

**DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO E NA CULTURA DO MILHO
(*Zea mays*) APÓS A APLICAÇÃO DE CONDICIONADORES DE
SOLO COMO BIOCHAR E ZEÓLITOS**

João Victor Rampi Decker

Relatório final da dissertação reportado à
Escola Superior Agrária
Instituto Politécnico de Bragança
para obtenção do título de mestrado em
Agroecologia

Orientador

Professor Doutor Manuel Ângelo Rodrigues

Co Orientadores

Professora Doutora Margarida Maria P. Arrobas Rodrigues

Professor Doutor Wilson Itamar Godoy

Março 2019

JOÃO VICTOR RAMPI DECKER

**DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO E NA CULTURA DO MILHO
(*Zea mays*) APÓS A APLICAÇÃO DE CONDICIONADORES DE
SOLO COMO BIOCHAR E ZEÓLITOS**

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Agroecologia no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadores:

Prof. Dr. Manuel Ângelo Rosa Rodrigues

Prof. Dr. Margaria Maria P. Arrobas Rodrigues

Prof. Dr. Wilson Itamar Godoy

BRAGANÇA

2019

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Deus, que sempre permaneceu comigo para enfrentar todas as dificuldades e comemorar as conquistas, sempre me iluminou para alcançar o melhor caminho.

Agradeço a minha família, em especial meu pai Reginaldo, minha mãe Rosicler e minha irmã Maria Luiza, que não mediram esforços para que eu fosse atrás dos meus sonhos, sempre me incentivaram e foram a chave da minha motivação. Além de todos meus familiares, que sempre mandaram mensagens de apoio.

Agradeço imensamente aos meus orientadores, professor Doutor Manuel Ângelo Rodrigues e a professora Doutora Margarida Arrobas por terem acreditado no meu trabalho, pelo tempo que sempre disponibilizaram e pelo suporte que me ofereceram desde o início. Agradeço também ao professor Doutor Wilson Itamar Godoy, um grande amigo que ganhei, agradeço as contribuições ao longo deste trabalho, por disponibilizar seu tempo para que este trabalho fosse concluído.

As técnicas de laboratório Rita e Ana que não mediram esforços para que fizéssemos tudo da melhor maneira possível, e mesmo em meio a todos os contratemplos permaneceram firmes para me ajudar.

Agradeço aos amigos que fiz em Bragança ao longo desse ano e aos que ficaram no Brasil, principalmente, aos que me acompanharam durante este período não me deixando desanimar e que me deram força para seguir em frente. E agradeço ao José Carlos, meu parceiro de trabalho, colega de aula e grande amigo pela ajuda, conselhos e incentivo.

Agradeço a Universidade tecnológica Federal do Paraná e ao Instituto Politécnico de Bragança pela oportunidade e aos meus professores, pois sem eles eu não teria chego até aqui.

Por fim, agradeço a todos que de uma forma ou outra colaboraram para o desenvolvimento desta dissertação.

Muito obrigado!

Resumo

No âmbito da fertilização das culturas, um dos grandes desafios do presente é encontrar uma forma racional da utilização de fósforo (P). O P é um elemento essencial a qualquer forma de vida, e está presente em todos os ecossistemas. A quantidade de P presente no solo é muito variável, estando dependente do equilíbrio que se estabelece entre o P sorvido na fase sólida e o P em solução na fase líquida do solo. A utilização de condicionadores de solo está se tornando uma prática cada vez mais usual, devido aos inúmeros benefícios para o solo. O biochar, um dos condicionadores mais utilizados, é composto por uma massa de carbono estabilizada que pode ser obtida através de várias biomassas que são submetidas a decomposição térmica. Outro condicionador que ganha destaque são os zeólitos, minerais aluminosilicatos que se caracterizam pela facilidade de reter e de liberar água e de trocar cátions sem modificar sua estrutura. Nesta experiência foi avaliado o efeito de condicionadores de solo (biochar e zeólitos) e da adubação com fósforo mineral no estado nutricional do milho, produtividade da cultura e na dinâmica do fósforo no solo. Para isso foram instaladas duas experiências, uma em vasos e outra a campo. Na experiência em vasos foram incluídos seis tratamentos em delineamento experimental completamente casualizado: Solo; Solo + Biochar; Solo + Biochar + Fósforo mineral; Solo + Zeólitos; Solo + Zeólitos + Fósforo mineral; Solo + Fósforo mineral. A experiência em campo foi conduzida em delineamento fatorial completo e incluiu dois fatores, condicionadores de solo (biochar, zeólitos e fertilização mineral com P) combinados com quatro doses de P (0, 50, 100 e 200 kg P₂O₅ ha⁻¹). Avaliou-se a composição elementar de folhas e da planta inteira, efetuaram-se leituras NDVI e SPAD, mediu-se a altura das plantas e avaliou-se a produtividade de matéria seca. As características químicas do solo foram determinadas somente no ensaio em vasos. Foi realizado o fracionamento de fósforo Hedley e a atividade da enzima fosfatase ácida. A dose de fósforo não aumentou de forma significativa a produtividade do milho nem os indicadores de estado nutricional. Contudo, aumentou as frações lábeis de fósforo no solo. Os zeólitos parecem ter favorecido a biodisponibilidade de fósforo, quando avaliada pelo método Egner-Riehm, pelas frações mais disponíveis do fracionamento Hedley (resinas de troca e bicarbonato) e a atividade da fosfatase ácida.

Palavras-chave: *Zea mays*; condicionadores de solo, estado nutricional; produção de matéria seca; fracionamento do fósforo.

Abstract

In the field of crop fertilization, one of the major challenges of the present is to find a rational way to use phosphorus (P). P is an essential element to any form of life, and is present in all ecosystems. The amount of P present in the soil is very variable, being dependent on the equilibrium established between the P sorbed in the solid phase and the P in solution in the liquid phase of the soil. The use of soil conditioners is becoming an increasingly common practice due to the numerous benefits to the soil. The biochar, one of the most used conditioners, is composed of a stabilized carbon mass that can be obtained through several biomasses that are submitted to thermal decomposition. Another conditioner that stands out are the zeolites, aluminosilicates minerals that are characterized by the ease of retaining and releasing water and of exchanging cations without modifying its structure. In this experiment, the effect of soil conditioners (biochar and zeolites) and fertilization with mineral phosphorus on maize nutritional status, crop productivity and soil phosphorus dynamics were evaluated. For this, two experiments were installed, one in pots and another in the field. In the experiment in pots, six treatments arranged as a completely randomized experimental design were included: Soil; Soil + Biochar; Soil + Biochar + Mineral phosphorus; Soil + Zeolites; Soil + Zeolites + Mineral phosphorus; Soil + Mineral phosphorus. The field experiment was arranged as a factorial design that included two factors, soil conditioners (biochar, zeolite and mineral fertilization with P) combined with four P rates (0, 50, 100 and 200 kg P₂O₅ ha⁻¹). The elemental composition of leaves and whole plant were evaluated, as well as NDVI and SPAD readings, the height of the plants and the dry matter yield. Soil chemical properties were determined only in the potting test. Hedley phosphorus fractionation and acid phosphatase enzyme activity were performed. P rate did not significantly increase maize productivity or nutritional status of plants. However, it increased the labile fractions of phosphorus in the soil. Zeolites appear to have favored the bioavailability of phosphorus when evaluated by the Egner-Riehm method, by the more readily available P forms of Hedley fractionation (exchange and bicarbonate resins) and acid phosphatase activity.

Palavras-chave: *Zea mays*, soil conditioners, nutritional status, dry matter production and fraction of phosphorus.

Índice

1	Introdução	12
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Geral	14
1.1.2	Específicos	14
2	Referencial teórico	15
2.1	Fósforo na agricultura	16
2.2	Fósforo nas plantas	16
2.3	Fósforo no solo	18
2.4	Fósforo no meio ambiente	21
2.5	Gestão do fósforo em agroecossistemas	23
2.5.1	Fertilização mineral	24
2.5.2	Fertilização orgânica	25
2.6	Uso de condicionadores de solo	26
2.6.1	Biochar	26
2.6.2	Zeólitos	27
2.6.3	Matéria orgânica	28
2.7	A cultura do milho	29
2.7.1	Origem e distribuição	29
2.7.2	Importância econômica	30
2.7.3	Características da cultura	31
3	Materiais e métodos	35
3.1	Caracterização edafoclimáticas	36
3.1.1	Caracterização do clima	36
3.1.2	Caracterização do solo	37
3.2	Caracterização dos condicionadores	38
3.3	Delineamento experimental	39
3.3.1	Ensaio a campo	39
3.3.2	Ensaio em vasos	39
3.4	Técnicas culturais	40
3.4.1	Ensaio a campo	40
3.4.2	Ensaio em vasos	40
3.5	Determinações	41

3.5.1	Análise nos tecidos vegetais.....	41
3.5.2	Análise de solos	42
3.5.3	Mensuração SPAD.....	44
3.5.4	Leituras NDVI.....	44
3.5.5	Produção de biomassa.....	44
3.5.6	Análise estatística	45
4	Resultados	46
4.1	Experiência em vasos.....	47
4.1.1	Parâmetros avaliados no solo	47
4.1.2	Parâmetros avaliados nas folhas	51
4.2	Ensaio de campo.....	55
4.2.1	Parâmetros avaliados nas folhas antes da adubação de cobertura.....	55
4.2.2	Parâmetros avaliados na planta inteira.....	58
5	Discussão	62
6	Conclusão	66
7	Referências	68

Lista de figuras

FIGURA 1. AS TRANSFORMAÇÕES DO FÓSFORO NO SOLO, COM AS FRAÇÕES AVALIÁVEIS EM ESQUEMAS DE FRACIONAMENTO	19
FIGURA 2. PRINCIPAIS PRODUTORES DE MILHO DO MUNDO.....	30
FIGURA 3. IMAGENS DOS ENSAIOS, QUINTA DO POULÃO (A) E ESTUFAS (B).	36
FIGURA 4. PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA MÉDIA DO AR MENSIS NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE BRAGANÇA ENTRE JANEIRO E DEZEMBRO DE 2018.....	37
FIGURA 5. MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM RESPOSTA AO USO DE CONDICIONADORES E DOSES DE FÓSFORO.	48
FIGURA 6. FÓSFORO NO SOLO EM RESPOSTA AO USO DE CONDICIONADORES E DOSES DE FÓSFORO.....	49
FIGURA 7. PI-RES, PI-BIC E PI-LÁBIL NO SOLO EM RESPOSTA AO USO DE CONDICIONADORES E DOSES DE FÓSFORO.....	50
FIGURA 8. FOSFATASE ÁCIDA NO SOLO EM RESPOSTA AO USO DE CONDICIONADORES E DOSES DE FÓSFORO.....	51
FIGURA 9. ALTURA DAS PLANTAS AOS 69 E 83 DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) EM RESPOSTA AO USO DE CONDICIONADORES E DOSES DE FÓSFORO.	52
FIGURA 10. CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO NAS FOLHAS EM RESPOSTA AO USO DE CONDICIONADORES E DOSES DE FÓSFORO.	54
TABELA 11. CONCENTRAÇÃO DE N, P, K, Ca E Mg NAS FOLHAS EM RESPOSTA AO USO DOSES DE FÓSFORO E CONDICIONADORES.	57
FIGURA 11. PRODUTIVIDADE DO MILHO EM RESPOSTA AO USO DE CONDICIONADORES E DOSES DE FÓSFORO.....	61

Lista de tabelas

TABELA 1. EXTRAÇÃO MÉDIA DE NUTRIENTES PELA CULTURA DO MILHO DESTINADO A PRODUÇÃO DE SILAGEM EM DIFERENTES NÍVEIS DE PRODUTIVIDADE.	33
TABELA 2. EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE MACRONUTRIENTES E MICRONUTRIENTES PELA CULTURA DO MILHO EM FUNÇÃO DA PRODUTIVIDADE ATINGIDA	33
TABELA 3. ALGUMAS PROPRIEDADES DO SOLO ANTES DA INSTALAÇÃO DOS ENSAIOS NOS VASOS E NA QUINTA STª APOLÔNIA NA PROFUNDIDADE 0-20 CM.	38
TABELA 4 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS CONDICIONADORES DE SOLO UTILIZADOS NESTE ESTUDO	38
TABELA 5. PH, K ₂ O E B NO SOLO EM RESPOSTA AO USO DE DOSES DE FÓSFORO E CONDICIONADORES.	47
TABELA 6. COMPLEXO DE TROCAS DO SOLO EM RESPOSTA AO USO DOSES DE FÓSFORO E CONDICIONADORES..	48
TABELA 7. LEITURAS DE NDVI E SPAD EM RESPOSTA AO USO DOSES DE FÓSFORO E CONDICIONADORES.	52
TABELA 8. CONCENTRAÇÃO DE N, K, CA E MG DAS FOLHAS EM RESPOSTA AO USO DOSES DE FÓSFORO E CONDICIONADORES.	53
TABELA 9. CONCENTRAÇÃO DE B, FE, MN, ZN E CU NAS FOLHAS EM RESPOSTA AO USO DOSES DE FÓSFORO E CONDICIONADORES.	55
TABELA 10. LEITURAS SPAD E NDVI EM RESPOSTA AO USO DOSES DE FÓSFORO E CONDICIONADORES..	56
TABELA 11. CONCENTRAÇÃO DE N, P, K, CA E MG NAS FOLHAS EM RESPOSTA AO USO DOSES DE FÓSFORO E CONDICIONADORES.	57
TABELA 12. CONCENTRAÇÃO DE B, FE, MN ZN E CU NAS FOLHAS EM RESPOSTA AO USO DOSES DE FÓSFORO E CONDICIONADORES..	58
TABELA 13. CONCENTRAÇÃO DE N, P, K, CA E MG NA PLANTA INTEIRA EM RESPOSTA AO USO DOSES DE FÓSFORO E CONDICIONADORES..	59
TABELA 14. CONCENTRAÇÃO DE B, FE, MN, ZN E CU NAS FOLHAS EM RESPOSTA AO USO DOSES DE FÓSFORO E CONDICIONADORES.	60



1 Introdução

A produção de alimentos está diretamente associada à disponibilidade de fósforo, sendo a prática agrícola, responsável pelo consumo de 90% de todo fósforo extraído. Estima-se que em meados de 2050 a demanda mundial de fósforo duplique, sendo que alguns estudos apontam que poderá ocorrer um pico na produção de fertilizantes fosfatados nos próximos 30 anos e um esgotamento das reservas mundiais de rochas fosfáticas nos próximos 50-100 anos.

O fósforo é crucial no metabolismo das plantas, desempenhando papel importante na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese. É também componente estrutural dos ácidos nucleicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídios.

O uso de condicionadores do solo representa uma alternativa para a melhoria das propriedades físicas, químicas e/ou a atividade biológica do solo. O conceito de condicionadores envolve a aplicação de materiais aos solos para modificar favoravelmente estas propriedades. A natureza desses condicionadores é muito variável e engloba desde material natural orgânico e material natural inorgânico até produtos sintéticos industrializados.

O biochar é um condicionador obtido a partir de diversas biomassas, como estrume, madeira ou folhas, que são submetidas a um ambiente anóxico, e a decomposição térmica destes materiais. Após isto obtém-se um produto com altos índices de porosidade, além de manter características do seu material de origem que auxiliam na estabilização de componentes do solo.

Dentre os condicionadores naturais, os zeólitos se destacam pois possuem alta capacidade de troca de cátions, alta capacidade de retenção de água livre nos canais e a alta habilidade na captura de íons, isto conferem-lhes grande interesse para uso na agricultura. Principalmente por melhorar a eficiência do uso de nutrientes, diminuir as perdas de nitrogênio e auxiliar na solubilização do fósforo.

O milho é uma das culturas mais importantes mundialmente, seja do ponto de vista econômico, seja do ponto de vista social. Destaca-se por ser uma das culturas mais produzidas no mundo. No contexto agrícola português, o milho é uma das culturas mais importantes, sendo a que mais explorações agrícolas envolve. Pode ser associada quer à produção de silagem a qual é de excelente qualidade, quer à produção de grão, afirmando-se atualmente como uma cultura com enorme potencialidade produtiva da agricultura portuguesa de regadio, tendo um contributo importante para a vitalidade das economias regionais e nacional.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O objetivo geral consiste em avaliar a influência da aplicação de condicionadores (biochar e zeólitos) e doses de fósforo mineral na dinâmica do fósforo no solo e na planta de milho (*Zea mays* L.) usada como bioindicadora da disponibilidade de fósforo no solo.

1.1.2 Específicos

- Avaliar o efeito do uso de condicionadores de solo e da aplicação de fósforo mineral no estado nutricional da planta de milho;
- Avaliar a dinâmica do fósforo no solo, através da determinação das formas biodisponíveis;
- Verificar se ocorre interação significativa entre os condicionadores e a aplicação de fósforo mineral na produtividade do milho.



2 Referencial teórico

2.1 Fósforo na agricultura

O fósforo é um elemento muito importante na agricultura. Não há outro elemento químico que substitua sua função nas plantas e, por isso, a garantia da disponibilidade deste elemento é imprescindível para manter a produção mundial de alimentos. Isto torna o fósforo um dos elementos mais importantes para a sociedade atual (Pantano *et al.*, 2016). A escassez de fósforo está estritamente relacionada à segurança alimentar global, uma vez que 90% da demanda mundial deste elemento é destinada para a produção de fertilizantes (Ryan *et al.*, 2012).

A matéria prima utilizada para fabricação da maioria dos fertilizantes fosfatados provém de jazidas situadas em diversos locais do globo, que constituem um recurso natural de fósforo limitado. Tal como acontece com outros recursos naturais, como o petróleo e o carvão, a avaliação das reservas é repleta de incertezas. A estimativa de duração das reservas mundiais de fósforo em rocha de fosfato de alta qualidade é menos de 100 anos com a atual taxa de consumo (Ryan *et al.*, 2012).

Estas jazidas de fósforo dizem respeito a depósitos de origem sedimentar, ígnea ou biogénica. Os dois primeiros são os mais importantes sob o ponto de vista económico. Os depósitos de origem sedimentar localizam-se principalmente nos Estados Unidos da América (EUA), Sudeste do México, Marrocos, Noroeste do Saara e Médio Oriente e os de origem ígnea na África do Sul, Rússia, Finlândia e Brasil. EUA, Marrocos e Rússia possuem cerca de 6% das reservas fosfatadas mundiais (Horta e Torrent, 2010).

Existem vários estudos sobre fósforo, pois não há nutriente para substituir suas funções na planta e suas reversas estão se esgotando. Pode ser considerado um desafio de sustentabilidade para o século XXI (Cordell e Neset, 2014).

2.2 Fósforo nas plantas

A concentração de fósforo nos tecidos das plantas situa-se entre 0,1 e 0,5%, sendo consideravelmente menor quando comparada com nitrogênio e potássio. As plantas conseguem absorver fósforo na forma de dihidrogenofosfato (H_2PO_4^-) ou ácido fosfórico (HPO_4^{2-}) dependendo do pH do solo (Stevenson e Cole, 1999). O fósforo é rapidamente absorvido pelas raízes por intermédio de um transportador $\text{H}^+-\text{HPO}_4^{2-}$ do tipo simporte e incorporado em uma variedade de compostos orgânicos, incluindo açúcares fosfatos, fosfolipídios e nucleotídeos (Peres, 2004).

O fósforo está envolvido em diversos processos do crescimento da planta. As funções mais importantes centram-se no armazenamento e transferência de energia. Adenosina difosfato (ADP) e adenosina trifosfato (ATP) agem como moeda energética no metabolismo das plantas. Quando a molécula terminal de fosfato ($H_2PO_4^-$) de ADP ou ATP é separada, uma grande quantidade de energia química é liberada, energia esta que foi obtida através do processo de fotossíntese e armazenada em compostos de fosfato para ser utilizada no crescimento e reprodução (Stevenson e Cole, 1999; Havlin *et al.*, 2014).

A transferência de energia envolvendo ATP é conhecida como fosforilação, sendo que nesta reação ATP é convertido em ADP, sendo essas moléculas formadas e regeneradas somente na presença de fósforo (Havlin *et al.*, 2005). A molécula de ATP é o principal fosfato rico em energia requerido para iniciar a síntese de novos compostos (Marschner, 2012).

A fosforilação é mediada por proteínas quinases que podem ativar, desativar ou provocar mudanças nas propriedades alostéricas da proteína alvo. A PEP (fosfoenolpiruvato) carboxilase é uma das enzimas chave reguladas pela fosforilação (Marschner, 2012; Havlin *et al.*, 2014).

A função do fósforo como componente das estruturas macromoleculares é mais proeminente nos ácidos nucleicos, como o ácido desoxirribonucleico (DNA) e o ácido ribonucleico (RNA). Estas moléculas são portadoras da informação genética e responsáveis pela tradução dessa informação. Em ambas, o fósforo serve como ligação entre as riboses para formar as macromoléculas (Marschner, 2012). O fosfato é responsável pela natureza ácida dos ácidos nucleicos e pela elevada concentração de cátions no DNA e RNA (Stevenson e Cole, 1999).

Além disso, o fósforo está presente nos fosfolipídios, fosfoproteínas, coenzimas e nucleotídeos que são componentes estruturais importantes das membranas celulares. Portanto, fósforo é importante para um crescimento vigoroso e desenvolvimento das partes reprodutivas. Segundo Malavolta *et al.* (1997), a partir dos papéis do fósforo na fisiologia de plantas, certifica-se que sem ele a planta não completa seu ciclo de vida, pois não pode ser substituído por nenhum outro elemento, o que lhe confere o estatuto de elemento essencial.

O fósforo é um elemento móvel nas plantas, sendo translocado dos tecidos mais velhos para os jovens. Por isso, a deficiência em fósforo inicia-se nas folhas mais velhas, que no caso do milho corresponde à base da planta (Taiz e Zeiger, 2006).

Em deficiência de fósforo, a taxa de crescimento das plantas é reduzida e, no caso do milho e outras gramíneas, as folhas adquirem uma coloração roxa. O sintoma inicia-se no ápice das folhas e progride ao longo da margem até ficar totalmente roxa. As folhas inferiores começam a ficar necrosadas. A coloração roxa ocorre devido ao acúmulo de açúcares que estimula a síntese de antocianinas (Ferreira, 2012). Os caules tendem a ser mais curtos e finos, a ramificação lateral menos intensa, os gomos laterais tendem a morrer ou a ficar dormentes e a floração é reduzida, do que resulta baixa produção de sementes e frutos (Codling *et al.*, 2007).

O excesso de fósforo tende a manifestar-se como deficiência de um micronutriente, sendo que o ferro tende a ser o primeiro a ser afetado (Jones *et al.*, 2012), embora cobre e zinco também possam ser (Plumstead *et al.*, 2007). Valores excessivamente altos de fósforo podem interferir no metabolismo da planta. Em concentrações superiores a 10% pode ser considerado tóxico (Jones *et al.*, 2012).

2.3 Fósforo no solo

A origem do fósforo nos solos se deu através da apatita. Do ponto de vista mineralógico, a apatita é um composto complexo de fosfato de cálcio, tendo a forma empírica $3[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] - \text{CaX}_2$, onde X pode ser Cl^- , F^- , OH^- ou CO_3^{2-} . Estes minerais são altamente insolúveis em água e o fósforo neles contido não está prontamente disponível para as plantas (Stevenson e Cole, 1999). Durante séculos de intemperismo e desenvolvimento do solo, o fósforo da apatita é liberado e subsequentemente absorvido pelas plantas, sendo incorporado na matéria orgânica e redepositado como minerais solúveis, como fosfato de cálcio, ferro e alumínio.

O ciclo biogeoquímico do fósforo é dinâmico, envolvendo o solo, as plantas e os microrganismos. Os principais processos incluem a absorção do fósforo pelas plantas, a reciclagem via plantas e animais, a renovação biológica por imobilização e mineralização, reações de adsorção e fixação nas superfícies dos minerais de argila e óxidos e a solubilização e formação de fosfatos minerais através de reações químicas e atividade biológica do solo (Stevenson e Cole, 1999).

O fósforo do solo é dividido em dois grandes grupos, fósforo inorgânico e fósforo orgânico. Dentro desses grupos, as formas de fósforo são de difícil identificação devido à infinidade de reações que o elemento pode sofrer e seus compostos resultantes (Gatiboni, 2003). Em sistemas naturais, todo o fósforo utilizado pelas plantas retorna para

o solo nos resíduos das plantas e animais. Sob cultivo pelo homem, uma parte do fósforo é removido na colheita, outra parte se perde por erosão e em menor proporção por lixiviação (Stevenson e Cole, 1999). Na figura 1 é dado ênfase à relação planta-solo-microrganismos na qual o fósforo é fracionado até ficar disponível para as plantas.

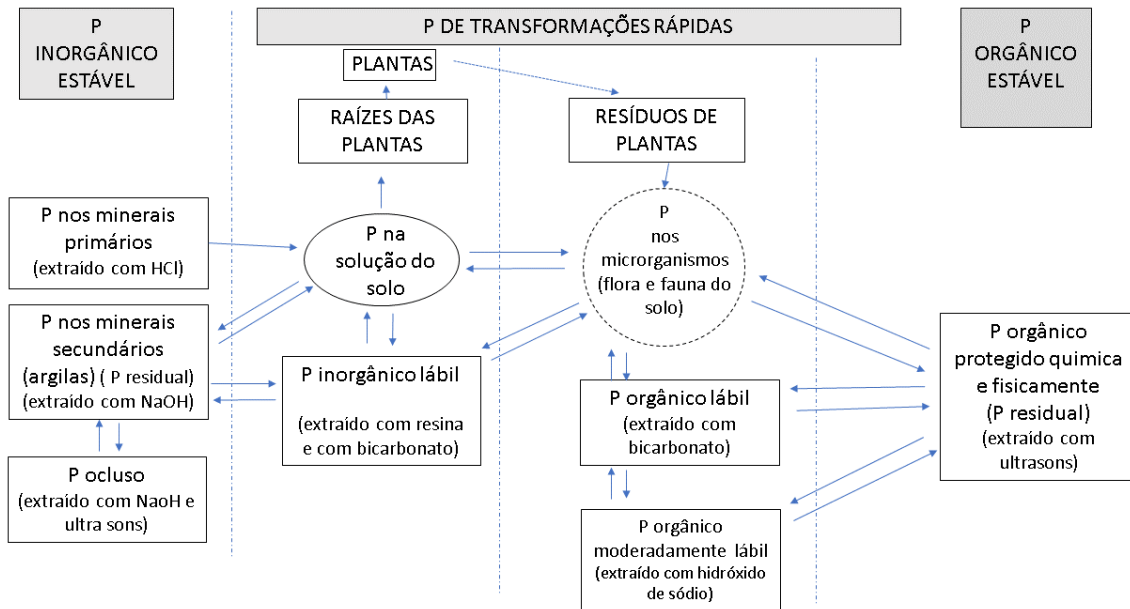


Figura 1. As transformações do fósforo no solo, com as frações avaliáveis em esquemas de fracionamento (Adaptado de Tiessen et al., 1984)

Na solução do solo predominam as formas de fósforo inorgânicas, tendo a participação mínima de formas orgânicas mais solúveis (Novais e Smyth, 1999). Porém, ele se apresenta em várias formas, nos diferentes compartimentos do sistema solo-planta.

O grupo do fósforo inorgânico pode ser separado em duas partes, o fósforo dos minerais primários ou estrutural e o fósforo adsorvido, além do fósforo da solução do solo, encontrado em pequenas quantidades. O fósforo inorgânico adsorvido pode ocorrer em todos os minerais presentes no solo por causa de sua facilidade em formar complexos de alta energia de ligação, por exemplo, ligado ao ferro, alumínio e cálcio, adsorvido nas argilas, matéria orgânica, entre outras formas (Gatiboni, 2003).

Os processos de adsorção/dessorção são as principais formas de interação dos fosfatos com a fase sólida do solo, como óxidos, hidróxidos, argilominerais, carbonatos e matéria orgânica (Stevenson e Cole, 1999). A adsorção consiste na transferência de íons da solução do solo para a fase sólida. Os diferentes mecanismos bem como os níveis energéticos em que ocorre esse processo determinam o grau de reversibilidade de suas reações.

Como apenas uma pequena parte do fósforo do solo é disponibilizada às plantas, a estimativa total não informa sobre a biodisponibilidade do elemento e se faz necessário o conhecimento das suas formas predominantes (Silva, 2007).

A expectativa ao aplicar uma fonte solúvel de fósforo num solo é que esse material permaneça em solução, por um considerável período, à disposição da planta. Resultados de pesquisa têm mostrado que, na verdade, o tempo necessário para que a adsorção ocorra é bem curto. A adsorção de fósforo pelos solos efetua-se em dois estádios. As reações do primeiro estádio ocorrem em horas ou minutos, ao passo que as do segundo estádio são bem mais lentas (Novais e Smyth, 1999).

Na porção biologicamente ativa da biosfera, o fósforo ocorre na forma de fosfato (PO_4^{3-}). O fósforo é encontrado principalmente nas rochas, formando complexos com óxidos de cálcio, ferro, magnésio e alumínio (Epstein e Bloom, 2006). Destes materiais, o fósforo é liberado lentamente na forma de fosfato pelos processos de intemperismo, sendo o processo acelerado na presença de microrganismos através da liberação de ácidos orgânicos (Silva, 2007).

Embora a retenção seja um fenômeno favorável à utilização do fósforo pelas plantas, o envelhecimento dessa retenção, com a formação de fósforo não-lábil, torna-se problemático. A retenção do fósforo adicionado ao solo, em formas lábeis ou não, ocorre tanto pela precipitação do fósforo em solução com formas iônicas de ferro, alumínio e cálcio, como, de maneira mais significativa, pela sua adsorção pelos oxidróxidos de ferro e de alumínio, presentes, de modo geral, em maiores quantidades em solos tropicais mais intemperizados e de modo particular nos mais argilosos. Reação semelhante à apresentada pelos oxidróxidos de ferro ocorre, também, com os oxidróxidos de alumínio (Novais e Smyth, 1999).

O fósforo corre nos sistemas solo/água principalmente na forma de fosfatos, os quais são representados pelos ortofosfatos, polifosfatos e fosfatos orgânicos (Costa *et al.*, 2008). Podem ainda, apresentar-se tanto na forma dissolvida como particulada, ou assimilados em organismos (Pierzynski *et al.*, 2000). Essas características são influenciadas por diversos fatores, tais como o tipo de fonte de fósforo, tipo de solo e condições ambientais.

O grupo do fósforo orgânico constitui cerca de 20 a 80% do fósforo total do solo e é extremamente relevante nos solos tropicais, pois atua na disponibilidade do elemento às plantas (Gatiboni, 2003). Esse fósforo é originário dos resíduos vegetais adicionados ao solo. Devido a grande variedade de compostos orgânicos que existem, ainda não foram

identificados todas as formas de fósforo. Uma fração importante do fósforo orgânico é aquela contida na biomassa microbiana por sua elevada dinâmica.

A absorção pelos microrganismos forma outro compartimento no solo, o fósforo microbiano, que é o fósforo imobilizado pela biomassa microbiana do solo e pode representar de 2 a 24% do fósforo orgânico do solo. O fósforo microbiano pode funcionar como amortecedor dos fenômenos de adsorção, imobilizando temporariamente o fósforo e evitando sua adsorção específica aos colóides (Gatiboni, 2003).

A utilização de resíduos orgânicos pode alterar as concentrações de fósforo na solução do solo, à semelhança do que ocorre para as fontes minerais. Ao serem mineralizadas, as formas orgânicas de fósforo terão o constituinte da biomassa somado às concentrações de fósforo da solução do solo. De acordo com Novais e Smyth (1999), a imobilização do fósforo da solução poderá ocorrer temporariamente pela incorporação à biomassa microbiana do solo, pois a microbiota necessita uma fonte de carbono para suprir suas necessidades. Dessa forma, para a mineralização de resíduos, há necessidade de se imobilizar fósforo por um tempo correspondente ao decréscimo da fonte de carbono, quando a atividade microbiana atinge níveis próximos aos iniciais (Costa *et al.*, 2008).

Concomitante à utilização de fósforo pelos organismos vivos, seus resíduos são depositados no solo e uma nova forma de fósforo é acumulada, o fósforo orgânico. Com a ação do intemperismo, os minerais fosfatados vão sendo degradados e sua contribuição no fornecimento de fósforo ao sistema é reduzida, assim como os minerais do solo também diminuem sua cristalinidade e aumentam os sítios de adsorção aniônica (Gatiboni, 2003). Com isso, a fase sólida mineral do solo muda, passando de fonte a dreno da solução, devido à formação de complexos de alta energia (Stevenson e Cole, 1999).

2.4 Fósforo no meio ambiente

Em muitas regiões o fósforo limita a produção agrícola e adições periódicas de fósforo se fazem necessárias para produção. O fósforo inorgânico que é adicionado ao solo como fertilizante tem baixa solubilidade em água e grande interação com partículas do solo. Sendo assim, a recomendação de adubação fosfatada é maior que a necessidade da cultura (Bizarro *et al.*, 2008).

O fósforo é reconhecidamente um elemento de pouca mobilidade no solo. Para atender à demanda das culturas e de produção, a adição de fósforo, seja ela via fertilizantes minerais ou orgânicos, tornou-se uma prática corrente (Costa *et al.*, 2008). O acúmulo de fósforo resultante da quantidade aplicada excessivamente àquela removida

pelos cultivos e por longos períodos de tempo, contribui para aumentar o potencial de perda de fósforo para o ambiente (Kerr *et al.*, 2011).

O acúmulo de fósforo na camada superficial do solo pode ocasionar a saturação dos sítios de adsorção (Ellison e Brett, 2006) e, conseqüentemente, a diminuição da sua capacidade de retenção. Nesta situação, o solo pode ser uma fonte de fósforo contribuindo para aumentar os riscos de poluição das águas superficiais e eventualmente das subterrâneas (Sharpley *et al.*, 2001).

A utilização de outras fontes de fósforo como fertilizantes, a exemplo lodos de esgoto e efluentes líquidos de suínos e bovinos, tem surtido bastante efeito a curto prazo para os agricultores (Capoane *et al.*, 2015). Porém, não há certeza das quantidades de nutrientes que são aplicadas no solo. Todavia, a aplicação sucessiva de dejetos em altas doses promove a saturação dos sítios de sorção de fósforo no solo, resultando na alta disponibilidade desse elemento, sendo facilmente transferido à fase solúvel quando esses sedimentos são transferidos aos corpos de água (Kerr *et al.*, 2011).

A transferência de fósforo do sistema terrestre para o ambiente aquático ocorre principalmente por duas vias, escoamento superficial e percolação no perfil. As formas de fósforo transferidas para o ambiente aquático podem ser solúveis e particuladas (Sharpley *et al.*, 2001).

As transferências por escoamento superficial ocorrem por vários fatores e o principal é a água que pode transportar materiais orgânicos, inorgânicos e partículas em suspensão. As quantidades e as formas de fósforo transferidas variam de evento para evento pluviométrico, por causa da variação da intensidade, duração, intervalo de tempo, estágio da cultura e grau de cobertura, entre outros. Devido a mobilidade do fósforo no solo ser pequena, as perdas por percolação não são muito significativas (Klein e Agne, 2012).

O impacto causado pelo fósforo no meio ambiente é através da eutrofização de lagos, principalmente em ambientes originalmente oligotróficos onde desenvolvimento de algas e outras plantas era limitado. Alterações no ecossistema, como a conversão de solo de floresta para utilização agrícola, aumenta a entrada de fósforo no ambiente. Devido à forte tendência do fosfato ficar adsorvido no solo ou complexado em cátions, o fósforo entra em corpos de água através das partículas de solo erodido (Capoane *et al.*, 2015).

A contribuição agrícola do fósforo para eutrofização faz com que haja eficientes medidas de prevenção, tais como a prevenção da erosão, o cuidado com a aplicação de

insumos diretos no solo, o ajuste da necessidade real de fertilizante para as plantas e a prevenção do escoamento superficial (Werner, 2007).

As principais fontes de fósforo usadas na agricultura são os superfosfatos, os amoníofosfatos, os fosfatos parcialmente acidulados e os fosfatos naturais. A matéria-prima para a obtenção desses produtos são as rochas fosfatadas, que apresentam em sua composição, além do fósforo, diversos contaminantes, dentre eles cádmio em variadas concentrações (McLaughlin e Singh, 1999).

Aplicações sucessivas de fertilizantes fosfatados incrementam as quantidades de cádmio em solos e plantas, causando impactos ao ambiente devido a sua alta toxicidade (McLaughlin e Singh, 1999). A determinação das concentrações de cádmio nos fertilizantes e métodos adequados de extração são importantes para monitorar riscos de contaminação e poluição por cádmio no ambiente e prevenir ou reduzir a entrada desse contaminante na cadeia alimentar (Bizarro *et al.*, 2008).

2.5 Gestão do fósforo em agroecossistemas

O solo é fundamental para a vida das plantas, pois além de suporte, o mesmo pode reservar água e fornecer nutrientes às plantas. Os solos apresentam diferentes níveis de fertilidade e capacidade de fornecer nutrientes às plantas. De uma maneira geral nenhum solo consegue fornecer todos os nutrientes às plantas, pelo menos nas quantidades necessárias (Sierra *et al.*, 2012).

Contudo, é importante fazer uma distinção entre a função dos fertilizantes orgânicos, por vezes designados de corretivos orgânicos, e os fertilizantes minerais. Os segundos destinam-se a fornecer nutrientes às plantas de forma simples e direta. Os primeiros podem melhorar as propriedades físicas e biológicas dos solos promovendo, desta forma, o desenvolvimento das plantas (Sierra *et al.*, 2012).

Em função dos baixos teores de fósforo disponível em solos intemperizados de ecossistemas naturais, diversos mecanismos são utilizados pelas plantas e organismos para aumentar a eficiência de absorção do fósforo (Rossi, 2013). Nesses ecossistemas, onde não ocorre a entrada de adubação fosfatada, a disponibilidade de fósforo está intimamente ligada à ciclagem das formas orgânicas, sendo que a perturbação desse sistema pela introdução de novas plantas, aumento da biomassa e adubação, pode acarretar numa maior mineralização, devido a maior atividade biológica (Novais e Smyth, 1999).

O manejo do solo, as remoções de fósforo pelas culturas, as aplicações de fertilizantes fosfatados, a calagem e adição de matéria orgânica alteram bastante a dinâmica das transformações do fósforo no solo (Rossi, 2013). Dependendo dessas alterações, as frações orgânicas e inorgânicas podem atuar como fonte ou dreno do fósforo disponível (Sierra *et al.*, 2012).

Com a aplicação de adubos fosfatados ocorre adsorção do fósforo aos coloides, e o manejo do solo assume um papel importante no prolongamento da sua labilidade. Práticas como não revolvimento do solo, controle da erosão e manutenção da cobertura vegetal são essenciais para diminuir essa adsorção (Rossi, 2003). Os fertilizantes orgânicos e minerais são usados para suplementar a disponibilidade natural de nutrientes no solo e favorecer o desenvolvimento das plantas (Gatiboni, 2003).

2.5.1 Fertilização mineral

A fertilização mineral deve ser feita com base em uma análise do solo, que se mostra útil para discriminar respostas das plantas à adubação fosfatada. A interpretação da análise e a recomendação da adubação são feitas com base no rendimento esperado (Coelho, 2006).

Como o fósforo é imóvel no solo, o posicionamento do fertilizante próximo às raízes geralmente é vantajoso, pois facilita a absorção pelas plantas. As aplicações para cultura do milho devem ser feitas pré-plantio e não precisam ser parceladas como ocorre em outros nutrientes. Após o plantio, o fósforo terá uma área menor de contato com as raízes e será de pouco valor para as culturas anuais, como no caso do milho (Havlin *et al.*, 2014)

Existem diferentes formas de aplicar o fósforo ao solo, designadamente em faixas, a lanço, no sulco de plantio, entre outras. Estas formas devem ser ajustadas para cada situação, levando-se em conta, além dos resultados da análise de solo, o potencial de produção da cultura na região e o nível de tecnologia utilizada pelos agricultores (Havlin *et al.*, 2014).

O fósforo em faixa deve aumentar a recuperação pelas culturas em comparação com o fósforo a lanço. Embora geralmente o uso mais eficiente de quantidades limitadas de fósforo seja no plantio e o maior retorno seja obtido por aplicações em faixas, pode haver alguma vantagem em aumentar a fertilidade do solo em um programa de fertilizantes a longo prazo (Havlin *et al.*, 2014).

No caso do milho, as necessidades em fósforo são bastante menores que as necessidades em nitrogênio e também em potássio, embora as doses normalmente recomendadas sejam altas, em função da baixa eficiência de aproveitamento do nutriente pela cultura. Isto decorre da elevada capacidade de fixação do fósforo adicionado ao solo através de mecanismos de adsorção e precipitação, reduzindo sua disponibilidade às plantas (Coelho, 2016).

2.5.2 Fertilização orgânica

De acordo com Fernandes (2017), os corretivos orgânicos compreendem toda a fonte de matéria orgânica suscetível de se decompor no solo para aí dar origem ao húmus e contribuir, deste modo, para o melhoramento das suas propriedades físicas, químicas e biológicas.

Existem vários tipos de materiais orgânicos que podem ser utilizados com esta finalidade, uns associados a atividades agrícolas ou pecuárias, como estrumes, chorumes, resíduos de culturas e compostos, outros fora deste âmbito, tais como os subprodutos de agroindústrias, as lamas tratadas, entre outros (Fernandes, 2017).

É prática corrente o recurso à valorização de diversos resíduos orgânicos através da sua aplicação ao solo, procurando um destino final ambientalmente adequado e economicamente viável (Sempiterno *et al.*, 2016). A aplicação sistemática ao solo de resíduos orgânicos de origem animal conduz a um aumento nos teores não só em fósforo total, mas também em fósforo biodisponível tanto nos horizontes superficiais, como nos sub-superficiais, ocasionando uma tendência para a saturação na capacidade de sorção de fosfato ao longo do perfil (Rossi, 2013).

Com efeito, vários são os autores que se referem ao uso controlado de compostos orgânicos na agricultura. É necessário que se avalie a sua intensidade de modo a prover corretamente as necessidades das culturas, evitando excessos ou defeitos que dão origem a contaminações no primeiro caso e a uma menor eficiência no segundo (Sempiterno *et al.*, 2016; Fernandes, 2017).

Por outro lado, a aplicação de resíduos orgânicos pode originar também modificações na capacidade do solo em sorver fosfato. A aplicação de resíduos orgânicos ao solo pode ter como efeito, não só inibir a sorção de fosfato, como também originar um decréscimo na energia de ligação do fosfato à fase sólida. Por estes motivos, a utilização repetida destes resíduos pode aumentar consideravelmente o risco de perda de fósforo,

quer por drenagem interna quer por escoamento superficial. O efeito da matéria orgânica sobre a sorção de fosfato ainda não é bem conhecido (Rossi, 2013).

2.6 Uso de condicionadores de solo

De acordo com o glossário de termos usados em ciência do solo (GSST, 2008) um “condicionador do solo” é um material que, de forma mensurável, melhora características específicas do solo para um determinado uso. Condicionadores de solo são então produtos que promovem a melhoria das propriedades físicas, químicas e/ou a atividade biológica do solo. Neste trabalho iremos descrever três produtos diferentes, designadamente biochar, zeólitos e matéria orgânica, por serem produtos utilizados na parte experimental deste trabalho.

2.6.1 Biochar

Biochar pode ser definido como uma biomassa de carbono em um estado estabilizado, produzido na ausência parcial ou total de oxigênio através de pirólise a alta temperatura (Farrell *et al.*, 2013). Este material recebeu muita atenção nos últimos anos, não somente devido ao seu potencial de sequestrar carbono, mas também pela sua capacidade de promover a fertilidade do solo (Woolf *et al.*, 2010).

Este condicionador de solo é obtido a partir de diversas biomassas, como estrume, madeira ou folhas, que são submetidas a um ambiente com pouco oxigênio ou quase anóxico, e a decomposição térmica destes materiais. O processo de queima da biomassa é denominado de pirólise, e ocorre sob temperaturas entre 300 e 600 °C (Nobrega, 2011). Quando realizada de maneira lenta, a pirólise tem seu rendimento considerado superior e obtém-se um produto com altos índices de porosidade, além de manter características do seu material de origem que auxiliam na estabilização de componentes do solo (Farrell *et al.*, 2013).

O biochar tem sido usado para melhorar a fertilidade em solos há milhares de anos, embora a investigação científica sobre os seus efeitos sobre a fertilidade do solo sejam ainda reduzidos (Novak *et al.*, 2009). Porém, com a necessidade de melhorar a eficácia dos fertilizantes e do próprio solo, a procura de alternativas aumentou e, conseqüentemente, o número de estudos também (Nigussie *et al.*, 2012; Amin, 2018).

No estudo de Novak *et al.* (2009), os pesquisadores trabalharam com biochar produzido com casca de noz e observaram uma melhoria nas características físicas e

químicas do solo, com uma grande eficácia no sequestro de carbono, mas a maioria das concentrações de micronutrientes no solo não foi influenciada pelas adições.

Amin (2018) produziu biochar a partir do caule do milho e verificou ser uma alternativa de fertilizante fosfatado. As produções de matéria fresca e seca de milho melhoraram com as adições de biochar. No solo ocorreu maior retenção de fósforo, melhorando a oferta para as plantas e reduzindo o risco de impactos ambientais. Corroborando com os dados de Nigussie *et al.* (2012), que além do fósforo, observou aumento de nitrogênio e potássio disponível. Segundo Nigussie *et al.* (2012), esta melhoria é devida à área de contato e à natureza porosa do biocarvão, além de atuar como um meio para os microrganismos se desenvolverem.

2.6.2 Zeólitos

Zeólitos são minerais que, em razão de suas características físicas e químicas, têm utilização muito ampla. Na agricultura possibilitam o aumento da eficiência de utilização de insumos associados a esses minerais, bem como sua utilização como condicionadores e descontaminantes de solo (Bernardi *et al.*, 2008)

Os zeólitos são minerais aluminossilicatos cristalinos com armação estrutural incluindo cavidades ocupadas por cátions grandes e moléculas de água, ambos tendo considerável liberdade de movimento, permitindo troca iônica e desidratação reversível (Fungaro *et al.*, 2004). Esses minerais caracterizam-se pela facilidade de reter e de liberar água e de trocar cátions sem modificar sua estrutura (Bernardi *et al.*, 2008).

Devido a sua estrutura podem conter até 60% de água em relação ao seu peso devido a uma alta porosidade da estrutura cristalina. Moléculas de água nos poros podem ser facilmente evaporadas ou reabsorvidas sem danificar essas estruturas. Por isso, asseguram um reservatório permanente de água, proporcionando umidade durante períodos secos (Polat *et al.*, 2004).

Os zeólitos são relativamente abundantes e apresentam baixo custo de produção, especialmente se aplicadas *in natura*, ou requerendo processos de beneficiamento pouco complexos. Jazidas exploradas comercialmente nos Estados Unidos da América, Cuba, Hungria, Bulgária, Japão, Eslováquia, África do Sul, Itália, Rússia, Indonésia e Coreia, em geral, têm conteúdo zeolítico maior que 60%, podendo alcançar até 90% (Resende *et al.*, 2008).

A vantagem dos zeólitos sintéticos é apresentar uniformidade no tamanho e forma dos canais, e composição química pré-definida em função dos fins a que se

destinam. Considerando, entretanto, seu elevado custo, os zeólitos sintéticos são reservados para aplicações que exigem características mais uniformes de estrutura e composição, como nos processos de catálise de hidrocarbonetos e na indústria de detergentes (Resende *et al.*, 2008).

Os zeólitos podem atuar na melhoria da eficiência do uso de nutrientes na agricultura, por meio do aumento da disponibilidade de fósforo da rocha fosfatada, do melhor aproveitamento do nitrogênio, da redução das perdas por lixiviação dos cátions trocáveis e aumento da aeração do solo (Gul *et al.*, 2005; Bernardi *et al.*, 2008).

Como este material possui um alto poder de adsorção e elevada capacidade de troca de cátions sua utilização se torna muito ampla. Por exemplo para recuperação de áreas afetadas por derrames de petróleo, águas contaminadas por metais pesados, além de águas poluídas por material orgânico. Reduz também a lixiviação de fertilizantes nitrogenados para o subsolo (Resende *et al.*, 2008).

Considerando que a adubação fosfatada é essencial no aumento da produtividade agrícola e que seu uso está relacionado a maior custo de produção das explorações agrícolas, torna-se necessário aprimorar técnicas e conhecimentos, tais como a utilização de zeólitas modificadas com rocha. Os zeólitos modificados por diferentes vias por meio da troca com cátions monovalentes (como H^+ , NH_4^+ , K^+ e Na^+) podem solubilizar o fósforo da rocha fosfórica (Pickering *et al.*, 2002; Bernardi *et al.*, 2008), ficando este disponível para as plantas.

2.6.3 Matéria orgânica

Um dos constituintes mais importantes do solo é a matéria orgânica. Esta é formada por restos de plantas assim como de outros seres vivos que se encontram em decomposição, seja parcial ou totalmente, e por compostos orgânicos mais ou menos estáveis e complexos. É considerada um dos principais indicadores de qualidade ambiental em agroecossistemas (Martins, 2012).

De forma simples podemos dividir a matéria orgânica em uma fração lábil e uma fração humificada. A parte lábil representa 1/3 do carbono orgânico do solo, com uma elevada taxa de decomposição num curto período. Os outros 2/3 do carbono orgânico têm maior permanência no solo, sendo sua principal função atuar sobre as condições físicas e químicas do solo (Rossi, 2013).

A matéria orgânica do solo constitui a base fundamental para a produtividade agrícola sustentável, pois através dos seus efeitos diretos, é capaz de modular as condições

químicas, físicas e biológicas do solo e, conseqüentemente, a eficiência nutricional. Ela é considerada fonte de nutrientes às plantas, influencia a infiltração, retenção de água, estruturação e susceptibilidade do solo à erosão. Atua também sobre outros atributos, tais como capacidade de troca de cátions, ciclagem de nutrientes, complexação de elementos tóxicos do solo e estimulação da biota do solo (Freitas *et al.*, 2012; Fernandes, 2016).

A compreensão da dinâmica da matéria orgânica em sistema de produção permite subsidiar o estabelecimento de estratégias de manejo que garantam o incremento do conteúdo de matéria orgânica do solo e a qualidade ambiental do solo ao longo do tempo (Martins *et al.*, 2009). Além disso, executa a função crucial de fornecer um número significativo de sítios de ligação para elementos essenciais presentes no solo, contribuindo para o aumento da capacidade de troca catiónica (CTC) e melhor eficiência de utilização dos nutrientes (Fernandes, 2016).

Uma importante função da matéria orgânica do solo é o fornecimento de nutrientes às plantas, incluindo fósforo. O conteúdo de fósforo orgânico aumenta quando o manejo favorece o incremento de carbono e com a utilização de insumos, e diminui em sistemas intensivos de cultivo com baixa reposição de fósforo (Reddy *et al.*, 2000).

Estudos têm demonstrado que a natureza e dinâmica da matéria orgânica e a ciclagem de fósforo apresentam comportamentos diferentes sob sistemas de manejo do solo (Turrión *et al.*, 2000). Pois o aumento nos estoques de matéria orgânica é dependente de vários fatores, tais como quantidade de palha, tipo de rotação de cultura adotado, grau de mobilização do solo, clima da região e doses de fertilizantes aplicadas nas lavouras (Freitas *et al.*, 2012). Portanto, sistemas de manejo que alteram o comportamento da matéria orgânica exercem grande impacto sobre seus benefícios.

2.7 A cultura do milho

A cultura do milho possui uma grande relevância no cenário econômico nacional e internacional. Em Portugal, é a cultura arvense mais produzida.

2.7.1 Origem e distribuição

O milho (*Zea mays* L.) é uma espécie que pertence à família das Poaceae, subfamília Panicoideae, tribo Maydeae, gênero *Zea* e espécie *Zea mays* L. (Barros e Calado, 2014). Para distinguir-se de seu parente mais próximo, o teosinto,

taxonomicamente é identificado como *Zea mays* L. spp *mays*, ambos com $2n = 2x = 20$ cromossomos (Martins, 2012).

Existem várias teorias sobre a evolução do milho, porém a mais aceita atualmente é que foi originado do teosinto, que é uma gramínea nativa da América Central, mais precisamente do México (Udry, 2000). O teosinto é uma planta muito parecida com o milho, porém produz uma espiga muito pequena (Barros e Calado, 2014).

O milho é a espécie que conta com maior variabilidade genética entre todas as plantas cultivadas (Udry, 2000). Devido a sua grande adaptabilidade, representado por variados genótipos, é encontrado em muitas partes do mundo. O seu cultivo vai desde o Equador até ao limite das terras temperadas e desde o nível do mar até altitudes superiores a 3600 metros, encontrando-se, assim, em climas tropicais, subtropicais e temperados (Barros e Calado, 2014).

2.7.2 Importância econômica

O milho é uma das culturas mais importantes mundialmente, seja do ponto de vista econômico, seja do ponto de vista social. Destaca-se por ser o grão mais produzido no mundo (FAO, 2018). Segundo informações do FAO (2018) a produção mundial deste cereal deverá atingir 1,039 bilhão de toneladas, na campanha agrícola 2017/18. No gráfico X, estão ilustrados os dez maiores produtores de milho do mundo.

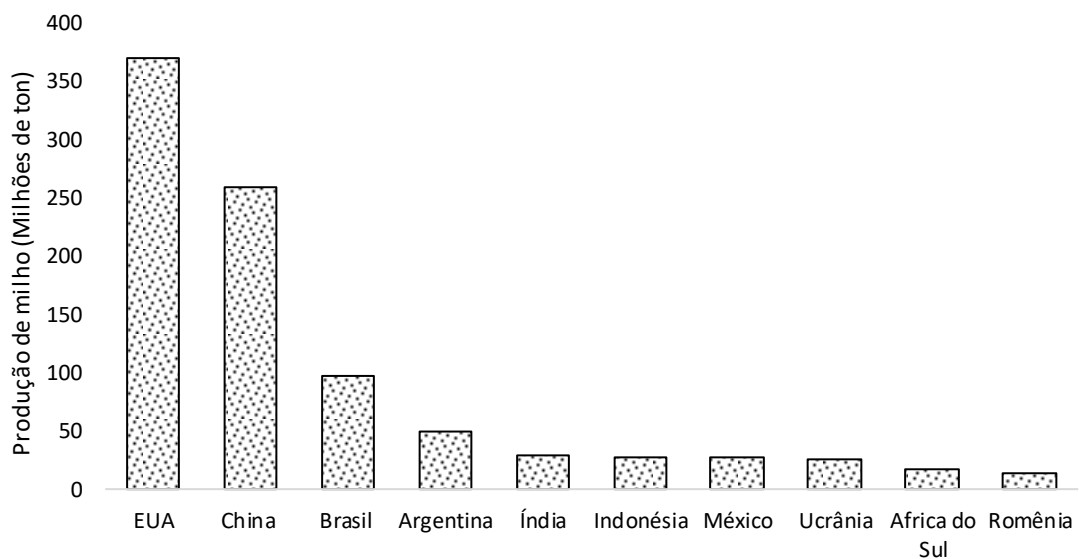


Figura 2. Principais produtores de milho do mundo (FAO, 2018).

A utilização do milho é bem ampla, como uso alimentar, industrial e energético. No ramo alimentar destaca-se a produção de rações para uso animal. Para as indústrias, o destino do milho é para fabricação de amidos industriais e combustíveis, como exemplo o etanol (Sologuren, 2015).

Em Portugal, por exemplo, a cultura do milho está intimamente ligada ao regadio, aproveitando as potencialidades edafo-climáticas da estação quente e seca que o posicionamento geográfico proporciona. Nestas condições a rega proporciona um contributo imprescindível ao desenvolvimento vegetativo da cultura.

No contexto agrícola português, o milho é uma das culturas arvenses mais importante e a mais cultivada (INE, 2017). Sendo a que envolve mais explorações agrícolas e, segundo a Associação Nacional de Produtores de Milho e Sorgo (Anpromis, 2018), a área plantada em 2018 é de aproximadamente 119 mil hectares, divididos entre 70 mil para milho grão e 49 mil para milho silagem.

Atualmente, apesar do milho ser o cereal mais produzido em Portugal, o que se produz cobre pouco mais de 32 % das necessidades do mercado interno (INE, 2017). O milho é uma cultura associada quer à produção de silagem a qual é de excelente qualidade, quer à produção de grão, afirmando-se atualmente como uma cultura com enorme potencialidade produtiva da agricultura portuguesa de regadio, tendo um contributo importante para a vitalidade das economias regionais e nacional (Barros e Calado, 2014).

2.7.3 Características da cultura

A cultura do milho encontra-se amplamente disseminada no mundo todo. Isto se deve tanto à sua multiplicidade de usos na propriedade rural quanto à tradição de cultivo desse cereal pelos agricultores. As diferenças nos rendimentos agrícolas são devido a fatores edafoclimáticos, econômicos e ao nível de conhecimento disponível entre os agricultores (Magalhães *et al.*, 2002).

O milho necessita que os fatores climáticos atinjam níveis considerados ótimos, para que o seu potencial genético de produção se expresse. O período de crescimento e desenvolvimento do milho é limitado pela água, temperatura e radiação solar (Cruz *et al.*, 2010).

A temperatura ideal para o desenvolvimento do milho, da emergência à floração, está compreendida entre 24 e 30 °C. A precipitação para um ciclo ideal é em torno de 600 mm e uma boa radiação solar, sem a qual o processo fotossintético é inibido e a planta é

impedida de expressar o seu máximo potencial produtivo (Cruz *et al.*, 2010; Martins, 2012).

Por ser uma cultura que necessita de temperaturas mais altas, é semeada nos entre os meses de março a maio em Portugal. Seu crescimento se dá nas alturas mais quentes e com menos precipitação, por isso a necessidade hídrica deve ser suprida através da rega (Barros e Calado, 2014).

Neste sentido, a falta de água se torna um impasse para produção, dependendo o estágio fenológico em que a planta se encontre, a quebra de produtividade devido à deficiência hídrica poderá ser maior ou menor. Se a deficiência hídrica se verificar por exemplo durante dois dias na época da floração, a quebra de rendimento da cultura poderá ser superior a 20% (Martins, 2012). Nas condições climáticas de Portugal, a necessidade de água de rega por unidade de área (ha) pode variar aproximadamente de 250 a 350 mm em milho forrageiro (Barros e Calado, 2014).

Um método e um sistema de rega adequado é aquele que propicie ao agricultor, a possibilidade de utilizar a água com a máxima eficiência, aumentando a produtividade das culturas, reduzindo os custos de produção e, desse modo, maximizar o retorno dos investimentos feitos pelo empresário agrícola (Barros e Calado, 2014). Vale ainda ressaltar que a água é um bem cada vez mais escasso e mais caro.

Outro fator determinante para produção do milho é a fertilização. Esta cultura em especial tem necessidades mais elevadas de nitrogênio, fósforo e potássio que são os mais absorvidos pela planta. Além deles, cálcio, magnésio, enxofre, cobre, boro e zinco são indispensáveis para um ótimo desenvolvimento da planta. Podendo ainda contar com uma operação de calagem, se necessário (Coelho, 2006). Na tabela 1 apresentam-se valores de exportação dos principais nutrientes na cultura do milho em função da produtividade.

Quando o milho é colhido para silagem, além dos grãos, a parte vegetativa também é removida, havendo conseqüentemente alta extração e exportação de nutrientes. Assim, problemas de fertilidade do solo se manifestarão mais cedo na produção de silagem do que na produção de grãos, principalmente se a primeira for obtida em uma mesma área por vários anos consecutivos e se não for adotado um sistema de manejo de solo e adubações adequadas (Coelho e França, 2016)

Tabela 1. Extração média de nutrientes pela cultura do milho destinado a produção silagem em diferentes níveis de produtividade (Coelho e França, 2016).

Exportação	Produtividade (t ha ⁻¹)	Nutriente extraído				
		N	P	K	Ca	Mg
		kg ha ⁻¹				
	11,6	115	15	69	35	26
Silagem	15,3	181	21	213	41	28
(matéria seca)	17,1	230	23	271	52	31
	18,7	231	26	259	58	32

Na tabela 2, podemos ver outro exemplo sobre a exportação e extração de macronutrientes e micronutrientes pela cultura do milho em função da produtividade atingida.

Tabela 2. Extração e exportação de macronutrientes e micronutrientes pela cultura do milho em função da produtividade atingida (Adaptado de Broch e Ranno, 2009).

Nutriente	Produtividade atingida							
	6,0 t ha ⁻¹		7,2 t ha ⁻¹		8,4 t ha ⁻¹		9,6 t ha ⁻¹	
	Ext ² .	Exp ³ .	Ext.	Exp.	Ext.	Exp.	Ext.	Exp.
	kg ha ⁻¹							
N	149	95	179	114	209	133	239	152
P ₂ O ₅	59	52	71	63	82	73	94	84
K ₂ O	131	35	157	42	183	49	209	56
Ca	23,0	3,0	28,0	3,6	33,0	4,2	37,0	4,8
Mg	26	9	32	11	37	13	42	14
S	15	7	19	8	22	9	25	11
	g ha ⁻¹							
Fe	1414	70	1697	84	1980	97	2263	111
Mn	257	37	308	44	360	51	411	59
Cu	60	7	72	9	84	10	96	11
Zn	290	166	348	199	407	232	465	265
B	108	19	130	23	151	27	173	31
Mo	6,0	3,6	7,2	4,3	8,4	5,0	9,6	5,8

² extraído, ³ exportado.

A adubação deve ser feita com base em uma análise do solo levando em conta várias características, como potencial de produção esperado, se o objetivo é produção de grão ou silagem, tipo de solo e nível de tecnologia do produtor.

No caso de Portugal, as normas do laboratório oficial (LQARS, 2006) recomendam aplicar fósforo à instalação em solos classificados pela análise de terras (método Egner-Riehm) como muito pobres, pobres e médios em fósforo, respetivamente nas quantidades de 200, 150 e 100 kg (P₂O₅) ha⁻¹. Neste sentido, parece haver evidência

para outras culturas de que os métodos de análise de terras subestimam a disponibilidade do nutriente no solo levando a aplicações desnecessariamente elevadas do nutriente (Arrobas et al., 2018).



3 Materiais e métodos

3.1 Caracterização edafoclimáticas

3.1.1 Caracterização do clima

Os ensaios foram realizados em dois locais como ilustra a figura 3. O primeiro ensaio está localizado na Quinta do Poulão (coordenadas 41°46'43" Latitude Norte e 6°47'56" Longitude Oeste) e altitude de 750 m. O segundo decorreu na área das estufas do Instituto Politécnico de Bragança - IPB (coordenadas 41°47'48,46" Latitude Norte e 6°45'43,25" Longitude Oeste) e altitude de 674 m. As duas áreas se distanciam cerca de 5 kilometros e ambas ficam situadas em Bragança.



Figura 3. Imagens dos ensaios, Quinta do Poulão (A) e estufas (B).

De acordo com Köppen-Geiger, a classificação do clima da região é Csb (clima temperado com verão seco). A temperatura média do ar para o ano 2018 foi de 12,8 °C. No mês mais quente, agosto, e temperatura média foi de 23,4 °C. No mês mais frio, fevereiro, a temperatura média foi de 4,5 °C. A precipitação média anual foi de 706 mm, tendo o mês mais chuvoso (março) com 193 mm e o mais seco agosto, onde não foi relatada nenhuma precipitação. Os registros meteorológicos para o período em estudo são da estação meteorológica da Quinta de Santa Apolônia, os quais estão apresentados na figura 4.

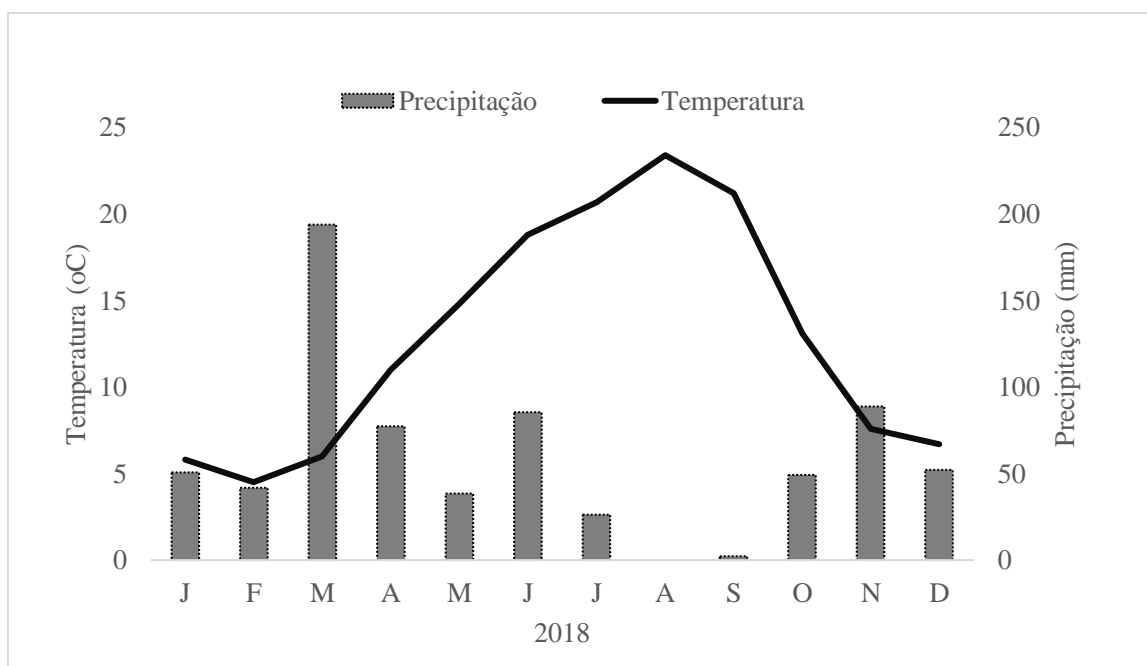


Figura 4. Precipitação e temperatura média do ar mensais na estação meteorológica de Bragança entre janeiro e dezembro de 2018.

3.1.2 Caracterização do solo

O solo usado na experiência em vasos é um regossolo êutrício de origem coluvial, de textura franco-limoso. As características físico-químicas do solo foram determinadas a partir de amostras de solo coletadas quando o ensaio foi iniciado, apresentadas na tabela 3. As amostras foram coletadas a uma profundidade de 0-20 cm, separando-o de toda vegetação rasteira e partículas de maiores dimensões contidas nele. Foi crivado em malha 4 cm e armazenado em um recipiente adequado para transposição em vasos.

Na Quinta do Poulão o solo é classificado como Fluvissoleto êutrício (IUSS Working Group WRB 2014), de textura franca, compreendendo 54% de areia, 25% de

silte e 21% de argila. A seguir na tabela 3, está ilustrado as propriedades químicas correspondente ao solo antes da implementação do experimento.

Tabela 3. Algumas propriedades do solo antes da instalação dos ensaios nos vasos e na Quinta St^a Apolônia na profundidade 0-20 cm.

Propriedades	Vasos	Qt ^a Apolônia	Propriedades	Vasos	Qt ^a Apolônia
pH _{H2O}	6,54	5,54	Ca (cmol kg ⁻¹) ⁴	9,08	10,93
pH _{KCl}	5,31	4,64	Mg (cmol kg ⁻¹) ⁴	4,45	6,03
M.O. (g kg ⁻¹) ¹	1,20	2,17	K (cmol kg ⁻¹) ⁴	0,25	0,20
N (g kg ⁻¹) ⁵	-	1,17	Na (cmol kg ⁻¹) ⁴	0,77	0,21
P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹) ²	15,97	26,00	AT (cmol kg ⁻¹) ⁴	0,00	0,23
K ₂ O (mg kg ⁻¹) ²	78,00	63,00	Al (cmol kg ⁻¹) ⁴	0,00	0,03
Boro (mg kg ⁻¹) ³	0,61	0,47	CTCe (cmol kg ⁻¹) ⁴	14,55	17,61

¹Matéria Orgânica, Walkley-Black; ²Egner-Rhiem; ³Azometina-H; ⁴Acetato de amônio pH 7.0; ⁵Kjedahl.

3.2 Caracterização dos condicionadores

Os condicionadores usados neste trabalho foram biochar e zeólitos, comercialmente conhecidos por Ecochar e Fertcel, respectivamente. O ecochar é proveniente de biomassa de lenha de poda de acácia e o Fertcel é um mineral 100% natural do tipo aluminossilicato hidratado. A seguir, na tabela 4, estão destacadas as principais características desses produtos.

Tabela 4 Principais características dos condicionadores de solo utilizados neste estudo (Ecochar e Zeocel 2017).

Zeólitos		Biochar	
SiO ₂ (%)	63,0	Carbono Orgânico Total (%)	90,0
TiO ₂ (%)	0,45	Cinzas (%)	5,00
Al ₂ O ₃ (%)	11,6	Umidade (%)	30,0
Fe ₂ O ₃ (%)	1,81	Nitrogênio total (%)	0,50
FeO (%)	0,81	Voláteis (%)	5,00
MgO (%)	0,92	Cádmio (mg kg ⁻¹)	0,05
CaO (%)	5,78	Chumbo (mg kg ⁻¹)	0,05
Na ₂ O (%)	2,39	Ferro (mg kg ⁻¹)	99,5
K ₂ O (%)	1,49	Arsênio (mg kg ⁻¹)	0,10
P ₂ O ₅ (%)	0,09	Mercúrio (mg kg ⁻¹)	0,10
H ₂ O (%)	3,44	Condutividade (µS/cm)	948
Peso específico (g/cm ³)	2,10	TMT ² (col./g)	1.0*10 ^{^1}
DAP ¹ (g/cm ³)	0,98	DAP ¹ (kg/m ³)	350
pH	7,60	pH	9,00

¹Densidade Aparente, ² Teor Micológico Total.

3.3 Delineamento experimental

3.3.1 Ensaio a campo

O experimento foi implantado no dia 15 de maio de 2018. Os ensaios foram conduzidos em delineamento fatorial completo. O fator condicionadores de solo incluiu os produtos biochar, zeólitos e ausência de condicionador. O fator níveis de adubação incluiu as doses de 0, 50, 100 e 200 kg (P₂O₅) ha⁻¹. De cada combinação de fatores foram incluídas três repetições. As designações comerciais dos fertilizantes utilizados são Ecochar, Fertcel e Super 18. O biochar foi usado numa dose correspondente à aplicação de 10 t ha⁻¹. Para zeólitos a dose correspondente foi de 5 t ha⁻¹. Todas as parcelas receberam adubação parcelada de nitrogênio na forma de nitrato de amônio 27% N (50 e 100 kg N ha⁻¹ em fundo e cobertura, respectivamente e potássio (150 kg K₂O ha⁻¹) na forma de cloreto de potássio (60% KCl). Cada parcela apresentou um arranjo espacial de 5x4 m.

3.3.2 Ensaio em vasos

Para realização da pesquisa em vasos utilizaram-se seis tratamentos, num delineamento experimental completamente casualizado. Os tratamentos foram os seguintes: Solo; Solo + Biochar; Solo + Biochar + Fósforo mineral; Solo + Zeólitos; Solo + Zeólitos + Fósforo mineral; Solo + Fósforo mineral.

De cada tratamento foram efetuadas 4 repetições. O número total de vasos era então de: 6 tratamentos x 4 repetições = 24 vasos. Cada vaso foi preparado com 8 kg de solo, cujas propriedades foram apresentadas na tabela 3.

A quantidade de nitrogênio aplicado no solo para cada vaso de 8 kg foi de 7,4 g, o fertilizante utilizado foi nitrato de amônio (27% N, 50% NH₄⁺, 50% NO₃⁻). Para fósforo foram utilizadas 11,1 g por vaso do fertilizante Super 18 (18% P₂O₅, 16% de P₂O₅ solúvel em água e 17 % de P₂O₅ solúvel em citrato de amônio neutro). Além disso os vasos receberam 1,6 g de K₂O. Para biochar utilizaram-se 35,7 g por vaso e no caso dos zeólitos a quantidade usada foi de 17,8 g por vaso.

As operações de plantio e adubação foram realizadas no dia 23 de maio de 2018.

3.4 Técnicas culturais

3.4.1 Ensaio a campo

O ensaio foi instalado após mobilização do solo com charrua de aivecas, de forma a incorporar a vegetação espontânea. Posteriormente passou-se um escarificador para preparar a cama para a semente e incorporar os fertilizantes.

No dia 15 de maio de 2018 foi efetuada a aplicação dos fertilizantes nos talhões experimentais. A aplicação foi efetuada de forma manual e os fertilizantes incorporados com uma escarificação, como se referiu. A fertilização mineral de nitrogênio foi efetuada de forma fracionada, isto é, a adubação de fundo foi feita no dia 15 de maio de 2018 e consistiu na aplicação de um terço da dose do fertilizante mineral em cada um dos talhões fertilizados. A adubação de cobertura consistiu na aplicação dos restantes dois terços do fertilizante e foi efetuada no dia 7 de junho de 2018. Os fertilizantes orgânicos foram aplicados em fundo no dia 15 de maio.

O híbrido Monero, de ciclo tipo FAO 500, foi semeado no dia 15 de Maio de 2018, com um compasso de 0,7x0,18 m o que representa uma densidade próxima de 80 000 plantas por hectare.

Durante o ciclo da cultura foi aplicado um herbicida de absorção foliar em pós-emergência, designadamente o produto comercial Laudis, cuja formulação é uma dispersão em óleo de 22 g L⁻¹ de isoxadifene-etilo e 44 g L⁻¹ de tembotriona. Foi aplicado na concentração de 0,5 L hL⁻¹ e na dose de 2 L ha⁻¹, no dia 18 de junho quando as plantas se encontravam no estado fenológico de 4 a 6 folhas.

A cultura foi regada em junho, julho e agosto. Na ausência de precipitação era efetuada uma rega semanal com dotação de 40 mm, num total aproximado de 400 mm durante a estação de crescimento.

Como o objetivo da produção era para silagem, a colheita do milho foi realizada no dia 23 de agosto de 2018.

3.4.2 Ensaio em vasos

Foi coletado solo num local próximo das estufas do Instituto Politécnico de Bragança na camada 0-20 cm. O solo foi crivado num crivo de malha 4 cm e devidamente homogeneizado. Depois foram pesadas porções de 8 kg de solo para cada vaso e misturado os respectivos fertilizadas e condicionadores para cada tratamento.

Após a preparação dos vasos foi feita a semeadura manualmente no dia 23 de maio de 2018 com três sementes por vaso. Após a germinação, escolheu-se a plântula que aparentemente fosse mais vigorosa e retirada as outras duas, ficando apenas uma planta por vaso.

A rega no início do desenvolvimento foi baseada em 2/3 da capacidade máxima de retenção de água do solo. A periodicidade era ajustada às condições ambientais e em função do estado hídrico aparente do solo e da planta no momento da rega. Com o aumento do desenvolvimento, a frequência da rega passou a ser diária devido às condições ambientais que tinham agora temperatura ambiente mais elevada, situação que favorecia a evapotranspiração e o rápido esgotamento de água no solo. A quantidade de água aplicada também era feita em função do estado hídrico aparente do solo e da planta.

3.5 Determinações

As determinações laboratoriais das amostras da presente pesquisa ocorreram na Unidade de Química Analítica da Escola Superior Agrária e no Centro de Investigação de Montanha (CIMO) do Instituto Politécnico de Bragança.

3.5.1 Análise nos tecidos vegetais

Após a determinação do teor de matéria seca das amostras em estufa de ventilação forçada regulada a 65 °C, estas foram moídas num moinho Cyclotec 1030 FOSS com uma malha de 1mm. Quando o tamanho das amostras era demasiado pequeno, estas foram trituradas com as mãos até que as partículas atingissem o tamanho aproximado de 1 mm, de modo a evitar perdas de biomassa no moinho.

Com as amostras moídas, passou-se à determinação da concentração de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, cobre, ferro, zinco e manganês na biomassa seca.

Nitrogênio – Foi determinado pelo método N Kjeldahl, o qual envolve dois passos: o primeiro consiste na digestão da amostra para conversão no nitrogênio orgânico em N-NH₄⁺. Para a realização desta análise, pesou-se um grama das amostras para tubos de digestão. Posteriormente adicionaram-se 15 ml de ácido sulfúrico concentrado e duas pastilhas de um catalisador de selênio. Em seguida, as amostras foram posicionadas em um bloco de digestão em alumínio a uma temperatura de 400 °C por 70 minutos. Após a digestão e o período de arrefecimento, os tubos foram encaminhados para o equipamento

Kjeltec TM 8400 Autoanalyser FOSS. O digerido então destilado com hidróxido de sódio e a amônia formada, arrastada numa corrente de vapor, é determinada por titulação com ácido clorídrico numa solução recetora de ácido bórico (Bremner, 1996).

Boro - Adicionou-se 0,10 g de óxido de cálcio às amostras e misturou-se até a amostra ficar homogênea. Posteriormente, realizou-se a queima das amostras em mufla a temperatura de 500 °C durante 90 minutos. Após a queima, adicionou-se ácido sulfúrico 0,5 M e depois de 30 minutos filtraram-se as amostras com papel de filtro. Depois de filtradas, foi adicionada azometina-H, e realizaram-se as leituras de absorbância das amostras em espectrofotômetro com comprimento de onda 420 nm (Walinga et al., 1989).

Fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, zinco e manganês – As amostras de tecidos foram digeridas com ácido nítrico em um aparelho micro-ondas CEM MARS XPRESS para a quantificação de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, zinco e manganês. Os cátions cálcio e magnésio, cobre, ferro, zinco e manganês foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o potássio por espectrofotometria de emissão de chama, num equipamento UNICAM PU 9100X. O fósforo foi determinado depois de se promover o desenvolvimento de uma cor azul, usando o método azul de molibdato e o ácido ascórbico como agente redutor (Walinga et al., 1997). Nesta determinação foi utilizado um espectrofotômetro GENESYS e o comprimento de onda de 882 nm.

3.5.2 Análise de solos

A seguir descrevem-se brevemente os procedimentos analíticos efetuados na fração terra fina para determinação das características químicas do solo.

Textura do solo – Método da pipeta de Robinson (Van Reeuwijk, 2002).

pH em água - Preparou-se uma amostra com proporção entre solo e água de (p/v) 1:2,5. Na leitura foi utilizado um potenciômetro (Van Reeuwijk, 2002).

pH em cloreto de potássio (KCl) - Preparou-se uma amostra com proporção entre solo e solução de 1M KCl de 1 para 2,5 (p/v). Agitou-se por 2 horas e fez-se a leitura em um potenciômetro (Van Reeuwijk, 2002).

Avaliação de fósforo e potássio – A determinação das formas prontamente solúveis de fósforo e potássio são feitas através da extração com uma combinação de lactato de amônio e ácido acético, solução tamponada em pH 3.7. O fosfato extraído é

determinado colorimetricamente através do método do molibdato de amônio azul com ácido ascórbico como agente redutor (Almeida e Balbino, 1960).

Matéria orgânica - A matéria orgânica foi determinada pelo método Walkley-Black. Este método consiste numa digestão húmida da matéria orgânica da amostra de solo com a mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico durante 30 minutos. Para a determinação do carbono facilmente oxidável, o dicromato residual foi titulado com sulfato de ferro amoniacal e o teor de matéria orgânica foi estimado através da multiplicação da percentagem de carbono pelo fator 1,72, associando a suposição de que a matéria orgânica da amostra de solo contém cerca de 58% de carbono (Van Reeuwijk, 2002).

Capacidade de troca de cátion - Foi percolada uma amostra de solo com uma solução de acetato de amónio tamponizada a pH 7 após 30 minutos de contato e agitação. Os cátions Ca e Mg foram mensurados por absorção atômica e K e Na por espectrometria de emissão de chama (Van Reeuwijk, 2002) num equipamento UNICAM PU 9100X.

Boro – O boro foi determinado pelo método de extração com água quente e utilizando o procedimento colorimétrico com base em azometina-H, um agente complexante de $B(OH)_3$ em meio aquoso (Keren, 1996; Offia, 1993).

Fósforo lábil – Para avaliação de fósforo lábil procedeu-se a uma primeira extração de fósforo com uma membrana de resina de troca aniónica da marca BDH e uma segunda extração com $NaHCO_3$, frações que correspondem às frações mais biodisponíveis descritas por Hedley *et al.* (1982). O fósforo lábil é então calculado através da soma das duas frações extraídas de forma sequencial.

Fosfatase ácida - A atividade da enzima fosfatase ácida foi determinada através da metodologia proposta por Alef *et al.* (1995). O método consiste na avaliação da quantidade de p-nitrofenolfostato formado após a incubação de uma amostra de solo durante uma hora a 37°C com p-nitrofenilfosfato na presença de tolueno e um tampão universal. Após o período de incubação e adição dos restantes reagentes associados ao método ($CaCl_2$ e $NaOH$), o filtrado das amostras e respetivos controles é lido num espectrofotómetro com comprimento de onda 420 nm. Após a correção dos valores das amostras com os controles, os resultados são expressos em mg de p-nitrofenol por kg de solo seco por hora ($mg\ p\text{-nitrofenol}\ g^{-1}\ h^{-1}$).

3.5.3 Mensuração SPAD

O SPAD 502 (Soil Plant Analysis Development) é um aparelho que mede a transmitância da luz através das folhas das plantas, fornecendo a intensidade de sua coloração verde (clorofila). O dispositivo mede a transmitância da luz através da folha em dois comprimentos de onda diferentes, 650 nm (luz vermelha, absorvida pelos pigmentos de clorofila) e 940 nm (luz infravermelha, não absorvida pela clorofila) mostrando as clorofilas-SPAD, que são proporcionais ao conteúdo de clorofila da folha. Sua unidade de medição é adimensional.

É utilizado como indicador do estado do nitrogênio na planta, bem como indicador de desequilíbrios nutritivos e de iluminação (Kassoma et al., 2005).

3.5.4 Leituras NDVI

O índice de vegetação de diferença normalizado (NDVI) foi estimado utilizando o medidor NDVI Field Scout CM 1000. O valor do NDVI (-1 a 1) é calculado a partir da área medida e a quantidade de luz refletida nessa área $[(\% \text{Infravermelho próximo} - \% \text{Vermelho}) / (\% \text{Infravermelho próximo} + \% \text{Vermelho})]$. As leituras são feitas pressionando um gatilho, que ativa os lasers de segmentação, fazendo a mensuração e calculando os valores. As leituras foram tiradas do limbo de folhas jovens totalmente expandidas. As medidas foram tomadas a partir de ângulos de incidência do feixe de luz com a superfície da folha a 90 graus, é uma forma em que as folhas frequentemente se apresentam.

3.5.5 Produção de biomassa

Para caracterização da biomassa foi colhido um metro linear (0,7m²), dentro de cada parcela e retirado o peso dessa amostra. Desta amostra considerou-se uma sub amostra a qual foi levada para o laboratório, pesada novamente e colocado na estufa a 100 °C para retirar o peso seco da sub amostra e posteriormente calcular a produção total de biomassa por cada parcela e expressa por kg de matéria seca por ha (kg MS ha⁻¹).

3.5.6 Análise estatística

Os dados foram tabulados e submetidos à análise de homogeneidade de variância (teste de Bartlett) e de normalidade (teste de Lilliefors). Atendidos estes pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância (Anova) pelo teste F 5% ($p < 0,05$). Quando ocorreram diferenças significativas ($\alpha < 0,05$) e o modelo contemplava mais de dois tratamentos, as médias foram separadas pelo teste de comparação múltipla de médias Tukey HSD ($\alpha = 0,05$). Quando havia somente duas médias, a comparação das médias era feito pelo teste t-Student ($\alpha = 0,05$). As análises foram feitas no programa estatístico JMP versão 7.



4 Resultados

4.1 Experiência em vasos

4.1.1 Parâmetros avaliados no solo

Apresentam-se agora os resultados das análises efetuadas ao solo, nomeadamente os resultados de pH, potássio, boro, M.O., complexo de troca, fósforo biodispnível e atividade da enzima fosfatase ácida.

Relativamente ao pH em H₂O e KCl, encontraram-se diferenças significativas para o fator doses de P (tabela 5). A aplicação de fósforo originou uma diminuição do de pH do solo. No nível dos condicionadores, os zeólitos apresentaram maior pH em H₂O (6,59) e em KCl (5,31) e diferiram estatisticamente de biochar e do tratamento mineral, os quais apresentaram valores de pH muito semelhantes entre si.

De maneira geral, os fatores não apresentaram diferenças para os valores de potássio (tabela 5). Contudo, para o fator doses, o tratamento sem fósforo apresentou maior valor médio (81 mg K₂O kg⁻¹) e entre condicionadores foram os zeólitos que apresentaram o maior valor médio (83 mg K₂O kg⁻¹). Em termos da classificação dos solos estes valores são considerados na gama média.

Tabela 5. pH, K₂O e B no solo em resposta ao uso de doses de fósforo e condicionadores. Separadas por doses de fósforo e condicionadores, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelos testes t-Student ($\alpha = 0,05$) e Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), respetivamente.

Fatores	pH do solo				K ₂ O	B		
	H ₂ O		KCl			mg kg ⁻¹		
Dose de P (A)								
-P	6,59	a	5,29	a	81,0	a	0,63	a
+P	6,45	b	5,10	b	78,5	a	0,64	a
Condicionadores (B)								
Mineral	6,47	b	5,13	b	78,0	a	0,64	a
Biochar	6,51	ab	5,13	b	78,3	a	0,66	a
Zeólitos	6,59	a	5,31	a	83,0	a	0,61	a
Anova								
Fator A (prob)	<,0001		0,0003		0,4286		0,9435	
Fator B (prob)	0,0053		0,0028		0,3432		0,8733	
Interação AxB (prob)	0,9566		0,0161		0,2292		0,8481	

O teor de boro no solo também não diferiu significativamente entre os fatores em estudo (tabela 5). Tal como no caso do potássio, os valores de boro no solo são classificados de médios.

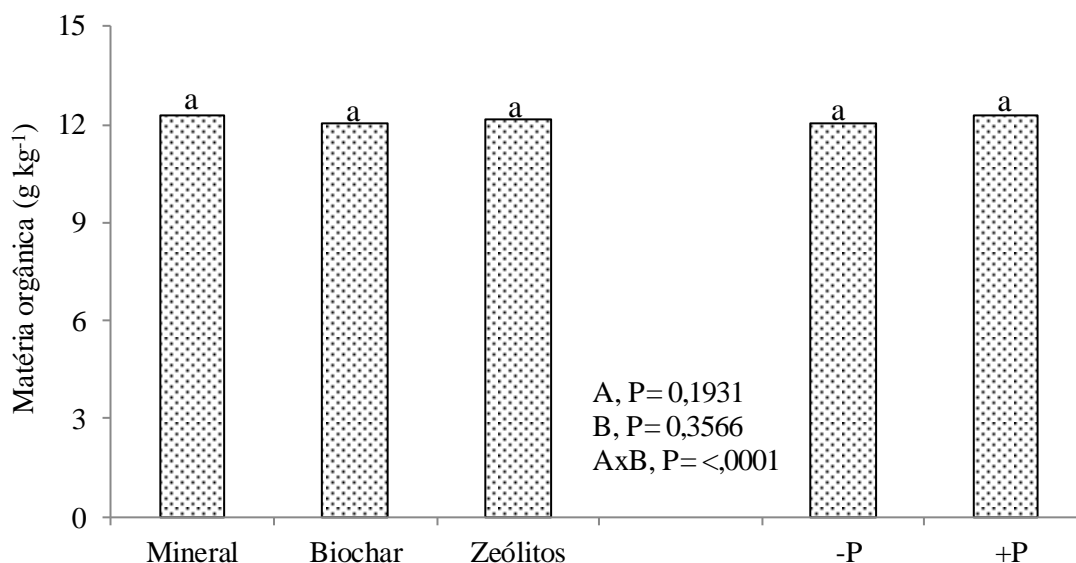


Figura 5. Matéria orgânica do solo em resposta ao uso de condicionadores e doses de fósforo. Separadas por condicionadores e doses de fósforo, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelos testes Tukey HSD ($\alpha = 0,05$) e t-Student ($\alpha = 0,05$), respectivamente.

Não houve efeito significativo na matéria orgânica para o fator condicionadores, nem para as doses de fósforo. Sendo que todos os níveis apresentaram cerca de 12 g de matéria orgânica por kg de solo como ilustra a figura 5.

Os resultados da análise ao complexo de troca dos solos encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6. Complexo de trocas do solo em resposta ao uso doses de fósforo e condicionadores. Separadas por doses de fósforo e condicionadores, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelos testes t-Student ($\alpha = 0,05$) e Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), respectivamente.

Fatores	Complexo de troca				
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CTCe
	Cmol ₍₊₎ kg ⁻¹				
Doses de P (A)					
-P	9,39	4,60	0,26	0,78	15,06
+P	9,64	4,48	0,24	0,80	15,23
Condicionadores (B)					
Mineral	9,15	4,39	0,23	0,77	14,58
Biochar	9,88	4,70	0,26	0,80	15,69
Zeólitos	9,52	4,54	0,25	0,80	15,17
Anova					
Fator A (prob)	0,3401	0,5751	0,1757	0,4210	0,6804
Fator B (prob)	0,1014	0,4547	0,0922	0,2199	0,1327
Interação AxB (prob)	0,9406	0,9995	0,1704	0,8668	0,9784

Uma importante propriedade química do solo é a capacidade de troca catiônica, normalmente influenciada pela adição de biochar ou zeólitos. Os valores representam o somatório das concentrações de cálcio, magnésio, potássio, sódio e acidez de troca que inclui o alumínio (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ e Al^{3+}).

Nesta experiência não se encontraram diferenças estatísticas, os valores para o fator condicionadores variaram entre 15,69 e 14,58 cmol (+) kg^{-1} . Para doses de fósforo os valores variaram entre 15,23 a 15,06 cmol (+) kg^{-1} . Vale ressaltar que o cálcio contribuiu com mais de 50% do valor de CTC (Tabela 6).

4.1.1.1 Fósforo biodisponível

Houve efeito significativo sobre o teor de fósforo extraível pelo método Egner-Riehm para o fator condicionadores, na condição os zeólitos apresentaram 55,66 $\text{mg de P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ de solo e foram superiores ao biochar e mineral, tal como apresenta a figura 6. No nível doses de fósforo também houve diferença significativa, onde o tratamento +P (41,44 $\text{mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) destacou-se sobre o -P.

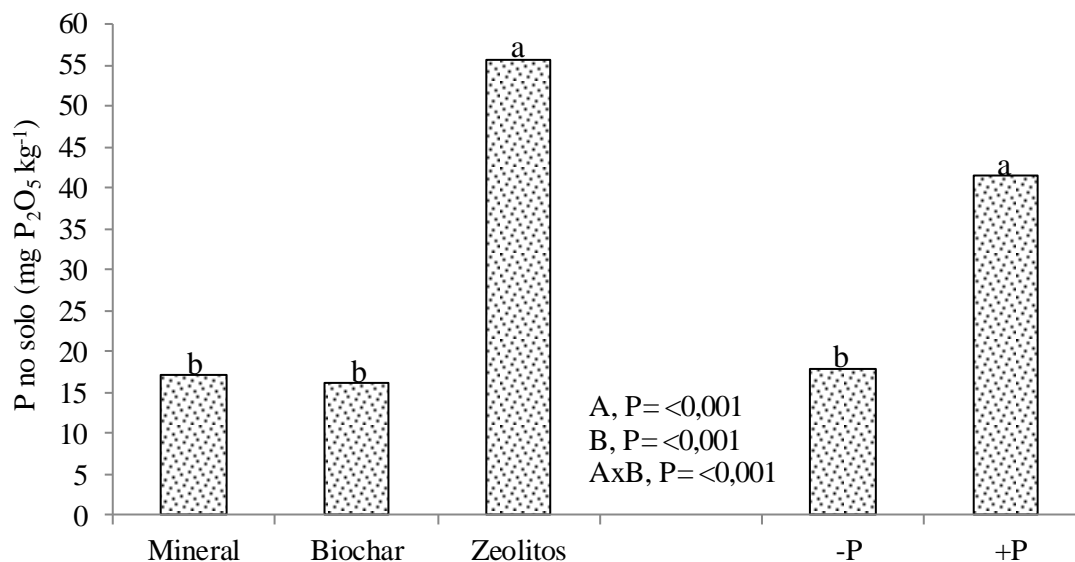


Figura 6. Fósforo no solo em resposta ao uso de condicionadores e doses de fósforo. Separadas por condicionadores e doses de fósforo, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelos testes Tukey HSD ($\alpha = 0,05$) e t-Student ($\alpha = 0,05$), respectivamente.

O fósforo também apresentou diferença significativa em algumas outras frações. A extração com resina (Pi-Res) e com NaHCO_3 (Pi-Bic), corresponde às frações mais

biodisponíveis. O fósforo lábil (Pi-Lábil) é então calculado através da soma das duas frações extraídas de forma sequencial.

Para o nível condicionador de solo, o biochar apresentou diferenças significativas para os zeólitos e mineral, nas três frações, respectivamente. Essa diferença significativa também foi observada nas doses de P, onde o +P foi superior nas três frações de fósforo, quando comparado ao -P. Essas diferenças podem ser observadas na figura 7.

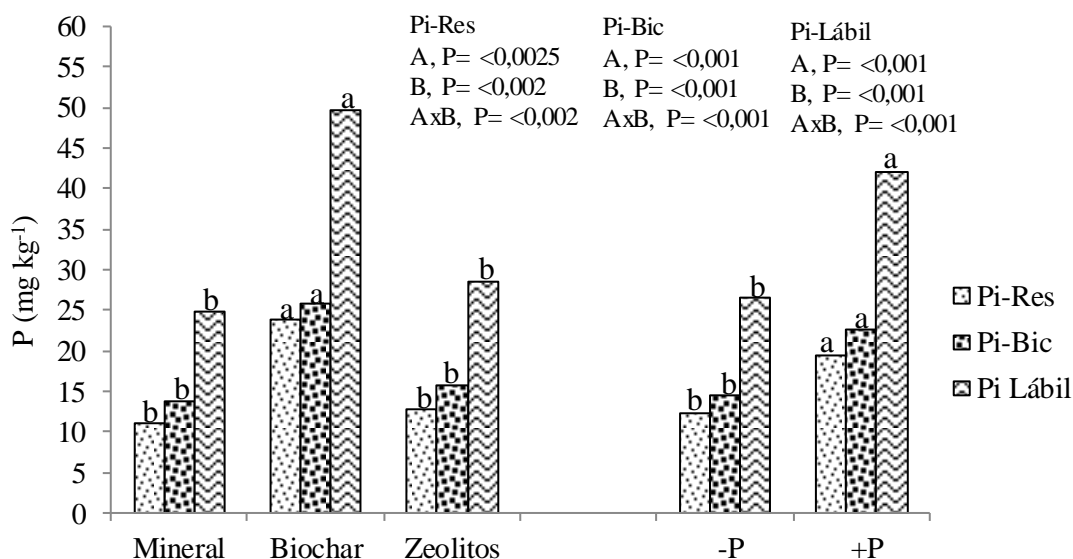


Figura 7. Pi-Res, Pi-Bic e Pi-Lábil no solo em resposta ao uso de condicionadores e doses de fósforo. Separadas por condicionadores e doses de fósforo, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelos testes Tukey HSD ($\alpha = 0,05$) e t-Student ($\alpha = 0,05$), respectivamente.

4.1.1.2 Atividade da fosfatase ácida

Foram observadas diferenças significativas no nível dos condicionadores de solo, onde os zeólitos apresentaram a maior atividade da fosfatase ácida (185, 57 mg *p*-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹), seguidos do tratamento mineral (159,95 mg *p*-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹) e biochar (153,03 mg *p*-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹). Para o fator doses de P não houve diferenças significativas, embora o tratamento +P tenha apresentado maior atividade média (173,09 mg *p*-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹) e -P a menor atividade da fosfatase (159,28 mg *p*-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹), como ilustra a figura 8.

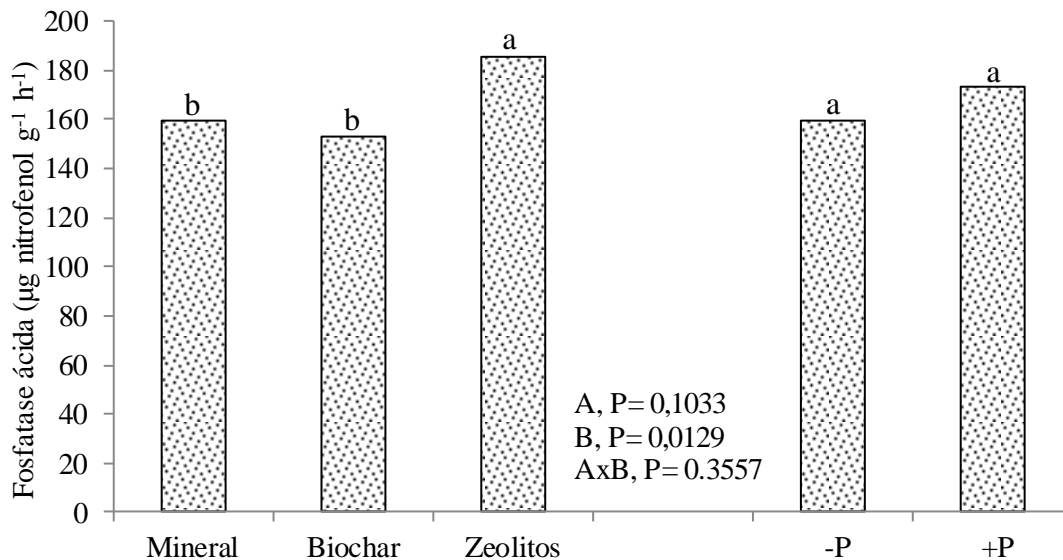


Figura 8. Fosfatase ácida no solo em resposta ao uso de condicionadores e doses de fósforo. Separadas por condicionadores e doses de fósforo, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelos testes Tukey HSD ($\alpha = 0,05$) e t-Student ($\alpha = 0,05$), respectivamente.

4.1.2 Parâmetros avaliados nas folhas

Apresentam-se agora os resultados das análises efetuadas as folhas, nomeadamente os resultados das leituras NDVI e SPAD, as contrações de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (B, Fe, Mn, Zn e Cu).

Na experiência em vasos foram avaliados alguns parâmetros nas folhas. Na tabela 7 estão ilustradas as leituras de NDVI e SPAD aos 69 e 83 dias após o plantio (DAP). Não foram encontradas diferenças significativas nas leituras de NDVI, tanto para o nível doses de P, quanto aos condicionadores nas duas datas avaliadas. Os zeólitos foram o tratamento que apresentou maior valor médio de leitura, e o tratamento sem fósforo o menor, para as duas datas.

Nas leituras do SPAD foram encontradas diferenças significativas somente aos 83 DAP para o fator doses de P, onde +P (19,78) foi superior a -P (14,90). Os zeólitos foram o tratamento que apresentou maior valor médio aos 69 e 83 DAP no fator condicionadores, porém sem diferença significativa (tabela 7).

Seguindo a sequência das avaliações foram retiradas as medidas das plantas em duas épocas de crescimento, aos 69 e 83 dias após o plantio (DAP). O que pode se notar na figura 9 é que as plantas apresentaram diferença significativas de crescimento nas duas datas de amostragem.

Tabela 7. Leituras de NDVI e SPAD em resposta ao uso doses de fósforo e condicionadores. Separadas por doses de fósforo e condicionadores, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelos testes t-Student ($\alpha = 0,05$) e Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), respectivamente.

Fatores	NDVI				SPAD			
	69DAP		83DAP		69DAP		83DAP	
Dose de P (A)								
-P	0,62	a	0,64	a	26,44	a	14,90	b
+P	0,65	a	0,66	a	26,99	a	19,78	a
Condicionadores (B)								
Mineral	0,65	a	0,66	a	26,35	a	17,65	a
Biochar	0,62	a	0,65	a	26,80	a	16,67	a
Zeólitos	0,67	a	0,68	a	27,00	a	17,70	a
Anova								
Fator A (prob)	0,0571		0,1595		0,7315		<,0001	
Fator B (prob)	0,3247		0,6244		0,9406		0,4752	
Interação AxB (prob)	0,8143		0,5801		0,6657		0,1763	

Para o fator condicionador de solo, a avaliação aos 69 DAP não apresentou nenhuma diferença significativa entre os tratamentos, onde todos permaneceram com quase a mesma altura (figura 9). Quando a avaliação foi feita aos 83 DAP, notou-se uma diferença significativa, onde os zeólitos sobressaíram sobre o biochar.

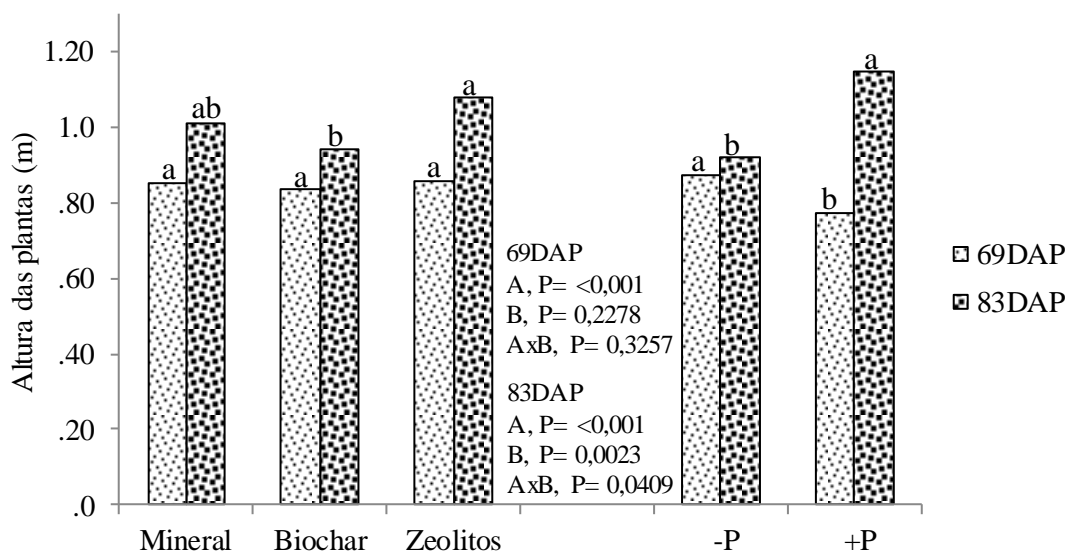


Figura 9. Altura das plantas aos 69 e 83 dias após o plantio (DAP) em resposta ao uso de condicionadores e doses de fósforo. Separadas por condicionadores e doses de fósforo, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelos testes Tukey HSD ($\alpha = 0,05$) e t-Student ($\alpha = 0,05$), respectivamente.

Nos níveis doses de P, aos 69 DAP ocorreu diferença significativa onde o tratamento -P se diferiu estatisticamente do +P. Porém, essa diferença não ocorreu após os 14 dias na avaliação 83 DAP, onde o +P se sobressaiu e apresentou diferença significativa do -P (figura 9).

Na tabela 8 estão os valores de alguns macronutrientes avaliados nas folhas. No nível doses de P, o nutriente nitrogênio apresentou diferença significativa, tendo diferido o tratamento -P (5,9 g N kg⁻¹) do +P (4,6 g N kg⁻¹). No fator condicionador não houve diferenças, o maior valor médio para nitrogênio foi encontrado no tratamento mineral (5,4 g N kg⁻¹).

Quando se determinou a concentração de K, no fator doses de P encontraram-se diferenças estatísticas, onde o -P (24,68 g K kg⁻¹) foi mais elevado que +P (20,52 g K kg⁻¹). Nos condicionadores de solo também ocorreram diferenças significativas entre os zeólitos (24,95 g K kg⁻¹), biochar (22,60 g K kg⁻¹) e mineral (20,26 g K kg⁻¹), como mostra a tabela 8.

A concentração de Ca também apresentou diferenças significativas (tabela 8). Analisando o fator doses de P, -P (3,06 g Ca kg⁻¹) obteve diferença significativa sobre +P (2,31 g Ca kg⁻¹). Para o fator condicionador de solo a maior concentração de Ca foi registrada no tratamento mineral (3,25 g Ca kg⁻¹) que foi significativamente maior que biochar (2,38 g Ca kg⁻¹) e zeólitos (2,44 g Ca kg⁻¹).

Tabela 8. Concentração de N, K, Ca e Mg das folhas em resposta ao uso doses de fósforo e condicionadores. Separadas por doses de fósforo e condicionadores, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelos testes t-Student ($\alpha = 0,05$) e Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), respectivamente.

Fatores	N		K		Ca		Mg	
	g kg ⁻¹							
Dose de P (A)								
-P	5,9	a	24,68	a	3,06	a	2,06	a
+P	4,6	b	20,52	b	2,31	b	1,59	b
Condicionadores (B)								
Mineral	5,4	a	20,26	b	3,25	a	1,77	a
Biochar	5,3	a	22,60	ab	2,38	b	1,80	a
Zeólitos	5,0	a	24,95	a	2,44	b	1,91	a
Anova								
Fator A (prob)	0,0007		0,0020		<,0001		<,0001	
Fator B (prob)	0,6375		0,0117		0,0001		0,2063	
Interação AxB (prob)	0,5252		0,1397		0,0002		0,0816	

Na concentração de magnésio nas folhas, o fator doses de P também diferença no teste de média, quando o tratamento -P (2,06 g de Mg kg⁻¹ de solo) foi maior que +P (1,59 g de Mg kg⁻¹ de solo). No fator condicionadores de solo não foi encontrado diferenças significativas, mas os zeólitos (1,91 g Mg kg⁻¹) apresentaram o maior valor médio como mostra a tabela 8.

Na figura 10 está ilustrada a concentração de o P nas folhas em resposta aos condicionadores e às doses de P. Para o fator condicionadores não houve diferenças significativas entre os tratamentos, sendo que biochar (1,59 g P kg⁻¹) registrou o valor mais elevado. Já para o fator doses de P, houve diferenças significativas entre +P (1,78 g P kg⁻¹) e o tratamento -P (1,19 g P kg⁻¹).

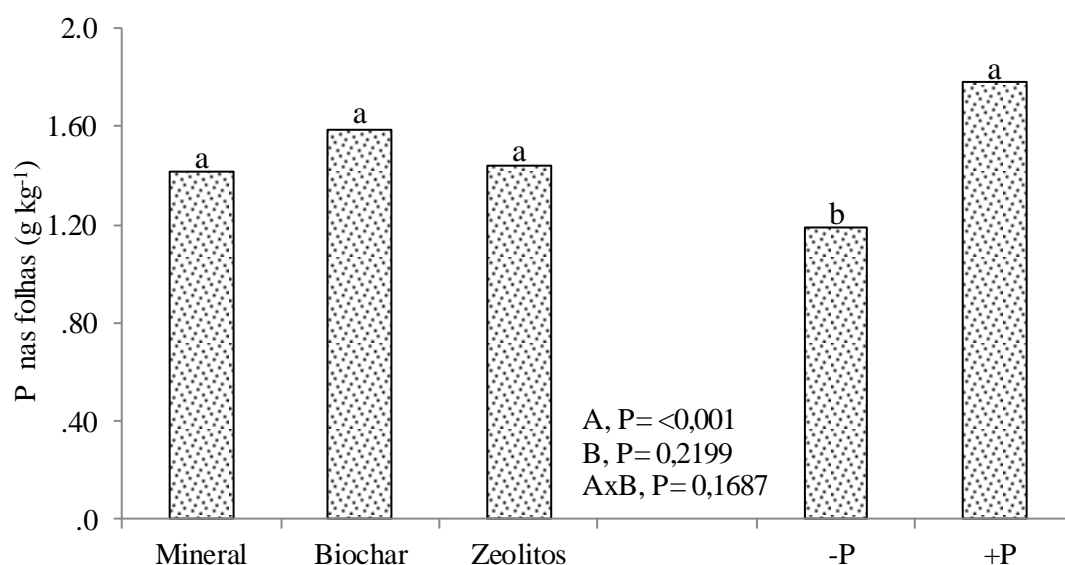


Figura 10. Concentração de fósforo nas folhas em resposta ao uso de condicionadores e doses de fósforo. Separadas por condicionadores e doses de fósforo, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelos testes Tukey HSD ($\alpha = 0,05$) e t-Student ($\alpha = 0,05$), respectivamente.

Os micronutrientes avaliados nas folhas da experiência em vasos estão apresentados na tabela 9. Quando se investigou B no fator doses de P, não observou-se diferença significativa entre -P (11,71 mg B kg⁻¹) e +P (11,04 mg B kg⁻¹). Para o fator condicionador de solo não se obtiveram diferenças significativas, embora o tratamento zeólitos tenha apresentado valor médio (11,87 mg B kg⁻¹) superior a biochar e mineral.

No fator doses de P, quando se estudou a concentração de Fe encontrou-se diferença significativa, onde +P (400,49 mg Fe kg⁻¹) originou valores mais elevados que -P (294,98 mg Fe kg⁻¹). Nos condicionadores, os zeólitos apresentaram o maior valor médio (382,24 mg Fe kg⁻¹), mas que não diferiu do mineral e do biochar, como ilustra a tabela 9.

No caso do manganês não houve diferenças para o fator doses de P (tabela 9), mas +P (63,10 mg Mn kg⁻¹) apresentou valores médios mais elevados que -P (61,32 mg Mn kg⁻¹). No fator condicionadores houve diferenças significativas, sendo os valores de biochar (72,60 mg Mn kg⁻¹) significativamente superiores aos dos zeólitos (58,66 mg Mn kg⁻¹) e do tratamento mineral (55,38 mg Mn kg⁻¹).

O micronutriente Zinco apresentou diferenças significativas somente para o fator doses de P, onde -P (27,29 mg Zn kg⁻¹) diferiu de +P (15,21 mg Zn kg⁻¹). Entre condicionadores não houve diferenças significativas e o biochar (23,85 mg Zn kg⁻¹) apresentou o maior valor médio, como mostra a tabela 9.

O único elemento que não apresentou diferenças para os dois fatores em estudos foi o cobre. Contudo, entre doses de P, a concentração de Cu nas folhas foi superior no +P (7,48 mg Cu kg⁻¹) e entre condicionadores, os zeólitos apresentaram os valores médio mais elevados (7,35 mg Cu kg⁻¹) (tabela 9).

Tabela 9. Concentração de B, Fe, Mn, Zn e Cu nas folhas em resposta ao uso doses de fósforo e condicionadores. Separadas por doses de fósforo e condicionadores, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelos testes t-Student ($\alpha = 0,05$) e Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), respetivamente.

Fatores	mg kg ⁻¹									
	B		Fe		Mn		Zn		Cu	
Doses de P (A)										
-P	11,71	a	294,98	b	61,32	a	27,29	a	7,02	a
+P	11,04	a	400,49	a	63,10	a	15,21	b	7,48	a
Condicionadores (B)										
Mineral	10,90	a	335,34	a	55,38	b	17,04	a	7,27	a
Biochar	11,36	a	325,61	a	72,60	a	23,85	a	7,13	a
Zeólitos	11,87	a	382,24	a	58,66	b	22,87	a	7,35	a
Anova										
Fator A (prob)	0,2380		0,0047		0,5768		0,0002		0,2923	
Fator B (prob)	0,3742		0,3047		0,0016		0,0621		0,9143	
Interação AxB (prob)	0,1849		0,0143		0,1065		0,2374		0,9228	

4.2 Ensaio de campo

4.2.1 Parâmetros avaliados nas folhas antes da adubação de cobertura

Apresentam-se agora os resultados das análises efetuadas as folhas, nomeadamente os resultados das leituras SPAD e NDVI, as contetrações de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (B, Fe, Mn, Zn e Cu).

As primeiras avaliações feitas no campo foram as leituras SPAD e NDVI, sendo organizadas na tabela 10. As leituras SPAD aos 74 DAP não mostraram diferenças significativas entre doses de P e condicionadores, tendo os valores variado entre 48,1 e 50,0. Nas leituras NDVI ocorreu um resultado similar, não se tendo registado diferenças significativas entre doses ou condicionadores. Os valores médios variaram entre 0,81 e 0,84.

Tabela 10. Leituras SPAD e NDVI em resposta ao uso doses de fósforo e condicionadores. Separadas por doses de fósforo e condicionadores, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferente pelo teste Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), respetivamente.

Fatores	SPAD		NDVI	
	74 DAP		74 DAP	
Dose de P (A)				
P0	49,8	a	0,81	a
P50	48,4	a	0,84	a
P100	48,1	a	0,83	a
P200	50,0	a	0,83	a
Condicionadores (B)				
Mineral	48,1	a	0,84	a
Biochar	49,9	a	0,81	a
Zeólitos	49,4	a	0,82	a
Anova				
Fator A (prob)	0,1193		0,4615	
Fator B (prob)	0,1045		0,1778	
Interação AxB (prob)	0,2542		0,4248	

Os macronutrientes avaliados nas folhas se encontram dispostos na tabela 11. Relativamente ao nitrogênio, a concentração do elemento não apresentou diferenças significativas entre doses de P nem entre condicionadores, tendo todos os valores médios ficado muito próximos, entre 27,13 e 28,88 g N kg⁻¹.

Aspecto mais relevante é o facto da concentração de P também não ter registado diferenças estatísticas entre doses e os condicionadores, uma vez que foi aplicado em dose diferenciada ao solo. Para o fator doses de P, o maior valor médio lido foi para P100 (2,53 g P kg⁻¹) e o menor para P50 (2,31 g P kg⁻¹). Entre condicionadores, os valores médios no tratamento mineral (2,47 g de P kg⁻¹ de solo) foram ligeiramente mais elevados que em biochar (2,45 g P kg⁻¹) e o zeólitos (2,37 g P kg⁻¹).

Para a concentração de K, no fator doses de P encontraram-se diferenças significativas nos valores avaliados nas folhas (tabela 11). O tratamento P200 registrou os valores mais elevados (14,57 g K kg⁻¹) e P100 os mais baixos (9,80 g K kg⁻¹). Entre

condicionadores também houve diferenças significativas, sendo os valores no tratamento mineral os mais elevados (14,58 g K kg⁻¹) e os do biochar os mais baixos (10,66 g K kg⁻¹).

Para o macroelemento Ca foram registradas diferenças significativas nos dois fatores em estudo, como ilustra a tabela 11. Entre doses de P, o tratamento P200 foi onde se registaram os valores mais elevados (3,54 g Ca kg⁻¹), sendo que P100 registou os menores (2,92 g Ca kg⁻¹). No fator condicionadores, zeólitos e biochar (3,58 e 3,41 g Ca kg⁻¹, respectivamente) apresentaram diferenças significativas do mineral (2,57 g Ca kg⁻¹).

No caso do Mg, o fator doses de P apresentou diferenças significativas, onde P100 apresentou os resultados mais elevados (4,30 g Mg kg⁻¹), tendo os valores mais baixos sido encontrados no P200 (3,58 g Mg kg⁻¹). No fator condicionadores, o biochar (4,38 g Mg kg⁻¹) apresentou diferenças significativas para os demais, onde mineral (3,52 g Mg kg⁻¹) originou o menor valor (tabela 11).

Tabela 11. Concentração de N, P, K, Ca e Mg nas folhas em resposta ao uso doses de fósforo e condicionadores. Separadas por doses de fósforo e condicionadores, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), respectivamente.

Fatores	g kg ⁻¹									
	N		P		K		Ca		Mg	
Dose de P (A)										
P0	27,13	a	2,31	a	11,67	ab	3,07	b	4,02	ab
P50	27,68	a	2,37	a	12,89	ab	3,22	ab	3,99	b
P100	27,71	a	2,53	a	9,80	b	2,92	b	4,30	a
P200	27,88	a	2,51	a	14,57	a	3,54	a	3,58	c
Condicionadores (B)										
Mineral	27,47	a	2,47	a	14,58	a	2,57	b	3,52	c
Biochar	27,77	a	2,45	a	10,66	b	3,41	a	4,38	a
Zeólitos	27,56	a	2,37	a	11,47	ab	3,58	a	4,01	b
Anova										
Fator A (prob)	0,8447		0,1102		0,0362		0,0007		<,0001	
Fator B (prob)	0,9211		0,4447		0,0185		<,0001		<,0001	
Interação AxB (prob)	0,6902		0,5525		0,1685		<,0001		<,0001	

A seguir na tabela 12 estão descritos os valores referentes aos micronutrientes avaliados nas folhas da planta de milho. O B apresentou diferenças significativas para os fatores doses de P, sendo que P200 (12,98 mg B kg⁻¹) foi a maior média e a menor foi P100 (7,32 mg B kg⁻¹). Os condicionadores não apresentaram diferenças, onde a maior média obtida foi no Mineral (10,28 mg B kg⁻¹).

Para a concentração de Fe não houve diferenças significativas para o fator doses de P, sendo os valores médios em P200 os mais elevados (81,17 mg Fe kg⁻¹). Já entre condicionadores encontraram-se diferenças significativas, sendo os valores mais elevados registados em zeólitos (88,18 mg Fe kg⁻¹) e os mais baixos em mineral (68,15 mg Fe kg⁻¹) como mostra a tabela 12.

A concentração de Mn não apresentou diferenças para nenhum dos fatores analisados, seja as doses de P ou os condicionadores. O maior valor encontrada nas doses de P foi no P50 (26,99 mg Mn kg⁻¹) e nos condicionadores foi no tratamento com biochar (26,78 mg Mn kg⁻¹).

A concentração de Cu, assim como a concentração de Mn também não apresentaram diferenças significativas entre os fatores em estudo (Tabela 12). Entre doses de P, em P0 encontrou-se o maior valor médio (7,80 mg Cu kg⁻¹) e entre condicionadores foi em zeólitos (8,06 mg Cu kg⁻¹).

Tabela 12. Concentração de B, Fe, Mn Zn e Cu nas folhas em resposta ao uso doses de fósforo e condicionadores. Separadas por doses de fósforo e condicionadores, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), respetivamente.

Fatores	mg kg ⁻¹									
	B		Fe		Mn		Zn		Cu	
Doses de P (A)										
P0	8,20	c	80,87	a	26,05	a	30,68	a	7,80	a
P50	10,89	b	79,14	a	26,99	a	29,96	a	7,97	a
P100	7,32	c	74,35	a	25,68	a	28,11	a	7,99	a
P200	12,98	a	81,17	a	26,17	a	25,23	a	7,44	a
Condicionadores (B)										
Mineral	10,28	a	68,15	c	26,14	a	29,11	a	7,80	a
Biochar	9,80	a	80,32	b	26,78	a	29,66	a	7,54	a
Zeólitos	9,46	a	88,18	a	25,75	a	26,72	a	8,06	a
Anova										
Fator A (prob)	<,0001		0,1690		0,8966		0,0935		0,5646	
Fator B (prob)	0,3273		<,0001		0,7938		0,2859		0,3830	
Interação AxB (prob)	<,0001		0,0038		<,0001		0,3407		0,0777	

4.2.2 Parâmetros avaliados na planta inteira

A seguir os resultados das análises efetuadas na planta inteira, nomeadamente os resultados das contetrações de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg), micronutrientes (B, Fe, Mn, Zn e Cu) e da produção de matéria seca total.

Na colheita foi também determinada a concentração de nutrientes nos tecidos a partir de uma amostra de toda a parte aérea da planta. Os resultados para os macroelementos estão descritos na tabela 13. No caso do N e P não houve diferença significativa em nenhum dos fatores.

Para K houve diferença entre o fator doses de P, onde P200 (20,43 g K kg⁻¹) e P50 (18,30 g K kg⁻¹) foram estatisticamente diferentes de P100 (14,17 g K kg⁻¹) e P0 (14,01 g K kg⁻¹). No fator condicionadores, o tratamento mineral (18,99 g K kg⁻¹) apresentou diferenças quando comprado com zeólitos (15,65 g K kg⁻¹) e biochar (16,55 g K kg⁻¹) (tabela 13).

Para concentração de Ca ocorreu diferença significativa no fator doses de P, onde P200 (3,63 g Ca kg⁻¹) e P0 (3,62 g Ca kg⁻¹) foram diferentes de P50 (3,29 g Ca kg⁻¹) e P100 (2,92 g Ca kg⁻¹) como demonstra a tabela 13. No fator condicionador, houve diferenças significativas entre os zeólitos (3,64 g Ca kg⁻¹) e biochar (3,39 g Ca kg⁻¹) e entre biochar e o tratamento mineral (3,07 g Ca kg⁻¹).

O Mg apresentou diferenças somente para o fator doses de P como mostra a tabela 13. O nível P100 (6,18 g Mg kg⁻¹) e P0 (5,79 g Mg kg⁻¹) foram diferentes dos demais. Já no fator condicionadores não houve diferença, porém biochar (5,62 g Mg kg⁻¹) apresentou a maior média.

Tabela 13. Concentração de N, P, K, Ca e Mg na planta inteira em resposta ao uso doses de fósforo e condicionadores. Separadas por doses de fósforo e condicionadores, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), respectivamente.

Fatores	g kg ⁻¹									
	N	P	K	Ca	Mg					
Dose de P (A)										
P0	11,90	a	0,99	a	14,01	b	3,62	a	5,79	a
P50	12,68	a	0,97	a	18,30	a	3,29	b	4,86	b
P100	11,42	a	0,97	a	14,17	b	2,92	c	6,18	a
P200	11,84	a	0,97	a	20,43	a	3,63	a	4,71	b
Condicionadores (B)										
Mineral	12,17	a	1,01	a	18,99	a	3,07	c	5,10	a
Biochar	11,82	a	0,93	a	15,55	b	3,39	b	5,62	a
Zeólitos	11,89	a	0,99	a	15,65	b	3,64	a	5,44	a
Anova										
Fator A (prob)	0,4000	0,9946	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Fator B (prob)	0,8414	0,3729	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0579	<,0001	<,0001
Interação AxB (prob)	0,5807	0,8279	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Resultados

A concentração nos tecidos dos micronutrientes avaliados na parte aérea da planta estão apresentados na tabela 14. Os valores de B apresentaram diferenças significativas quando avaliados no fator doses de P, sendo os valores do tratamento P200 (10,37 mg B kg⁻¹) mais elevados que os demais e os do tratamento P100 (7,24 mg B kg⁻¹) os de média mais baixa. Para os condicionadores não foi encontrada diferenças significativas, o tratamento mineral (8,34 mg B kg⁻¹) registou a maior média.

No caso do Fe não houve diferença significativa em nenhum dos fatores estudados. As maiores médias foram obtidas nos tratamentos P50 (101,92 mg Fe kg⁻¹) para o fator doses de P e no tratamento mineral (100,94 mg Fe kg⁻¹) para os condicionadores como demonstra a tabela 14.

A concentração de Mn apresentou diferenças significativas no fator doses de P, onde P0 (49,11 mg Mn kg⁻¹) foi estatisticamente diferente dos demais, sendo a menor média obtida com P50 (42,64 mg Mn kg⁻¹). No fator condicionadores também houve diferença significativa, o biochar (47,70 mg Mn kg⁻¹) apresentou diferenças estatísticas para os zeólitos (44,66 mg Mn kg⁻¹) e para o tratamento mineral (42,85 mg Mn kg⁻¹).

O microelemento Zn no fator doses de P apresentou diferenças significativas, tendo-se em P50 (58,51 mg Zn kg⁻¹) observado a maior média e em P200 (51,66 mg Zn kg⁻¹) a menor. No fator condicionadores, os zeólitos (59,09 mg Zn kg⁻¹) apresentaram diferenças estatísticas para biochar (54,65 mg Zn kg⁻¹) e tratamento mineral (52,07 mg Zn kg⁻¹) (tabela 14).

Tabela 14. Concentração de B, Fe, Mn, Zn e Cu nas folhas em resposta ao uso doses de fósforo e condicionadores. Separadas por doses de fósforo e condicionadores, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), respetivamente.

Fatores	mg kg ⁻¹									
	B		Fe		Mn		Zn		Cu	
Doses de P (A)										
P0	7,60	b	91,10	a	49,11	a	57,28	ab	26,06	a
P50	7,82	b	101,92	a	42,64	b	58,51	a	25,72	a
P100	7,24	b	97,92	a	43,30	ab	53,64	ab	26,70	a
P200	10,37	a	93,66	a	45,24	ab	51,66	b	26,02	a
Condicionadores (B)										
Mineral	8,34	a	100,94	a	42,85	b	52,07	b	25,39	b
Biochar	8,25	a	90,28	a	47,70	a	54,65	ab	27,07	a
Zeólitos	8,18	a	97,23	a	44,66	ab	59,09	a	25,92	ab
Anova										
Fator A (prob)	<,0001		0,1883		0,0298		0,0225		0,3946	
Fator B (prob)	0,9168		0,0705		0,0522		0,0060		0,0079	
Interação AxB (prob)	0,0117		0,0082		0,0003		0,0995		0,4966	

Resultados

Na concentração de Cu não houve diferença para o fator doses de P, porém encontrou-se diferenças no fator condicionadores, onde biochar (27,07 mg Cu kg⁻¹) foi superior aos demais e mineral (25,39 mg Cu kg⁻¹) foi o menor valor entre as médias.

Na figura 11 apresenta-se a produção de matéria seca em resposta aos fatores estudados. Ambos fatores não apresentaram diferenças significativas, porém para o fator condicionador a maior produção foi obtida com o biochar (15,7 t MS ha⁻¹) e a menor com o tratamento mineral (14,0 t MS ha⁻¹). A maior produção no fator doses de P foi obtida no tratamento P200 (16,6 t MS ha⁻¹) e P50 (14,1 t MS ha⁻¹) apresentou a menor.

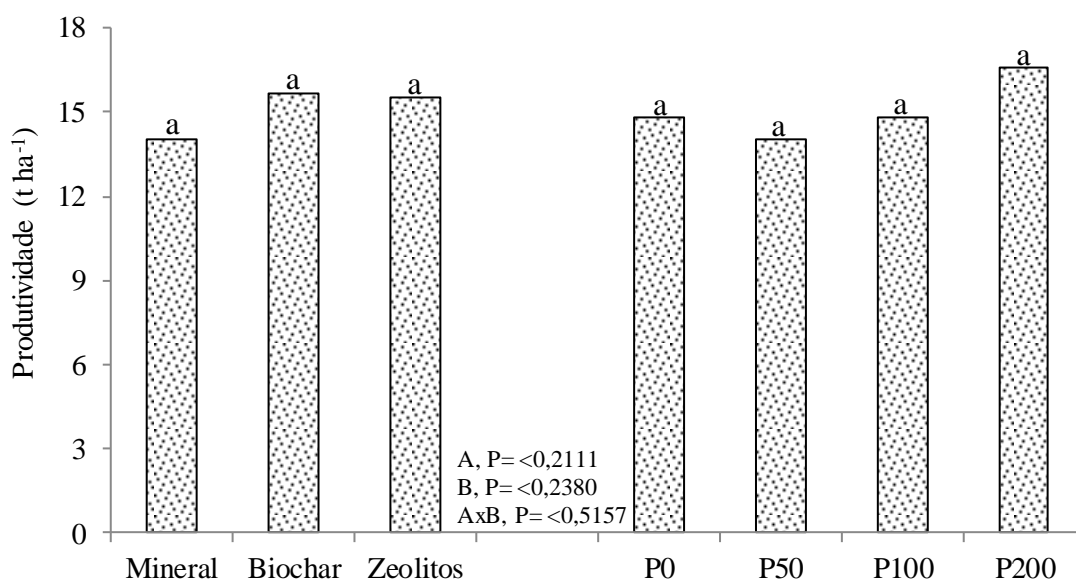


Figura 11. Produtividade do milho em resposta ao uso de condicionadores e doses de fósforo. Separadas por condicionadores e doses de fósforo, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).



5 Discussão

De uma forma geral a aplicação de condicionadores e de fósforo não influenciou de forma significativa as propriedades analisadas no solo na experiência em vasos. Em relação aos resultados da matéria orgânica, onde ocorreu a aplicação de biochar esperava-se maior teor de matéria orgânica pelo contributo do próprio biochar enquanto substrato orgânico, como refere Vandecasteele *et al.* (2016) e Agegnehu *et al.* (2017). Mas, como se referiu, não houve diferenças significativas, talvez pelo fato de as quantidades utilizadas não terem sido suficientes para serem detectadas na sensibilidade do método analítico.

Na capacidade de troca catiônica não foram encontradas diferenças significativas, embora se tenha observado que é influenciada pela adição de biochar ou zeólitos (Nóbrega, 2011). Em Portugal os valores dos parâmetros da capacidade de troca catiônica (CTC) são frequentemente baixos, menores que $10 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ (LQARS, 2006) devido ao caráter maioritariamente ácido dos solos. Na região de Bragança há porém solos em que o substrato rochoso é ultrabásico (Afonso & Arrobas, 2009) e o cálcio e o magnésio encontram-se em quantidades significativas nos locais de troca das partículas do solo. É o caso do solo usado neste trabalho, onde o cálcio contribui com mais de 50% do valor de CTC.

Em relação ao fósforo biodisponível, quando feita a extração pelo método Egner-Riehm ou pelo fracionamento de Hedley, a aplicação de fósforo mineral originou um aumento do fósforo biodisponível. Este aumento de fósforo no solo com a aplicação do nutriente era esperado, tendo em conta que o fertilizante contém na sua composição uma fração de fósforo solúvel em água. No caso dos condicionadores, os zeólitos também aumentaram o fósforo biodisponível, isto pode ser explicado pela capacidade de armazenar nutrientes como nitrogênio, potássio e fósforo, liberando-os lentamente para as plantas e reduzindo as perdas potenciais (Polat *et al.*, 2004; Resende *et al.*, 2008).

A atividade da fosfatase ácida não foi alterada com a aplicação de fósforo, assim como no trabalho de Zhang *et al.* (2014). Porém os zeólitos apresentaram diferença significativa para os demais, talvez pela sua capacidade em adsorver fósforo.

O estado nutricional das plantas na experiência em vasos apresentou algumas diferenças significativas para os macronutrientes N, K, Ca e Mg analisados nas folhas, especialmente quando não houve aplicação de P ao solo. Na experiência em campo também houve diferenças significativas para os macronutrientes K, Ca e Mg nos fatores doses de P e nos condicionadores. As maiores concentrações obtidas nas folhas foram

com o condicionador biochar, possivelmente pelo seu efeito na disponibilidade de nutrientes (Nóbrega, 2011; Silva *et al.*, 2014).

O teor de P nas folhas apresentou diferença significativa na experiência em vasos, quando o fertilizante mineral foi aplicado ao solo em comparação com os tratamentos que não receberam P mineral. Já na experiência em campo não foi encontrada diferenças no teor de P nas folhas quanto às doses de P aplicadas ao solo. Isto pode estar relacionado com as condições em foi realizado o experimento. Como o campo apresenta um maior volume de solo para expansão radicular em relação aos vasos, a disponibilidade natural de fósforo foi suficiente para suprir a necessidade das plantas. No trabalho de Barreto e Fernandes (2002) os teores de P foliar foram influenciados significativamente quando testadas doses de P diferentes aplicadas ao solo.

Na avaliação dos macronutrientes na planta inteira, exceto N e P, não apresentaram diferenças significativas entre tratamentos. Estes resultados contrariam Barreto e Fernandes (2002) e Lemos (2016) que em seus trabalhos verificaram que diferentes doses de P aplicadas ao solo influenciaram significativamente na concentração de P nas plantas.

Nas leituras SPAD e NDVI não foram encontradas diferenças estatísticas nem na experiência de campo nem na experiência em vasos. No caso do SPAD, que mede a intensidade de verde da planta, os dados corroboram com os encontrados por Prado e Vale (2008), onde o fósforo não originou diferenças significativas. Segundo Boucho (2016) quando são encontradas diferenças significativas nestas leituras, elas estão correlacionadas com a coloração que a planta de milho apresenta em condições de deficiência de fósforo.

De forma geral, na experiência em vasos, as plantas de milho apresentaram maior crescimento quando aplicado P ao solo, estando esses resultados de acordo com Barros (2017). A maior diferença registrada na altura das plantas foi com o fator doses de P, onde as plantas que recebem o fertilizante mineral apresentaram um valor médio de 1,15 m de altura. As plantas sem fertilização ficaram com média em torno de 0,92 m de altura aos 83 DAP. A maior concentração de P nas folhas pode estar relacionada com a maior altura, como ocorre nos estudos de Lemos (2016). Os zeólitos se destacaram novamente entre os condicionadores, talvez pela sua capacidade em adsorver fósforo.

Na experiência em campo avaliou-se a produção de matéria seca total. Os fatores condicionadores e doses de P não originaram diferenças significativas. A maior produção se atingiu com a dose P200, porém esta não apresentou diferença estatística da dose P0.

Em outros estudos (Barreto e Fernandes, 2002; Lemos, 2016) diferentes doses de P aplicadas ao solo originaram variação na produtividade. Neste estudo a falta de resposta significativa à aplicação de fósforo é atribuída à elevada disponibilidade de P no solo no talhão experimental.



6 Conclusão

Em relação as características químicas do solo, os efeitos mais relevantes foram observados com a utilização dos zeólitos. O condicionador demonstrou uma atividade superior pela enzima fosfatase ácida e maior biodisponibilidade de fósforo.

Com base na avaliação do estado nutricional das folhas em vasos, a fertilização mineral com fósforo mostrou efeito significativo no desenvolvimento das plantas. Embora não tenha havido efeito na concentração foliar de fósforo nas folhas do campo, possivelmente devido aos teores iniciais de fósforo no solo serem suficientes. A fertilização mineral e a utilização de zeólitos pode ser uma boa opção em solos com baixos teores de fósforo para melhorar o crescimento das plantas.

Em rigor, não houve efeito das doses de P e dos condicionadores na produção de matéria seca total do campo. Acredita-se que o efeito dos condicionadores e as doses de P foram camuflados pelos valores elevados de P no solo no início das experiências, dado que a experiência em vasos demonstrou diferenças significativas para as doses de P e entre os condicionadores.

À partida, parece que a técnica de liberação de fósforo pelos condicionadores é mais relevante do que a própria quantidade do mineral nos condicionadores. Os ensaios devem ser mantidos para avaliar o efeito a longo prazo dos condicionadores e devem ser realizados novos ensaios com tratamentos que permitam avaliar de melhor forma a influência dos condicionadores na liberação dos nutrientes



7 Referências

- ALEF, K.; NANNIPIERI, P.; TRAZER-CEPEDA, C. Phosphatase activity. In: Alef, K & Nannipieri, P (Eds). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, Inc. San Diego, USA. 1995
- ALMEIDA, L. A. V., BALBINO, L. R. Determinação do fósforo e potássio assimiláveis em alguns solos do país. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*. Lisboa, 1960.
- AMIN, A.EE.A.Z. Phosphorus dynamics and corn growth under applications of corn stalks biochar in a clay soil. *Arabian Journal of Geosciences*. V. 379, p11, 2018.
- ARROBAS, M., AFONSO, S., RODRIGUES, M. A., Diagnosing the nutritional condition of chestnut groves by soil and leaf analyses. *Scientia Horticulturae* . p113–121.2018.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE MILHO E SORGO (Anpromis). *Evolução das áreas de Milho*. Portugal, 2018.
- BARRETO, A. C.; FERNANDES, M. F. Produtividade e absorção de fósforo por plantas de milho em função de doses e modos de aplicação de abubo fosfatado em solo de tabuleiro costeiro. *R. Brasileira Ciência do solo*, v. 26, p.151-156, 2002.
- BARROS, I.B.; SILVA, T. V.; VELOSO, C. A. C.; SILVA, A. R.; CARVALHO, E. J. M.; REIS, I. M. S. Altura de plantas de milho adubadas com diferentes fontes e doses de fósforo. XXXVI Congresso brasileiro de ciência do solo. *Amazônia e seus solos: Peculiaridades e potencialidades*. Belém, PA. 2017.
- BARROS, J. F. C., CALADO, J. G. A cultura do milho. Universidade de Évora, Departamento de fitotecnia, 2014.
- BERNARDI, A. C. D. C. Potencial do uso de zeólitas na agropecuária. *Embrapa Pecuária Sudeste*, p. 46, 2008.
- BIZARRO, V. G.; MEURER, E. J.; TATSCH, F. R. P. Teor de cádmio em fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil. *Ciência Rural*, v. 38, n. 1, p. 247–250, 2008.
- BOUCHO, A. C. M. *Contributo do fósforo para a eficiência simbiótica de leguminosas pratenses*. Dissertação de mestrado. Univerisdade de Lisboa. 2016.
- BROCH, D. L.; RANNO, S. K. Fertilidade do Solo, Adubação e Nutrição da Cultura do Milho “safrinha”. *Tecnologia e Produção: Milho safrinha e culturas de inverno*, p. 05-29, 2009.
- BROCH, D. L.; RANNO, S. K. Fertilidade do Solo, Adubação e Nutrição da Cultura do Milho. *Tecnologia e Produção: Soja e Milho 2011/2012*, p. 240-252, 2012.
- BRYSON, G.M.; MILLS, H.A.; SASSEVILLE, D.N.; JONES JR, J.B.; BARKER, A.V. 2014. *Plant Analysis Handbook III. A guide to sampling, preparation, analysis and interpretation for agronomic and horticultural crops*. Micro-Macro publishing, Inc. USA.
- BRYSON, G.M.; MILLS, H.A.; SASSEVILLE, D.N.; JONES Jr, J.B; BARKER, A.V. *Plant Analysis Handbook III. A guide to sampling, preparation, analysis and*

- interpretation for agronomic and horticultural crops. Micro-Macro publishing, Inc. USA, 2014.
- CAPOANE, V. et al. Transferência de nitrogênio e fósforo para águas superficiais em uma bacia hidrográfica com agricultura e produção pecuária intensiva no Sul do Brasil. *Ciência Rural*, v. 45, n. 4, p. 647–650, 2015.
- CODLING, E. E.; MULCHI, C. L.; CHANEY, R. L. Grain Yield and Mineral Element Composition of Maize Grown on High Phosphorus Soils Amended with Water Treatment Residual. *Journal of Plant Nutrition*. v.30, p. 225-240, 2007.
- COELHO, A. M. Nutrição e adubação do milho. Circular Técnica 78, p. 10, 2006.
- COELHO, A. M., FRANÇA, G. E. Nutrição e adubação do milho. Embrapa Milho e Sorgo, p. 1-35, 2016.
- CORDELL, D.; NESET, T. S. S. Phosphorus vulnerability: A qualitative framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multi-dimensional stressors of phosphorus scarcity. *Global Environmental Change*, v. 24, n. 1, p. 108–122, 2014.
- COSTA, V. L. Da. Formas de fósforo e seu transporte pela enxurrada num Latossolo que recebeu lodo de esgoto. 94 fls. Dissertação de mestrado, 2008.
- CRUZ, J.C., FILHO, I. A. P., ALVARENGA, R. C., NETO, M. M., VIANA, J. H. Cultivo do Milho. Embrapa Milho e Sorgo. Sistemas de produção 2. set, 2010.
- ELLISON, M. E.; BRETT, M. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover. *ScienceDirect*. v. 40, p. 1258-1268., mar, 2006.
- EPSTEIN, E. BLOOM, A. J. Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas. ed 2. Editora Planta, 2006.
- FARRELL, M. et al. Biochar and fertiliser applications influence phosphorus fractionation and wheat yield. *Biology and Fertility of Soils*, v. 50, n. 1, p. 169–178, 2014.
- FARRELL, M.; RANGOTT, G.; KRULL, E. Difficulties in using soil-based methods to assess plant availability of potentially toxic elements in biochars and their feedstocks. *Journal of Hazardous Materials*, v. 250–251, p. 29–36, 2013.
- FERNANDES, R. Fertilização orgânica – algumas considerações. *Fertilização orgânica – algumas considerações*, p. 30–31, set. 2017.
- FERNANDES, R. A matéria orgânica do solo. Dossier técnico. *Vida rural*, maio 2016.
- FERREIRA, M. M. M. Sintomas de deficiência de macro e micronutrientes de plantas de milho híbrido BRS 1010. *Boa Vista, PR*. v. 6, n. 1, p. 74-83, Jan-abril, 2012.
- FREITAS, L. S., CARVALHO, E. J. M., PEDRO, A. J. S., GOUVEIA, A. L. S., SOUZA, A. S. Dinâmica da matéria orgânica sob sistemas de manejo no solo no município de paragominas-pa. IV Encontro Amazônico de Agrárias, UFRA. Mar, 2012.

- FUNGARO, D. A.; FLUES, M. S. M.; CELEBRONI, A. P. Estabilização de solo contaminado com zinco usando zeolitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão. *Química Nova*, v. 27, n. 4, p. 582–585, 2004.
- GATIBONI, L. C. *Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas*. 2003. 247. Tese de doutorado – UFSM, Santa Maria, 2003.
- GLOSSARY OF SOIL SCIENCE TERMS. GSST. Madison, Wisconsin, USA. 2008
- GUL, A.; ERŐUL, D.; ONGUN, A. R. Comparison of the use of zeolite and perlite as substrate for crisp-head lettuce. *Scientia Horticulturae*, v. 106, n. 4, p. 464–471, 2005.
- HAVLIN, J. et al. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 7ª Edição. Pearson Educational, Inc., Upper Saddle River, New Jersey. 2005.
- HAVLIN, J. TISDALE, S. L. NELSON, W. N. *Soil Fertility and Fertilizers*. 8ª Edição. Pearson Educational, Inc., Upper Saddle River, New Jersey 2014.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B. & CHAUHAN, B.S. 1982. Changes in organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am.J.*, 46:970-976.
- HORTA, M. C.; TORRENT, J. *Dinâmica do Fósforo no Solo Perspectiva Agronômica e Ambiental*. Castelo Branco. Editora IPCB. Março, 2010.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICAS. *Estatísticas Agrícolas 2017*. Lisboa
- JONES, A. S.; HORSBURGH, J.S.; MESNER, N. O.; RYEL, R.J. STEVENS, D. K. Influence of Sampling Frequency on Estimation of Annual Total Phosphorus and Total Suspended Solids Loads. *Journal of the american water resources association*. v. 48, p 1258-1275, Dez, 2012.
- KASSOMA, J.; RODRIGUEES, M.; BENTO, A; ARROBAS, M. Valores Clorofila-SPAD em morangueiro cultivado em estufa. In *Encontro Anual da Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo*. Castelo Branco, 2005.
- KERR, J. G. et al. Examining the link between terrestrial and aquatic phosphorus speciation in a subtropical catchment: The role of selective erosion and transport of fine sediments during storm events. *Water Research*, v. 45, n. 11, p. 3331–3340, 2011.
- KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. Fósforo: De Nutriente À Poluente! *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 8, n. 8, p. 1713–1721, 2013.
- LABORATÓRIO QUÍMICO DE INVESTIGAÇÃO AGRÁRIA E VETERINÁRIA (LQARS). *Manual de fertilização das culturas*. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e Pescas. Instituto Nacional de Investigação Agrária e das Pescas, Lisboa, Portugal, 2006.

- LEMOS, E. F. *Doses e modos de aplicação de fósforo no estado nutricional e produtividade da cultura do milho*. 2016, 43. Tese de doutorado – UNESP, Jaboticabal, 2016.
- MAGALHÃES, P.C., DURÃES, F. O. M., CARNEIRO, N. P., PAIVA, E. Fisiologia do Milho. Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica 22. Dez, 2002.
- MALAVOLTA, E., VITTI, G. C., OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas, princípios e aplicações. 2ed. Potafos, 1997.
- MARSCHNER, P. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3ed. Academic print. 2012.
- MARTINS, A. O. *Inferências genético-fisiológicas da tolerância à seca do milho*. 2012. 140 fls. Tese de doutorado. UENF, Darcy Ribeiro, RJ.
- MCLAUGHLIN, M. J.; SINGH, B. R. Cadmium in Soils and Plants. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods- SSSA. Book series 5, 2006.
- NIGUSSIE, A., KISSI, E., MISGANAW. M., AMBAW, G. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. *Am.-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 12. 369-376. 2012.
- NOBREGA, I. P. C. *Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: Sequestro de carbono no solo*. 2011, 46 fls. Tese de Mestrado, UTL, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- NOVAIS, R.F. SMITH, T.J. Fósforo em Solo e Planta em Condições Tropicais. Viçosa: UFV-DPS, 62-64. 1999.
- NOVAK, J. M., BUSSCHER, W. J., LAIRD, D. L., AHMEDNA, M. WATTS, D., NIANDOU, M. A. S. Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil. *Soil Science*. V174. p 105-112. February 2009.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (FAO). *Milho*, Roma, 2018.
- PANTANO, G. et al. Sustainability in phosphorus use: A question of water and food security. *Quimica Nova*, v. 39, n. 6, p. 732–740, 2016.
- PERES, L. Absorção e transporte de íons. *Nutrição Mineral de Plantas*. 2004 Disponível em: <http://orion.cpa.unicamp.br/sbfv/arquivos/aulas/grad01/05__nutricao_mineral/nutricao_mineral.pdf>. Acesso em 10 de dezembro de 2018.
- PICKERING, H. W.; MENZIES, N. W.; HUNTER, M. N. Zeolite/rock phosphate - A novel slow release phosphorus fertiliser for potted plant production. *Scientia Horticulturae*, v. 94, n. 3–4, p. 333–343, 2002.

- PIERZYNSKI, G.M.; SIMS, J. T.; VANCE, G. F. Soils and environmental quality. CRC Press, Boca Raton, 2000.
- PLUMSTEAD, P. W.; ROMERO-SANCHEZ, H.; MAGUIRE, O. R.; GERNAT, A. G.; BRAKE, J. Effects of Phosphorus Level and Phytase in Broiler Breeder Rearing and Laying Diets on Live Performance and Phosphorus Excretion. *Poultry Science*, v. 86, p. 225-231, Fev, 2007.
- POLAT, E. MEHMET K, O. N. A. Use of natural zeolite (clinoptilolite) in agriculture. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, v. 12, n. November 2014, p. 183–187, 2004.
- PRADO, R.; VALE, D. NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO NA LEITURA SPAD EM PORTA-ENXERTO DE LIMOEIRO CRAVO. *Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)*, v. 38, n. 4, p. 227-232, 4 nov. 2008.
- REDDY, D. D.; RAO, A. S.; RUPA, T. R. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic phosphorus in a Vertisol. *Bioresource Technology*. v. 75, p. 113-118. Nov, 2000.
- RESENDE, N. DAS G. DE A. DA M.; MONTE, M. B. DE M.; PAIVA, P. R. P. DE. *Zeolitas Naturais. Rochas e Minerais Industriais – CETEM/2008, 2a Edição*, 2008.
- ROSSI, C. Q., *Matéria orgânica do solo e fósforo orgânico em cronossequência de cana-de-açúcar cultivada no cerrado*. 2013. 100 fls. Tese de doutorado, UFRJ, Seropédica, 2013.
- RYAN, J. et al. Significance of phosphorus for agriculture and the environment in the West Asia and North Africa region. 1. ed. Elsevier Inc., 2012. v. 114
- SEMPITERNO, C. FERNANDES, R. PEIXOTO, L. Valorização agrícola de lamas de ETAR – disponibilidade de azoto. Agricultural valorization of sewage sludge – nitrogen availability. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 40, n. 3, p. 506–514, 2017.
- SHARPLEY, A. N.; KLEINMAN, P. J. A.; MCDOWELL, R. W. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management [electronic resource]. *Plant and Soil*, v. 237, n. 2, p. 287–307, 2001.
- SIERRA, C. A.; MULLER, M, M.; TRUMBORE, S. E. Models of soil organic matter decomposition: the SOILR package, version 1.0. *Geoscientific Model Development*, 5, 1045-1060, 2012.
- SILVA, G. G. C.; MEDEIROS, P. L.; SANTOS, A. Y. O.; OLIVEIRA, E. M. M.; PIMENTA, A. S. Uso do biochar para fins agrícolas: principais vantagens. II Congresso internacional da diversidade do semiárido, 2014.
- SILVA, L. C DA. *Níveis e fontes de fósforo adicionados a um biossólido tratado pelo processo n-viro aplicado em solos ácidos do Paraná*. 2007. 226 fls. Tese de Doutorado. UFPR, Curitiba, 2007.
- SOLOGUREN, L. Importância Milho. *Visão Agrícola*. USP ESALQ. Piracicaba. v. 13. p. 8-12. Dez, 2015.

- STEVENSON, E. J. COLE, M. A. Cycles of Soils Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. John Wiley & Sons. ISBN 0471320714. n427, 1999.
- TAIZ, L., ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal. 4ed. Artmed, 2006.
- TIESSEN, H. et al. Pathways of Phosphorus Transformations in Soils of Differing Pedogenesis. Soil Science Society of America Journal – SSSAJ. v. 48. 1984.
- TURRIÓN, M. B. et al. Effects of deforestation on phosphorus pools in mountain soils of the Alay Range, Khyrgyzia. Biology and Fertility of Soils, v. 31, n. 2, p. 134–142, 2000.
- TURRIÓN, M.B.; GLASER, B.; SOLOMON, D.; NI, A.; ZECH, W. Effects of deforestation on phosphorus pools in mountain soils of the Alay Range, Khyrgyzia. Biology and Fertility of Soils. v.31, p. 134-142, 2000.
- UDRY, C. V.; DUARTE, W. Uma história brasileira do milho o valor dos recursos genéticos. Paralelo 15, p. 136p., 2000.
- VAN REEUWIJK. Procedures for soil analysis. Sixth edition. ISRIC. FAO. 2002.
- WALINGA, I.; VAN VARK, W.; HOUBA, V. J. G; VAN DER LEE, J. J; Soil and Planta analysis. Part 7 Planta analysis. Department of soil science and plant nutrition. 1989.
- WERNER, W. Phosphuros. In Ulmanns's Agrochemicals. v. 1. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ,2007.
- WOOLF, D., AMONETTE, E., STREET-PERROTT, F. A., LEHMANN, J., JOSEPH, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nature communications.pg 1-9, Aug, 2010.
- ZHANG, G.; CHEN, Z.; ZHANG, A.; CHEN, L.; WU, Z.; MA, X. Phosphorus Composition and Phosphatase Activities in Soils Affected by Long- Term Application of Pig Manure and Inorganic Fertilizers. Soil Science and Plant Analysis, v. 45:14, p. 1866-1876, 2014.