P. C.; ZARONI, J.; SANTOS, H. G. D. Ageitec - Agencia Embrapa de Informação Tecnológica. **EMBRAPA**, 2005. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_1_2212200611535.html>. Acesso em: 26 junho 2020.
- BAHIA FILHO, A. F. C. **Índice de disponibilidade de fósforo em latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas**. 1ª. ed. Viçosa MG: Universidade Federal de Viçosa, v. I, 1982. 221-226 p.
- BAPTISTA, M. C. **Estatigrafia e evolução geológica da região de lagoa formosa, MG**. 1ª. ed. Belo Horizonte: RIGeo, v. I, 2004. 116 p p. <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/234>.
- BRAIT, M. A. H. **Interação silício e fósforo na adsorção desses elementos em diferentes solos de cerrado**. 1ª. ed. Jataí: UFG, v. I, 2008. Dissertação apresentada à UFG.
- BRANCO, P. D. M. Serviço Geológico do Brasil - CPRM. **CPRM - Geocientífico - Os solos**, 18 agosto 2014. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Os-Solos-2620.html>>. Acesso em: 26 junho 2020.
- CAPUANI, S. **Formas d fósforos em solos oxídicos em função de corretivos da acidez do solo, fontes de fósforo e plantas de cobertura**. 1ª. ed. Botucatu: Grafica Color, v. I, 2017. 125P p. ISBN C255F.
- CARNEIRO, M. A. **Complexo metamórfico Bonfim setentrional (Quadrilátero Ferrífero, MG) litoestatigrafia e evolução geológica de segmento de crosta continental do arqueano**. 1ª. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo - USP, v. I, 1992. ISBN 10.11606/T.44.1992.tde-18112015-104751. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectonia).
- CARVALHO, G. D. **INTERAÇÃO ENTRE FÓSFORO, SILÍCIO E ENXOFRE EM UM LATASSOLO E BIODISPONIBILIZAÇÃO DE FÓSFORO DE FONTES DE BAIXA SOLUBILIDADE POR PROCESSOS DE COMPOSTAGEM**. 1ª. ed. VIÇOSA: GRAFICA DA UFV, v. I, 2014. 57 p. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO.
- COSTA, L. M. D. et al. **Silício na Agricultura - Anais do V Simpósio Brasileiro sobre Silício na Agricultura**. 1ª. ed. Viçosa: Suprema Gráfica e Editora Ltda., v. I, 2010. 89-91 p. ISBN 978-85-60249-59-6.
- DIAS, C. EMBRAPA - Notícias. **EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, 30 abril 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/33747073/brasil-adicionou-228-milhoes-de-toneladas-de-fosforo-em-seus-solos-nos-ultimos-50-anos>>. Acesso em: 02 setembro 2020.

DORR, V. N. **Physiographic, statigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** 1ª. ed. Washington: United States Government Printing Office, v. I, 1969. 117 p p.

LÓPEZ-HERNÁNDES, D.; BURNHAM, C. P. The effect of pH on phosphate adsorption in soils. **Journal of Soil Science**, Caracas, v. 25, n. 2, p. 207-216, 1974. ISSN 10.1111 / j. 1365-2389.1974.tb1117.x.

MACHADO, H. A. **Coureaças ferruginosas e solos associados em diferentes ambientes do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil.** 1ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. I, 2018.

MATICHENKOV, V. V.; BOCHARNIKOVA, E. A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDORFER, G. H. **Silicon in Agriculture.** 1ª. ed. [S.l.]: Elsevier Sci, v. 8, 2001. Cap. 13, p. 209-219. ISBN 978-0080541228. Capítulo 13 do livro Studies in plant science volume 8 - Vários autores.

MCKEAGUE, J.; CLINE, M. Silica in soil solutions: II. The adsorption of monosilicic acid by soil and by other substances. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 43, n. 1, p. 83-96, 1 janeiro 1963. ISSN 10.4141/cjss63-011.

MCPHAIL, M.; PAGE, A.; BINGHAM, F. Adsorption Interactions of Monosilicic and Boric Acid on Hydrous Oxides of Iron and Aluminium. **Soil Science Society of America Journal**, v. 36, n. 3ª, p. 51-514, 1 maio 1972. ISSN doi: 10.2136 / sssaj1972.03615995003600030039x.

MELO, V. D. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia dos solos - Parte II - Aplicações.** 1ª. ed. Viçosa: SBCS - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. II, 2009. 381-447 p. ISBN 978-85-86504-05-1.

MOTTA, P. E. F. D.; BARUQUI, A. M.; SANTOS, H. G. D. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da Região do Alto Paranaíba, MG.** 1ª. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS, v. I, 2004. 144 p p. ISBN 1678-0884. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento nº 44.

NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo.** 1ª. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. I, 2007. 485-496 p. ISBN 978-85-86504-08-2. Capítulo VIII - Fósforo.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condição tropicais.** 1ª. ed. Viçosa: Univercidade Federal de Viçosa, v. I, 1999. p.399 p.

OLIVEIRA, M. G. D. A. **Determinação adsorção e deslocamento recíproco de silício e fósforo em Latossolos do Triângulo Mineiro.** Viçosa: Editora da Universidade Federal de Viçosa, v. I, 1984. 68P p. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa - Programa de Pós Grduação em Solos e Nutrição de Plantas.

RAIJ, B. V. **Avaliação da fertilidade do solo.** 1ª. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, v. I, 1981. 95-106 p. Capítulo 7.

RAPOSO, F. O. **Formações ferríferas e metassedimentos químicos de áreas selecionadas do Quadrilátero Ferrífero e suas relações com níveis rudáceos.** 1ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. I, 1996. 86p p. Dissertação de Mestrado.

RESENDE, A. V. D.; NETO, A. E. F. **Aspectos relacionados à adubação fosfatada em solos do cerrado**. 1ª. ed. Planaltina: Serviço Gráfico EMBRAPA Cerrado, v. I, 2007. 01-52 p. ISBN 1517-5111.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 345-354, fevereiro 2000.

SANTOS, H. G. D. et al. **Sistema brasileiro de Classificação de Solo**. 3ª. ed. Brasília: EMBRAPA, v. I, 2013. 353p p. ISBN 978-85-7035-198-2.

SANTOS, R. D. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7ª. ed. Viçosa: Cromosete Gráfica e Editora, v. I, 2015. 101p p. ISBN 978-85-86504-03-7. Edição revisada e ampliada.

SANYAL, S.; DE DATTA, S. **Chemistry of phosphorus transformation in soil**. New York: Springer, v. 16, 1991. 1-120 p. ISBN 978-1-4612-3144-8. In: Stewart BA (eds) *Advances in Soil Science*. *Advances in Soil Science* - https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3144-8_1.

SEER, H. J.; MORAES, L. C. D.; FOGAÇA, A. C. C. **Roteiro geológico para a região de Lagoa Formosa - Chumbo - Carmo do Paranaíba - MG**. 1ª. ed. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, v. I, 1989. 58 p p. 9º Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia.

SOUZA, A. E. D.; FONSECA, D. S. Agência Nacional de Mineração. **Site da Agencia Nacional de Mineração**, 14 jun 2017. ISSN ISBN. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-2-fosfato>>. Acesso em: 14 ago 2019. Não consta ISBN.

SOUZA, L. F. T. D. **Modelagem de processos erosivos em área de contatos geológicos no Alto Paranaíba**. 1ª. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, v. I, 2017. 6-10 p. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade federal de Viçosa.

VARAJÃO, C. A. C. et al. Estudo da Evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais) por meio da mensuração das taxas de erosão (10Be) e da pedogênese. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Ouro Preto, v. XXXIII, n. 5ª, p. 1409-1425, maio 2009.

WALKER, T.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, Amsterda, v. 15, n. 1ª, p. 1-19, janeiro 1976. ISSN DOI 10.1016/0016-7061(76)90066-5.

WITHERS, P. J. A. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Nature/Scientific Reports**, Jaboticabal, v. VIII, n. 1ª, p. 1-13, 07 fevereiro 2018. ISSN PMID: 29416090.

ZARONI, M. J.; SANTOS, H. G. D.; CLEMENTE, E. D. P. Ageitec - Agencia Embrapa de Informação Tecnológica. **EMBRAPA**, 2005. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn362j9v02wx5ok0liq1mqy0jc9b7.html>. Acesso em: 22 junho 2020.

ANEXO

Tabelas dos teores de P rem e CMAP determinados em análise laboratoriais conforme definido pelos tratamentos do delineamento do experimento.

LVwf - modo de aplicação 1

Tabela 1 – Resultados P rem para o período de incubação de 15 dias .

Repetições	Dosagens sílica ativa									
	0	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	t.ha ⁻¹									
Fósforo remanescente (P rem)										
mg.L ⁻¹										
R1	5,3498	5,8339	9,4650	6,3181	6,3181	6,0760	8,9809	7,5284	7,0443	6,5602
R2	6,8022	7,0443	7,5284	8,7388	7,0443	10,1912	8,3757	8,3757	8,1336	7,6495
R3	6,1970	3,0501	5,3498	6,3181	6,0760	12,9751	8,3757	6,0760	11,2806	6,8022
Média	6,1163	5,3094	7,4477	7,1250	6,4795	9,7474	8,5774	7,3267	8,8195	7,0040

Tabela 2 – Resultados - CMAP para o período de incubação de 15 dias.

Repetições	Dosagens sílica ativa									
	0	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	t.ha ⁻¹									
Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)										
mg.kg ⁻¹										
R1	1189,3	1157,0	976,1	1127,2	1127,2	1141,8	995,7	1061,7	1086,5	1113,1
R2	1099,6	1086,5	1061,7	1006,0	1086,5	948,5	1021,8	1021,8	1032,8	1055,7
R3	1134,4	1399,3	1189,3	1127,2	1141,8	858,2	1021,8	1141,8	910,5	1099,6
Média	1141,1	1214,3	1075,7	1086,8	1118,5	982,8	1013,1	1075,1	1009,9	1089,5

Tabela 3 – Resultados P rem para o período de incubação de 30 dias.

Repetições	Dosagens sílica ativa									
	0	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	t.ha ⁻¹									
Fósforo remanescente (P rem)										
mg.L ⁻¹										
R1	8,5477	6,9652	7,3383	13,1841	7,8358	9,8259	11,6915	8,4577	7,7114	8,8308
R2	5,4726	16,4179	7,0692	10,5721	11,0697	11,0697	12,9353	9,7015	8,4577	13,8060
R3	6,5960	5,2239	8,7065	12,8109	6,8408	8,9552	9,9502	9,9502	10,4478	11,4428
Médias	6,8721	9,5357	7,7047	12,1890	8,5821	9,9503	11,5257	9,3698	8,8723	11,3599

Tabela 4 – Resultados - CMAP para o período de incubação de 30 dias.

Repetições	Dosagem sílica ativa									
	0	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	t.ha ⁻¹									
Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)										
mg.kg ⁻¹										
R1	1014,2	1090,7	1071,2	852,3	1046,7	962,1	897,2	1018,2	1052,7	1002,0
R2	1180,9	770,3	1040,8	934,8	917,6	917,6	859,4	966,9	1018,2	835,0
R3	1111,1	1198,2	1007,3	863,0	1097,5	996,8	957,4	957,4	939,2	905,2
Média	1102,1	1019,7	1039,8	883,4	1020,6	958,8	904,7	980,8	1003,4	914,1

LVj – modo d aplicação 1

Tabela 5 – Resultados P rem para o período de incubação de 15 dias.

Repetições	Dosesagem sílica ativa									
	0	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	t.ha ⁻¹									
Fósforo remanescente (P rem)										
mg.L ⁻¹										
R1	4,2650	6,5650	6,0810	6,2020	5,9600	4,8700	5,7180	4,9920	5,4760	4,5070
R2	5,2340	8,1380	8,3810	6,6860	4,5070	4,5070	6,0810	5,8390	4,5070	4,5070
R3	5,1130	8,3810	6,8070	5,2340	5,1130	4,0230	5,2340	5,9600	5,5970	3,9020
Média	4,8707	7,6947	7,0897	6,0407	5,1933	4,4667	5,6777	5,5970	5,1933	4,3053

Tabela 6 – Resultados CMAP para o período de incubação de 15 dias.

Repetições	Dosagem sílica ativa									
	0	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	t.ha ⁻¹									
Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)										
mg.kg ⁻¹										
R1	1274,0	1112,9	1141,5	1134,1	1149,0	1224,5	1164,5	1215,2	1180,6	1253,4
R2	1197,5	1032,6	1021,6	1106,0	1253,4	1253,4	1141,5	1156,6	1253,4	1253,4
R3	1206,3	1021,6	1099,3	1197,5	1206,3	1295,9	1197,5	1149,0	1172,5	1307,3
Média	1225,9	1055,7	1087,5	1145,9	1202,9	1257,9	1167,8	1173,6	1202,2	1271,4

Tabela 7 – Resultados P rem para o período de incubação de 30 dias.

Repetições	Dosagens sílica ativa									
	0	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	t.ha ⁻¹									
Fósforo remanescente (P rem)										
mg.L ⁻¹										
R1	5,1000	5,1000	6,4680	6,3430	5,8460	8,2090	10,8210	6,4680	5,8460	5,4730
R2	7,3380	4,7260	5,7210	4,6020	5,4730	6,5920	4,9750	6,3430	8,7060	5,2240
R3	5,3480	5,9700	9,2040	5,8460	5,5970	4,1040	5,7210	4,3530	5,5970	6,7160
Médias	5,9287	5,2653	7,1310	5,5970	5,6387	6,3017	7,1723	5,7213	6,7163	5,8043

Tabela 8 – Resultados CMAP para o período de incubação de 30 dias.

Repetições	Dosagem sílica ativa									
	0	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	t.ha ⁻¹									
Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)										
mg.kg ⁻¹										
R1	1207,2	1207,2	1118,4	1125,7	1156,2	1029,3	926,1	1118,4	1156,2	1180,8
R2	1071,3	1235,7	1164,3	1245,6	1180,8	1111,3	1216,5	1125,7	1007,4	1198,2
R3	1189,5	1148,4	986,6	1156,2	1172,5	1288,4	1164,3	1266,4	1172,5	1104,4
Média	1156,0	1197,1	1089,8	1175,8	1169,8	1143,0	1102,3	1170,2	1112,0	1161,1

LVwf – modo de aplicação 2

Tabela 9 – Resultados P rem para o período de incubação de 15 dias.

Repetições	Dosagens sílica ativa					
	0	3	4	6	8	10
	t.ha ⁻¹					
Fósforo remanescente (P rem)						
mg.L ⁻¹						
R1	5,3498	5,9600	4,7490	8,0170	9,7120	5,4760
R2	6,8022	5,9600	6,8070	5,7460	5,7180	5,2340
R3	6,1970	5,7180	6,0810	6,8070	5,2340	5,7180
Média	6,1163	5,8793	5,8790	6,8567	6,8880	5,4760

Tabela 10 – Resultados CMAP para o período de incubação de 15 dias.

Repetições	Dosagens sílica ativa					
	0	3	4	6	8	10
	t.ha ⁻¹					
Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)						
mg.kg ⁻¹						
R1	1189,3	1149,0	1233,9	1038,2	966,5	1180,6
R2	1099,6	1149,0	1099,3	1162,6	1164,5	1197,5
R3	1134,4	1164,5	1141,5	1099,3	1197,5	1164,5
Média	1141,1	1154,2	1158,2	1100,0	1109,5	1180,9

Tabela 11 – Resultados P rem para o período de incubação de 30 dias.

Repetições	Dosagens sílica ativa					
	0	3	4	6	8	10
	t.ha ⁻¹					
Fósforo remanescente (P rem)						
mg.L ⁻¹						
R1	8,4570	5,9700	11,3180	11,8160	11,3180	8,9550
R2	5,4726	8,4580	12,8110	12,6870	12,4380	14,3030
R3	6,5920	14,6670	9,0800	10,9450	11,6920	6,7160
Médias	6,8405	9,6983	11,0697	11,8160	11,8160	9,9913

Tabela 12 - Valores médios da CMAP estimados pela equação de (NEVES 2018) para 30 dias de incubação LVwf – modo 2.

Repetições	Dosagens sílica ativa					
	0	3	4	6	8	10
	t.ha ⁻¹					
Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)						
mg.kg ⁻¹						
R1	1018,2	1148,4	909,3	893,2	909,3	996,8
R2	1180,9	1018,2	863,0	866,6	874,0	821,8
R3	1111,3	812,2	991,6	921,8	897,2	1104,4
Média	1103,5	992,9	921,3	893,9	893,5	974,3

LVj – modo de aplicação 2

Tabela 13 – Resultados P rem para o período de incubação de 15 dias.

Repetições	Dosagens sílica ativa				
	0	5	7	9	11
	t.ha ⁻¹				
Fósforo remanescente (P rem)					
mg.L ⁻¹					
R1	4,2653	3,2970	2,4500	4,7490	4,3860
R2	5,2336	3,6600	1,8450	4,7490	5,2340
R3	5,1126	3,0550	3,7810	4,2650	4,9920
Média	4,8705	3,3373	2,6920	4,5877	4,8707

Tabela 14 – Resultados CMAP para o período de incubação de 15 dias.

Repetições	Dosagens sílica ativa				
	0	5	7	9	11
	t.ha ⁻¹				
Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)					
mg.kg ⁻¹					
R1	1274,0	1370,2	1481,2	1233,9	1263,6
R2	1197,6	1331,2	1587,2	1233,9	1197,5
R3	1206,3	1398,7	1319,1	1274,0	1215,2
Média	1226,0	1366,7	1462,5	1247,3	1225,4

Tabela 15 – Resultados P rem para o período de incubação de 30 dias.

Repetições	Dosagens sílica ativa				
	0	5	7	9	11
	t.ha ⁻¹				
Fósforo remanescente (P rem)					
mg.L ⁻¹					
R1	5,0995	5,2240	8,7060	6,9650	9,9500
R2	7,3383	6,8410	5,1000	5,3480	4,7260
R3	5,3483	4,4780	6,3430	5,2240	6,9650
Médias	5,9287	5,5143	6,7163	5,8457	7,2137

Tabela 16 – Resultados CMAP para o período de incubação de 30 dias.

Repetições	Dosagens sílica ativa				
	0	5	7	9	11
	t.ha ⁻¹				
Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)					
mg.kg ⁻¹					
R1	1207,3	1198,2	1007,4	1090,7	957,5
R2	1071,2	1097,5	1207,2	1189,5	1235,7
R3	1189,5	1255,8	1125,7	1198,2	1090,7
Médias	1156,0	1183,8	1113,4	1159,5	1094,6