

# **EFICIÊNCIA DA AVEIA NA RECUPERAÇÃO DE NITROGÊNIO RESIDUAL APLICADO NA CULTURA DO MILHO**

**Leticia Damo**

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Agroecologia no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientação

**Dr. Manuel Ângelo Rosa Rodrigues - IPB**

Coorientação

**Dra. Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues - IPB**

**Dr. Luis Cesar Cassol - UTFPR**

**Bragança**

**2019**

LETICIA DAMO

EFICIÊNCIA DA AVEIA NA RECUPERAÇÃO DE NITROGÊNIO RESIDUAL  
APLICADO NA CULTURA DO MILHO

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.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Ângelo Rosa Rodrigues.

Coorientadores: Prof<sup>a</sup>. Dra. Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues.

Prof Dr. Luis Cesar Cassol.

BRAGANÇA

2019

*À minha família, em especial Leones e Idali Damo, meus pais.*

*Em memória de Lourdes Damo Rossetto e Mafalda Morelato...*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela oportunidade desse mestrado, por sempre iluminar meu caminho e me dar forças para enfrentar as dificuldades e concluir esta etapa.

Aos meus pais, Leones e Idali, pela educação que me concederam, pela compreensão, apoio e esforço que fizeram para que eu chegasse até o meu objetivo, e também aos meus irmãos e ao meu amado sobrinho Joaquim por todo incentivo e apoio. E a todos os familiares e amigos queridos que sempre mandaram mensagens de apoio e boas energias.

Agradeço em especial a minha amiga Francieli, que está sempre ao meu lado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Manuel Ângelo Rodrigues e coorientadores Prof. Dra. Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues e Prof. Dr. Luís César Cassol, pelos conselhos, orientação, disponibilidade e o conhecimento transmitido durante a realização dessa dissertação.

Ao Instituto Politécnico de Bragança e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela oportunidade de participar do programa de dupla diplomação e poder realizar esta dissertação.

Ao Laboratório de Solos do IPB, pelo suporte durante as análises. As auxiliares do laboratório, Rita, Ana e Soraya por todo auxílio prestado durante as análises.

Aos meus amigos e colegas que me ajudaram na realização deste trabalho e também estiverem presentes nos momentos de descontração.

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

Muito obrigada!

## RESUMO

O trabalho experimental foi realizado na Quinta do Poulão, em Bragança, NE Portugal, no decorrer dos anos 2018 e 2019, com o objetivo de verificar a influência da adubação nitrogenada da cultura do milho na aveia, cultivada em sequência, e avaliar a capacidade da aveia na captura de nitrogênio (N) do solo, a fim de reduzir as perdas de nitratos para os cursos de água e óxidos de N para a atmosfera. A aveia, em si, não foi fertilizada. O ensaio com a aveia foi conduzido em dois delineamentos experimentais independentes. Um dos experimentos foi conduzido em delineamento experimental completamente casualizado, constituído por um fertilizante nitrogenado convencional, nitrato de amônio (27% N), usado em três doses, repartidas em aplicações de fundo e cobertura, 50 (25+25), 100 (50+50) e 200 (100+100) kg N ha<sup>-1</sup>, um fertilizante composto NPK de liberação controlada (12-10-18) e um fertilizante estabilizado com um inibidor da nitrificação (26% N), ambos usados nas doses de 100 e 200 kg N ha<sup>-1</sup>, um corretivo orgânico (estrupe de vaca) usado em uma dose correspondente à aplicação de 100 kg N ha<sup>-1</sup>, com (100 kg N ha<sup>-1</sup>) e sem aplicação de N em cobertura e uma testemunha não fertilizada. O segundo experimento foi organizado em um fatorial completo usando condicionadores de solo, biochar, correspondente à aplicação de 10 t ha<sup>-1</sup>, e zeólitos, utilizado a uma taxa de 5 t ha<sup>-1</sup>, e o fator doses de N, que incluiu quatro doses do fertilizante mineral convencional (27% N) aplicadas metade em fundo e metade em cobertura na forma 0 (0 + 0), 50 (25 + 25), 100 (50 + 50) e 200 (100 + 100) kg N ha<sup>-1</sup>. Os resultados encontrados no primeiro experimento mostram que as maiores doses de N (200 kg ha<sup>-1</sup>) aplicadas à cultura do milho correspondem ao maior teor de N mineral residual no solo após a colheita, o que se refletiu nos indicadores de estado nutricional da aveia, SPAD e NDVI. E também, na produtividade da aveia, que foi mais elevada em N200 e Org100. À medida que houve incremento na produção de massa seca aumentou também a quantidade de N recuperado pela aveia. Devido ao cultivo da aveia ocorreu redução de até 87% do teor de N mineral residual no solo. No segundo experimento observou-se que os condicionadores aplicados antes da sementeira do milho influenciaram o teor de N mineral no solo em outubro após a colheita, sendo o fertilizante mineral o que apresentou menor teor de N mineral residual. No entanto, à medida que houve aumento nas doses de N aplicadas ocorreu também aumento do teor de N residual no solo. Com relação ao indicador de estado nutricional SPAD, os condicionadores não apresentaram efeito significativo. Já para o NDVI, o condicionador biochar mostrou os menores valores. Os condicionadores aplicados antes da semeadura do milho não apresentaram efeito significativo na produtividade e na quantidade de N recuperado pela aveia, sendo o biochar o que apresentou os menores valores e o fertilizante mineral os maiores. No entanto, é possível observar que com o aumento das doses de N houve aumento de N recuperado pela cultura, sem diferença significativa para a concentração de N no tecido. Da mesma maneira, pode se atribuir à aveia uma elevada capacidade em recuperar o N disponível no solo e eficiência na sua utilização para produção de biomassa, e aos condicionadores a capacidade de retenção do N e disponibilização para as culturas, uma vez ocorreu redução média de 82% do teor de N mineral residual no solo após a cultura da aveia. O aveia foi eficiente como cultura de captura de N residual do solo.

**Palavras chave:** *Avena sativa*; cultura de captura; fertilizantes de liberação controlada; fertilizantes estabilizados; corretivos orgânicos; condicionadores de solo.

## ABSTRACT

The experimental work was carried out in Quinta do Poulão, Bragança, NE Portugal, during the years 2018 and 2019, in order to assess the influence of the nitrogen (N) fertilization of the maize crop in the oat cultivated in sequence, and to evaluate the performance of oat in recovering residual N, avoiding the leaching of nitrates to the watercourses and the emission of N oxides to the atmosphere. Oat itself was not fertilized. The study was conducted in two independent experimental designs. One of the experiments was conducted in a completely randomized design, consisting of a conventional N fertilizer, ammonium nitrate (27% N), used in three rates, distributed as basal and topdressing applications 50 (25 + 25), 100 (50 + 50) and 200 (100 + 100) kg N ha<sup>-1</sup>, a controlled release NPK compound fertilizer (12-10-18) and a fertilizer stabilized with a nitrification inhibitor (26% N), both used in rates of 100 and 200 kg N ha<sup>-1</sup>, an organic manure (cow manure) used at a rate corresponding to the application of 100 kg N ha<sup>-1</sup>, with (100 kg N ha<sup>-1</sup>) or without N application as topdressing and an unfertilized control. The second experiment was organized in a complete factorial using soil conditioners, biochar, corresponding to the application of 10 t ha<sup>-1</sup>, and zeolites, used at a rate of 5 t ha<sup>-1</sup>, and the factor rate of N, which included 0 (0 + 0), 50 (25 + 25), 100 (50 + 50) and 200 (100 + 100) kg N ha<sup>-1</sup> to be applied as basal and topdressing applications as ammonium nitrate (27% N). The results of the first experiment showed that the highest N rates (200 kg ha<sup>-1</sup>) applied to maize were related to the higher mineral N content in the soil after maize harvest. The result influenced the N nutritional status indices, SPAD and NDVI, of oat. Consequently, oat productivity was higher in N200 and Org100N in comparison to the less fertilized treatments. Since an increase in dry matter production occurred, the amount of N recovered by oats also increased. Due to the cultivation of oat, there was a reduction of up to 87% in the content of soil mineral N. In the second experiment, it was observed that the soil conditioners applied before maize sowing influenced the mineral N content in the soil in October after harvesting, and the mineral fertilizer treatments had the lowest results. However, as the rates of N increased, an increase in the residual N content also occurred. SPAD readings did not significantly vary among the soil conditioners. The NDVI values, however, were significantly lower in the plots that received the biochar. The conditioners applied to maize did not have a significant effect on the productivity and amount of N recovered by oats, with biochar presenting the lowest average values and the mineral fertilizer the highest. However, it was observed that with increasing rates of N there was an increase of N recovered by the catch crop, even though no significant difference were found on the concentration of N in the plant tissues. Oat showed high ability to recover residual N available in the soil using it efficiently in biomass production. Soil conditioners showed ability to immobilize temporarily N and releasing it to the crop, since there was a mean reduction of 82% of the mineral N content in the soil after oat cultivation. Oat seemed to be an efficient N catch crop.

**Keywords:** *Avena sativa*; catch crop; controlled release fertilizers. stabilized fertilizers. organic correctives. soil conditioners.

## LISTA DE ABREVIÇÕES

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Ag                             | Prata  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido de alumínio                            |
| B                              | Boro   |
| C                              | Carbono                                      |
| Ca                             | Cálcio                                       |
| CaO                            | Óxido de cálcio                              |
| Cd                             | Cádmio                                       |
| cm                             | Centímetro                                   |
| CO <sub>2</sub>                | Dióxido de carbono                           |
| CTC                            | Capacidade de troca de cátions               |
| Cu                             | Cobre  |
| EAN                            | Eficiência de uso do nitrogênio              |
| EUN                            | Eficiência na absorção de nitrogênio         |
| EUtN                           | Eficiência na utilização de nitrogênio       |
| FBN                            | Fixação Biológica de Nitrogênio              |
| Fe                             | Ferro  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Hematita                                     |
| FeO                            | Óxido de ferro                               |
| g                              | Gramas                                       |
| g/cm <sup>3</sup>              | Gramas por centímetro cúbico                 |
| g kg <sup>-1</sup>             | Gramas por quilograma                        |
| H <sub>2</sub>                 | Hidrogênio                                   |
| H <sub>2</sub> O               | Água   |
| Hg                             | Mercúrio                                     |
| HNO <sub>3</sub>               | ácido nítrico                                |
| K                              | Potássio                                     |
| K <sub>2</sub> O               | Óxido de potássio                            |
| KCl                            | Cloreto de potássio                          |
| kg/cm <sup>3</sup>             | Quilograma por centímetro cúbico             |
| kg ha <sup>-1</sup>            | Quilograma por hectare                       |
| kg ha <sup>-1</sup>            | Quilograma de nitrogênio por hectare         |
| m                              | Metro  |
| M                              | Molar  |
| m <sup>2</sup>                 | Metro quadrado                               |
| Mg                             | Magnésio                                     |
| MgO                            | Óxido de magnésio                            |
| mg kg <sup>-1</sup>            | Miligrama por quilograma                     |
| mL                             | Mililitro                                    |
| Mn                             | Manganês                                     |
| N                              | Nitrogênio                                   |
| N <sub>2</sub>                 | Gás dinitrogênio                             |
| N <sub>2</sub> O               | Óxido nitroso                                |
| Na <sub>2</sub> O              | Óxido de sódio                               |
| NADH                           | nicotinamida adenina dinucleotídeo reduzido  |
| NAR                            | Nitrogênio aparentemente recuperado          |
| NDVI                           | Índice de vegetação de diferença normalizada |
| NH <sub>3</sub>                | Amônia                                       |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | Amônio                                       |

|                               |                                 |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Ni                            | Níquel                          |
| nm                            | Nanômetro                       |
| NO                            | Monóxido de nitrogênio          |
| NO <sub>2</sub>               | Dióxido de nitrogênio           |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | Nitrito                         |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | Nitrato                         |
| NO <sub>x</sub>               | Óxidos de nitrogênio            |
| O <sub>2</sub>                | Oxigênio                        |
| OH <sup>-</sup>               | Hidroxila                       |
| P                             | Fósforo                         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Pentóxido de difósforo          |
| S                             | Enxofre                         |
| SiO <sub>2</sub>              | Dióxido de silício              |
| SO <sub>2</sub>               | Anidrido sulfuroso              |
| SPAD                          | Soil plant analysis development |
| TiO <sub>2</sub>              | Dióxido de titânio              |
| μS                            | Microsiemens                    |
| UV/VIS                        | Ultravioleta visível            |
| Zn                            | Zinco                           |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1-</b> Imagem do local de implantação do experimento (GOOGLE, 2019).....  | 41 |
| <b>Figura 2-</b> Precipitação e temperatura média do ar mensais da cidade de Bragança entre junho de 2018 e maio de 2019 (ESA - IPB, 2019). .....   | 42 |
| <b>Figura 3 -</b> Valores da leitura SPAD nas folhas da aveia no estágio de primeiro nó detectável (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....             | 52 |
| <b>Figura 4 -</b> Valores do índice de vegetação NDVI nas folhas da aveia no estágio de primeiro nó detectável (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ..... | 53 |
| <b>Figura 5 -</b> Produtividade da aveia em matéria seca (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....   | 54 |
| <b>Figura 6 -</b> Teor de N recuperado na matéria seca (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....   | 54 |
| <b>Figura 7 -</b> Teor de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> no solo na cultura da aveia em maio de 2019 (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....             | 57 |
| <b>Figura 8 -</b> Teor de N mineral no solo na cultura da aveia em maio de 2019 (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....                                | 58 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 9</b> - Teor de $\text{NO}_3^-$ residual no solo na cultura do milho em outubro de 2018 (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ..... | 60 |
| <b>Figura 10</b> - Teor de N mineral residual no solo na cultura do milho outubro de 2018 (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....         | 60 |
| <b>Figura 11</b> - Valores da leitura SPAD nas folhas da aveia no estágio de primeiro nó detectável (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....                            | 61 |
| <b>Figura 12</b> - Valores do índice de vegetação NDVI nas folhas da aveia no estágio de primeiro nó detectável (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....                | 62 |
| <b>Figura 13</b> - Produtividade da aveia em matéria seca (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....  | 63 |
| <b>Figura 14</b> - Teor de N recuperado na matéria seca (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....  | 64 |
| <b>Figura 15</b> - Teor de $\text{NO}_3^-$ no solo na cultura da aveia em maio de 2019 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....   | 68 |
| <b>Figura 16</b> - Teor de N mineral no solo na cultura da aveia em maio de 2019 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras minúsculas distintas   |    |

sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ )..... 69

**Figura 17** - Teor de  $\text{NO}_3^-$  no solo após a colheita do milho em outubro de 2018 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200  $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ )..... 70

**Figura 18** - Teor de N mineral no solo após a colheita do milho em outubro de 2019 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200  $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ..... 71

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> - Descrição dos tratamentos com os fertilizantes utilizados.....  | 44 |
| <b>Tabela 2</b> - Composição química do corretivo orgânico.....   | 44 |
| <b>Tabela 3</b> - Descrição dos tratamentos realizados no ensaio 2. ....  | 46 |
| <b>Tabela 4</b> - Principais características dos condicionadores de solo utilizados neste estudo. ....  | 46 |
| <b>Tabela 5</b> - Concentração de macronutrientes na matéria seca das plantas de aveia (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ....  | 55 |
| <b>Tabela 6</b> - Concentração de micronutrientes na matéria seca das plantas de aveia (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ....  | 56 |
| <b>Tabela 7</b> - Concentração de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> no solo na colheita da aveia (maio de 2019) obtido por extração com KCl a frio e a quente e de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> hidrolisável, obtido por subtração da determinação a quente e a frio (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ....       | 57 |
| <b>Tabela 8</b> - Concentração de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> no solo coletado em outubro de 2018, na sementeira da aveia, em extração com KCl a frio e a quente, e NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> hidrolisável obtido por diferença do procedimento a quente e a frio (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .... | 59 |
| <b>Tabela 9</b> - Concentração de macronutrientes na matéria seca das plantas de aveia (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras maiúsculas distintas a seguir às médias indicam diferença significativa entre condicionadores e letras minúsculas indicam diferença significativa entre doses dentro de cada condicionador pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ....  | 65 |

**Tabela 10** - Concentração de micronutrientes na matéria seca das plantas de aveia (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras maiúsculas distintas a seguir às médias indicam diferença significativa entre condicionadores e letras minúsculas indicam diferença significativa entre doses de N dentro de cada condicionador pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ )..... 66

**Tabela 11** - Concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo obtido por extração com KCl a frio e a quente e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> hidrolisável, obtido por subtração da determinação a quente e a frio após a colheita da aveia em maio de 2019 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras maiúsculas distintas a seguir às médias indicam diferença significativa entre condicionadores e letras minúsculas indicam diferença significativa entre doses de N dentro dos condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ..... 67

**Tabela 12** - Concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo obtido por extração com KCl a frio e a quente e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> hidrolisável, obtido por subtração da determinação a quente e a frio, após a colheita do milho em outubro de 2018 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras maiúsculas distintas a seguir às médias indicam diferença significativa entre condicionadores e letras maiúsculas indicam diferença significativa entre doses de N dentro dos condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ )..... 70

## SUMÁRIO

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1.      | INTRODUÇÃO .....   | 16 |
| 2.      | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....  | 17 |
| 2.1     | NITROGÊNIO NOS ECOSISTEMAS .....   | 17 |
| 2.1.1   | NITROGÊNIO NAS PLANTAS .....   | 18 |
| 2.1.2   | NITROGÊNIO NO SOLO .....   | 21 |
| 2.1.3   | DINÂMICA DO NITROGÊNIO NO SOLO .....   | 21 |
| 2.1.3.1 | Imobilização e mineralização do nitrogênio .....                             | 22 |
| 2.1.3.2 | Nitrificação .....   | 23 |
| 2.1.3.3 | Desnitrificação e quimiodesnitrificação .....                                | 23 |
| 2.1.3.4 | Volatilização de amônia .....  | 24 |
| 2.1.3.5 | Lixiviação .....   | 25 |
| 2.1.3.6 | Erosão .....   | 26 |
| 2.1.3.7 | Adsorção do íon amônio .....   | 26 |
| 2.1.3.8 | Fixação biológica de nitrogênio .....  | 27 |
| 2.2     | EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DO NITROGÊNIO .....                                 | 28 |
| 2.3     | FERTILIZAÇÃO NITROGENADA .....   | 30 |
| 2.3.1   | FERTILIZANTES ORGÂNICOS .....  | 32 |
| 2.3.2   | FERTILIZANTES MINERAIS .....   | 32 |
| 2.3.3   | FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO GRADUAL .....                                     | 34 |
| 2.3.4   | FERTILIZANTES COM INIBIDORES DA UREASE E INIBIDORES DA<br>NITRIFICAÇÃO ..... | 35 |
| 2.3.5   | USO DE CONDICIONADORES DE SOLO .....   | 36 |
| 2.3.5.1 | Biochar .....  | 37 |
| 2.3.5.2 | Zeólitos .....   | 38 |
| 2.4     | CULTURAS DE CAPTURA .....  | 39 |
| 3.      | MATERIAIS E MÉTODOS .....  | 41 |
| 3.1     | DELINEAMENTOS EXPERIMENTAIS E FERTILIZANTES UTILIZADOS .....                 | 43 |
| 3.1.1   | FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO GRADUAL .....                                     | 43 |
| 3.1.2   | CONDICIONADORES DE SOLO .....  | 45 |
| 3.2     | DETERMINAÇÕES EM CAMPO .....   | 47 |
| 3.2.1   | VALORES DE CLOROFILA-SPAD .....  | 47 |
| 3.2.2   | ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI .....   | 47 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.2.3   | AMOSTRAGEM DE SOLO .....  | 48 |
| 3.2.4   | AMOSTRAGEM DE PLANTAS.....  | 48 |
| 3.3     | ANÁLISES LABORATORIAIS .....  | 48 |
| 3.3.1   | ANÁLISES DE SOLO .....  | 48 |
| 3.3.1.1 | Nitrogênio facilmente mineralizável .....                                     | 48 |
| 3.3.1.2 | Determinação de nitrato .....   | 49 |
| 3.3.2   | ANÁLISES DE PLANTAS.....  | 49 |
| 3.3.2.1 | Produtividade.....  | 49 |
| 3.3.2.2 | Quantificação de nitrogênio .....   | 49 |
| 3.3.2.3 | Quantificação de boro .....   | 50 |
| 3.3.2.4 | Quantificação dos outros nutrientes .....                                     | 50 |
| 3.4     | ANÁLISE ESTATÍSTICA .....   | 50 |
| 4.      | RESULTADOS .....  | 52 |
| 4.1     | FERTILIZAÇÃO NITROGENADA.....   | 52 |
| 4.1.1   | INDICADORES DE ESTADO NUTRICIONAL DAS PLANTAS E<br>PRODUÇÃO DE BIOMASSA. .... | 52 |
| 4.1.2   | NITROGÊNIO MINERAL NO SOLO .....  | 56 |
| 4.2     | CONDICIONADORES DE SOLO .....   | 60 |
| 4.2.1   | INDICADORES DE ESTADO NUTRICIONAL DAS PLANTAS E<br>PRODUÇÃO DE BIOMASSA. .... | 60 |
| 4.2.2   | NITROGÊNIO MINERAL NO SOLO .....  | 67 |
| 5.      | DISCUSSÃO .....   | 72 |
| 5.1     | FERTILIZAÇÃO NITROGENADA.....   | 72 |
| 5.2     | CONDICIONADORES .....   | 74 |
| 6.      | CONCLUSÃO .....   | 76 |
|         | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 77 |

## 1. INTRODUÇÃO

O nitrogênio é um elemento fundamental para todos os seres vivos, pois integra moléculas orgânicas essenciais para o organismo. Para as plantas, é o nutriente requerido em maior quantidade, logo a disponibilidade de N, mais do que qualquer outro nutriente, é quase sempre um fator limitante, visto que influencia diretamente o crescimento e a produtividade das culturas (Bredemeier e Mundstock, 2000). Por ser requerido em quantidades que normalmente não são supridas pelo solo, o uso de outras fontes de N é imprescindível para atender as exigências nutricionais das culturas (Amado et al., 2000). Assim, a adubação nitrogenada mineral é muito utilizada e representa um custo significativo na produção, além de causar impactos negativos no ambiente (Cui et al., 2014).

A demanda por aumento de produção intensificou as safras agrícolas e o uso de nitrogênio para fertilizar as culturas. Dessa maneira, em sistemas de produção vegetal, grandes quantidades de nitrogênio podem manter-se sobre o solo após a colheita, onde permanecem suscetíveis a perdas consideráveis de nitrogênio, sobretudo na ausência de cobertura vegetal. As chuvas de inverno na Europa, frequentemente induzem a lixiviação de elevadas quantidades de nitrogênio ao meio ambiente. Dessa forma, com o amplo aumento na utilização de fertilizantes nitrogenados, surgiu o problema da poluição das águas subterrâneas e superficiais por nitratos (Thorup-Kristensen, 1983; Cicek et al., 2015).

Para limitar e evitar a contaminação das águas por nitratos, a comunidade europeia estabeleceu diretivas de Boas Práticas Agrícolas (GPA), que recomendam desde a redução na fertilização nitrogenada, orgânica e mineral, até o estabelecimento de culturas de captura entre culturas principais, e durante a estação com maior precipitação, para absorver nitrogênio residual e reduzir as perdas (Constantin et al., 2012). A utilização de fertilizantes de liberação gradual e condicionadores de solo, de forma a ajustar a disponibilidade de N no solo com os momentos de maior necessidade das culturas e aumentar a eficiência de uso do nutriente, também podem ser uma alternativa para a redução de perdas de nitrogênio.

Quando as culturas de captura são cultivadas para evitar perdas de nitrogênio, é importante que elas sejam capazes de reduzir a concentração de nitratos do solo a níveis muito baixos. Assim, desenvolvemos este trabalho, com o objetivo de avaliar a capacidade da aveia (*Avena sativa* L.) na captura de nitrogênio do solo, a fim de reduzir as perdas de nitratos para os cursos de água e óxidos de N para a atmosfera, e estudar a influência da adubação nitrogenada residual da cultura do milho na aveia, cultivada em sequência.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica são apresentadas informações teóricas sobre os temas que permitem facilitar a compreensão da pesquisa, contextualizar a necessidade do estudo e destacar a importância do mesmo, bem como ajudar a interpretar os resultados.

### 2.1 NITROGÊNIO NOS ECOSISTEMAS

O nitrogênio (N) é um nutriente fundamental para todos os seres vivos, pois integra moléculas orgânicas essenciais para o organismo, como proteínas e ácidos nucleicos (Rosa et al., 2003). A principal fonte e reserva de N é a atmosfera, que é constituída por aproximadamente 79% de N, na sua forma elementar, de gás dinitrogênio (N<sub>2</sub>). Apesar de ser abundante na atmosfera, poucos seres vivos conseguem utilizá-lo nesta forma, apenas algumas bactérias e cianobactérias são capazes de fixar o N<sub>2</sub> e o empregar em suas sínteses (Rosa et al., 2003; Fachin, 2005).

Para ser utilizado pelas plantas, o N<sub>2</sub> é combinado com o hidrogênio (H<sub>2</sub>) para compor a molécula de amônia (NH<sub>3</sub>), que pré-forma as combinações iônicas facilmente absorvidas pelas culturas. Essa transformação ocorre em algumas bactérias e cianobactérias, sendo denominada fixação biológica de nitrogênio (FBN) (Rosa et al., 2003; Fachin, 2005). A formação de NH<sub>3</sub> a partir do N<sub>2</sub> pode ocorrer naturalmente por fenômenos físicos, como os relâmpagos, ou biológicos, como a FBN (Rosa et al., 2003; Santos, 2015). Outra forma de fixação, e a mais significativa para as plantas cultivadas, é a industrial, pois trata-se do processamento para a obtenção dos fertilizantes nitrogenados (Rosa et al., 2003; Fachin, 2005). Na agricultura, os fertilizantes nitrogenados resultantes do processo industrial são as fontes de N quantitativamente mais utilizadas para suprir as necessidades dos vegetais. Contudo, os fertilizantes de síntese industrial representam um custo significativo na produção, além da possibilidade de causar impactos negativos no ambiente, o que exige estudos permanentes para otimizar seu uso (Amado et al., 2000; Cui et al., 2014).

### 2.1.1 NITROGÊNIO NAS PLANTAS

O N é um elemento essencial e determinante para o crescimento das plantas e produtividade, sendo necessário em grande quantidade. É componente dos mais importantes compostos e complexos organominerais de interesse vital para a planta, como os aminoácidos e proteínas, bases nitrogenadas e ácidos nucleicos, enzimas e coenzimas, vitaminas e clorofila. Sem a presença de N, diversos processos como respiração, fotossíntese, absorção iônica e hereditariedade, estariam comprometidos (Harper, 1994; Malavolta et al., 1997; Fachin, 2005; Santos, 2015).

A absorção de N pelas plantas se dá principalmente na forma mineral, pelos íons amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Malavolta et al., 1997). O íon nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), a molécula da amônia ( $\text{NH}_3$ ) e compostos orgânicos simples como a ureia e aminoácidos também podem ser absorvidos em menor quantidade. Como já se referiu, as plantas, sobretudo da família Fabaceae, podem ter acesso ao N a partir da molécula  $\text{N}_2$  quando estabelecem relações de simbiose com microrganismos com capacidade de fixação (Campbell, 1978; Santos, 2015).

Os vegetais podem absorver ambas as formas iônicas ( $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ ), mas a preferência por um ou outro íon pode ser determinada por diversos fatores, como a forma que está mais disponível no meio em que as culturas se desenvolvem, as características genéticas e a idade das plantas e ainda por questões ambientais (solo, clima, temperatura) (Rodrigues e Coutinho, 2000; Santos, 2015).

Em solos com características normais (temperatura, acidez não elevada, umidade e aeração), o  $\text{NO}_3^-$  será absorvido mais rapidamente, pois se encontra disponível na solução do solo e em maior quantidade, enquanto o  $\text{NH}_4^+$  aparece adsorvido nos colóides do solo ou imobilizado pelos microrganismos (Santos, 2001; Santos, 2015). E também porque nessas condições o  $\text{NO}_3^-$  pode se movimentar no solo com maior facilidade, primeiro por fluxo de massa e posteriormente por difusão quando diminui a sua concentração na rizosfera, favorecendo assim, sua absorção pelas raízes (Olson e Kurtz, 1982). Entretanto em solos ácidos, com aeração deficiente e baixas temperaturas, o  $\text{NH}_4^+$  está mais disponível sendo facilmente absorvido, pois essas características do solo dificultam a nitrificação (Malavolta et al., 1997; Fachin, 2005; Santos 2015).

Outro fator que pode ter relevante influência na forma de íon absorvida, é a idade da planta. De modo geral, os vegetais absorvem melhor o  $\text{NH}_4^+$  no início do seu desenvolvimento, ao passo que nas fases finais do ciclo aumentam a absorção de  $\text{NO}_3^-$  (Olson e Kurtz, 1982). A forma do N que é absorvida pode também influenciar na rizosfera e no metabolismo da planta

(Rodrigues e Coutinho, 2000). Com a absorção de  $\text{NO}_3^-$ , uma hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) é liberada, podendo elevar o pH da rizosfera. Além disso, a absorção nesta forma custa muita energia para a célula, pois cada íon precisa passar pelo processo de redução para  $\text{NH}_4^+$  (nitrito-reductase) e para isso consome duas moléculas de NADH (Malavolta et al., 1997; Fachin, 2005; Santos, 2015). Por outro lado, a absorção de N na forma de  $\text{NH}_4^+$  aumenta a acidez do meio, devido à saída de  $\text{H}^+$  para manter a neutralidade elétrica do citoplasma (Fachin, 2005; Santos, 2015). Além de que quando absorvido na forma amoniacal, pode inibir a absorção e induzir a deficiência de outros cátions, como magnésio (Mg) e cálcio (Ca), e eventualmente é capaz de estimular a absorção de fósforo (P) (Olson e Kurtz, 1982).

Para Rodrigues e Coutinho (2000), as plantas também têm capacidade para absorver nutrientes pelas folhas e outros órgãos aéreos quer na forma mineral quer através de trocas gasosas realizadas pelos estômatos. Assim, gases disponíveis na atmosfera como  $\text{NH}_3$ , óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e anidrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ) podem entrar nas folhas e ser incorporados no sistema, promovendo o crescimento das plantas (Tisdale et al., 1985). O homem pode aumentar a absorção de nutrientes pelas folhas através da aplicação de fertilizantes foliares.

Para ser assimilado pelas plantas, o N precisa entrar nas células da epiderme e do córtex radicular. Essa passagem ocorre através da membrana plasmática por meio de transportadores específicos para os íons  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ , que são as principais fontes de N absorvidas pelas culturas (Bredemeier e Mundstock, 2000). O  $\text{NO}_3^-$  absorvido deve ser reduzido a  $\text{NH}_4^+$  para ser assimilado. A redução pode ocorrer tanto na raiz como na parte aérea. Dessa forma, o  $\text{NO}_3^-$  pode ser transportado na forma iônica para a parte aérea ou incorporado em aminoácidos, dependendo do potencial de redução do  $\text{NO}_3^-$  nas raízes. O transporte se dá via corrente transpiratória, através dos vasos do xilema (Santos, 2001; Fachin, 2005).

O íon  $\text{NO}_3^-$  pode ser absorvido em consideráveis quantidades, uma vez que a planta tem tolerância e acumula o excesso em seus tecidos, mais precisamente nos vacúolos das raízes, das folhas e órgãos de reserva. Porém, isso pode dificultar a sua liberação para o citoplasma e conseqüentemente a sua redução e utilização no metabolismo (Rodrigues e Coutinho, 2000; Santos, 2015). Já o íon  $\text{NH}_4^+$  em níveis elevados nas plantas pode desencadear reações de toxicidade, retardando o seu desenvolvimento, tendo de ser incorporado nas raízes. No entanto, este também pode se armazenar nos vacúolos e ser convertido em aminoácidos, amins e amidas como via de desintoxicação (Santos, 2015).

O  $\text{NH}_4^+$  assim que absorvido ou formado pela redução do  $\text{NO}_3^-$ , vai entrar na síntese de compostos orgânicos, primeiramente aminoácidos, amins e amidas, compostos de baixa

massa molar, e, em seguida, de proteínas e ácidos nucleicos que tem massa molar mais elevada (Santos, 2015). Já nas plantas fixadoras de N<sub>2</sub>, o transporte do N fixado é feito em compostos como a glutamina, ureidos e asparagina (Santos, 2001; Fachin, 2005). Assim, após ser assimilado, o N entra na composição de diversas moléculas e tem variadas funções no metabolismo da planta, que o tornam um elemento vital, com uma representatividade que varia de 1% a 5 % quando expresso em matéria seca vegetal (Santos, 2015).

O N é um elemento muito móvel nas plantas, tanto pelo floema quanto pelo xilema, e pode ser facilmente redistribuído na planta na forma de aminoácidos. Assim, as plantas respondem rapidamente à sua aplicação. Então quando fornecido em quantidades adequadas estimula o desenvolvimento vegetativo e a expansão do sistema radicular (Rodrigues e Coutinho, 2000)

Essa resposta rápida, juntamente com a necessidade e a facilidade da aplicação de fertilizantes nitrogenados para a maioria das culturas, faz com que muitas vezes o N seja aplicado em excesso, o que também é prejudicial para a planta, além de gerar efeitos negativos do ponto de vista econômico e ambiental (Santos, 2001). Normalmente os sintomas de excesso mais observados nos vegetais são plantas mais verdes e vigorosas, devido ao aumento do conteúdo em clorofila e o aumento da susceptibilidade ao ataque de pragas e doenças, pois quando há excesso de N e não há aumento na disponibilidade dos outros elementos nutricionais, ocorre aumento do tamanho do protoplasma em relação a parede celular. Nestas condições, as células perdem rigidez, a folha fica menos dura e mais suculenta, ficando menos resistente. Com isso pode também ocorrer acamamento dos cereais, pois há um crescimento muito vigoroso e a estrutura celular menos rígida prejudica a sustentação (Santos, 2015).

Da mesma forma, quando em quantidades insuficientes os sintomas de deficiência são manifestados e o N é rapidamente realocado das folhas mais velhas para os órgãos e folhas mais novos, principalmente para regiões meristemáticas. Essa translocação dos aminoácidos e a proteólise das proteínas resultam no colapso do cloroplasto. Com isso, o conteúdo de clorofila sofre uma redução, sendo o primeiro sintoma visível de deficiência de N o amarelecimento (clorose) das folhas mais velhas, que pode (ou não) ser acompanhado pela senescência dessas folhas e paragem ou redução de crescimento (Santos, 2001; Fachin, 2005; Havlin et al., 2014).

### 2.1.2 NITROGÊNIO NO SOLO

O N no solo também tem elevada mobilidade e pode ser encontrado na forma orgânica e inorgânica (mineral), que estão em constante equilíbrio. A forma orgânica representa cerca de 95% a 98% do total do N do solo. É formada por variados compostos orgânicos e macromoléculas, resultantes dos excrementos animais ou biomassa vegetal, relativamente complexos e que não podem ser absorvidas pelas plantas sem antes passar pelo processo de decomposição e mineralização microbiana. Dessa forma, a função de reserva é mais importante do que nutrição a curto prazo, pois vão servir de suporte à formação de N mineral. Os substratos orgânicos apresentam uma baixa solubilidade em água, embora possam ficar suscetíveis ao arrastamento pelas águas superficiais, através do fenômeno de erosão (Santos, 2001; Militão, 2004).

As formas minerais, que são utilizadas pelas plantas para a absorção, representam apenas 2% a 5% do N das camadas superficiais do solo, e podem estar na forma de íons, moléculas ou combinação químicas das duas. Como moléculas, as principais formas são o  $N_2$ ,  $NH_3$  e óxidos de nitrogênio como o dióxido de N ( $NO_2$ ) e o monóxido de N ( $NO$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ). Na forma iônica, o  $NH_4^+$ , o  $NO_3^-$  e o  $NO_2^-$  são as mais encontradas (Santos, 2015).

Os íons  $NH_4^+$  e  $NO_3^-$  são as formas de maior significado para as plantas por serem as principais formas de N absorvidas. O  $NO_2^-$  se absorvido pode ter elevado significado fisiológico para as plantas por ser tóxico, mas normalmente não se acumula no solo (Bryson et al., 2014). O  $N_2$  é um gás inerte, mas que tem elevado significado para as plantas após ser convertido em  $NH_3$  por microrganismos fixadores. Os  $NO_x$  têm pouco significado para a nutrição das plantas, pois a sua absorção é mínima via trocas gasosas pelos estômatos, mas um significado ecológico elevado devido a estarem associados a problemas diversos de poluição ambiental (Tisdale et al., 1985; Bryson et al., 2014).

### 2.1.3 DINÂMICA DO NITROGÊNIO NO SOLO

Segundo Santos (2015) as formas mineral e orgânica do N no solo encontram-se em equilíbrio, mas que este pode ser alterado principalmente por dois processos, a mineralização da forma orgânica e a imobilização da forma mineral. Outros processos biológicos e não biológicos também levam a entradas e saídas de N do sistema solo-planta-atmosfera. Dessa forma, a grande dinâmica do N no solo dificulta a sua gestão nos ecossistemas (Ferreira, 2018).

Assim serão referidos de forma sumária os processos que tem mais relevância quantitativa para a área agrônômica, ou seja, para a gestão da fertilização nitrogenada.

#### 2.1.3.1 Imobilização e mineralização do nitrogênio

A mineralização do N é um processo de produção de N-mineral a partir do N-orgânico. Já a imobilização é o inverso, consiste na incorporação do N-inorgânico em formas de N-orgânico (Ferreira, 2018). Os dois processos ocorrem simultaneamente, mas de forma antagônica. Assim, o balanço entre eles designa-se por mineralização ou imobilização líquida.

A imobilização do N-mineral é um fenômeno que reduz temporariamente a disponibilidade das formas nítrica e amoniacal de N para as plantas. Isso porque o N, junto com outros nutrientes, é necessário para os microrganismos heterotróficos sintetizarem seus tecidos. Quando se aplicam fertilizantes orgânicos com elevada percentagem de carbono (C) em relação à percentagem de N no solo (relação C:N), especialmente maiores que 30, os microrganismos decompositores de matéria orgânica utilizam o N que estava na forma absorvível pelas plantas para as suas sínteses imobilizando-o. No entanto, assim que esses microrganismos começam a morrer, voltam a mineralizar-se disponibilizando o N mineral (Santos, 2015).

Quando a relação C:N dos substratos orgânicos utilizados for menor que 20 (valor mais comumente encontrado em leguminosas), logo que é iniciada a transformação do material, ocorre liberação de N nas formas inorgânicas no solo, pois há mais N do que os microrganismos necessitam para suas sínteses (Santos, 2015). Nestes casos, o N-mineral do solo não diminui e rapidamente começa a ficar livre para as plantas. Deste processo denominado mineralização, alguns compostos orgânicos tornam-se resistentes ao ataque dos microrganismos e formam a matéria orgânica estável ou húmus do solo, melhorando as suas características. Além de ser uma importante fonte de N natural para as plantas (Campbell, 1978).

A mineralização do N-orgânico se dá através de duas reações sequenciais denominadas aminização e amonificação (Santos, 2015). A aminização é a fase primária em que os microrganismos, especialmente bactérias e fungos, convertem as macromoléculas e moléculas complexas, por meio de várias reações, em compostos nitrogenados mais simples, como aminas e aminoácidos, mas que ainda não são absorvíveis pelas culturas (Santos, 2001). Portanto, outro processo se torna necessário, a amonificação, que nada mais é do que a transformação dos aminoácidos e aminas, pela atuação dos microrganismos amonificantes, em energia e  $\text{NH}_3$ . A molécula de  $\text{NH}_3$ , mais tarde reage com a molécula de água e recebe um próton ( $\text{H}^+$ ), formando

o íon  $\text{NH}_4^+$  e assim disponibilizando a primeira forma de N absorvível para as plantas (Rosa et al., 2003; Militão, 2004; Santos, 2015).

#### 2.1.3.2 Nitrificação

Nitrificação é a conversão biológica das formas amoniacais ( $\text{NH}_3$  e  $\text{NH}_4^+$ ) do N à formas oxidadas como  $\text{NO}_2^-$  ou  $\text{NO}_3^-$  realizada por microrganismos autotróficos, designados nitrificantes (Santos, 2015).

A nitrificação ocorre em duas fases: na primeira o  $\text{NH}_4^+$  é convertido em  $\text{NO}_2^-$  por bactérias do gênero *Nitrosomonas*. E na segunda, o  $\text{NO}_2^-$  obtido da primeira reação, vai ser rapidamente oxidado e transformado em  $\text{NO}_3^-$  por bactérias do gênero *Nitrobacter*. Em geral, a segunda etapa é mais rápida que a primeira. Assim, o  $\text{NO}_2^-$ , que é fitotóxico para as plantas, não se acumula no solo. É importante referir que esse processo libera  $\text{H}^+$  sendo um fenômeno acidificante do solo (Bryson et al., 2014; Havlin et al., 2014; Santos, 2001, 2015).

#### 2.1.3.3 Desnitrificação e quimiodesnitrificação

Desnitrificação é um fenômeno biológico pelo qual os nitratos e nitritos são reduzidos por microrganismos anaeróbios facultativos que usam as formas oxidadas como aceitador de elétrons, conduzindo à formação de gases, sobretudo  $\text{N}_2$  ou a  $\text{NO}_x$  (Havlin et al., 2014; Santos, 2015). Esses gases são pouco solúveis em água e muito voláteis, saindo facilmente para a atmosfera, constituindo perdas de N no solo e contribuindo para a poluição atmosférica (Santos, 2001).

É importante levar em conta que para ocorrer desnitrificação devem estar presentes bactérias desnitrificantes, ambiente anaeróbio ou microaerofílico, doadores de elétrons e  $\text{NO}_x$  como aceitadores de elétrons (Firestone, 1982; Coyne, 2008).

A desnitrificação provoca perdas significativas de N do solo e, conseqüentemente, dos ecossistemas agrícolas, contribuindo para a redução da eficiência de uso do N. Além de ter um papel muito importante no ciclo biogeoquímico do N, pois é a principal via pela qual os compostos inorgânicos oxidados de N são convertidos em gases nitrogenados ( $\text{N}_2$  e  $\text{NO}_x$ ) (Firestone, 1982). Esses gases formados têm grandes implicações na atmosfera, causando problemas ambientais diversos. Em especial o  $\text{N}_2\text{O}$ , que é um gás de efeito estufa, cerca de 300 vezes mais efetivo que o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na destruição da camada de ozônio (Mosier et al., 1996). Alguns  $\text{NO}_x$  também se combinam com água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ) para formar ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), um componente importante das chuvas ácidas (Havlin et al., 2014).

Em solos bem arejados podem ocorrer perdas de N na forma gasosa por processos não enzimáticos. Esse processo é chamado de quimiodesnitrificação (Havlin et al., 2014). O  $\text{NO}_2^-$  formado durante os processos de nitrificação e desnitrificação, pode reagir com outros componentes do solo formando gases de N que volatilizam facilmente (Nelson, 1982). Os nitritos não tendem a se acumular no solo, pois a atividade das *Nitrobacter* na oxidação do  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NO}_3^-$  ocorre rapidamente. Porém quando encontrados em quantidades significativas no solo, apresentam efeitos negativos nas plantas e nos microrganismos (Santos, 2015). A importância agronômica das perdas de N por este processo é duvidosa, uma vez que para ocorrer a acumulação de  $\text{NO}_2^-$  o solo deve apresentar valores de pH elevados, o que tende a restringir a formação de gases nitrogenados. Contudo, pode ocorrer próximo dos grânulos de ureia, onde a hidrólise vai elevar o pH e causar a inatividade temporária da *Nitrobacter*. Assim, podem acumular-se nitritos e coexistirem condições de aeração favoráveis à quimiodesnitrificação (Nelson, 1982; Ferreira, 2018).

#### 2.1.3.4 Volatilização de amônia

A volatilização é um processo que envolve reações químicas, biológicas e processos físicos que transportam  $\text{NH}_3$  do solo para a atmosfera (Tisdale et al., 1985). As perdas por volatilização podem variar muito, chegando a mais de 50% N aplicado. Em geral podem reduzir-se quando: a) os fertilizantes são bem incorporados do solo; b) quando os solos têm textura e umidade adequadas, sobretudo quando a capacidade de troca catiônica (CTC) for elevada, em que o  $\text{NH}_4^+$  resultante da protonização de  $\text{NH}_3$ , fica adsorvido pelas cargas negativas dos argilominerais e coloides orgânicos; c) quando uma cultura está bem instalada, pela absorção radicular ou pela reabsorção de  $\text{NH}_3$  liberado; e d) quando os solos tendem a ter reação ácida (Nelson, 1982; Stevenson, 1986; Francis et al., 2008)

O aumento das perdas ocorre quando: a) os fertilizantes são constituídos principalmente de ureia e outras formas amoniacais; b) quando são aplicados à superfície, sem incorporação, e, sobretudo, em solos alcalinos; c) quando os resíduos orgânicos são decompostos à superfície; d) se a CTC do solo for baixa; e) se os solos estiverem encharcados ou demasiados secos; e f) se a temperatura e a velocidade do vento forem elevadas, aumentando a difusão (Nelson, 1982; Stevenson, 1986; Francis et al., 2008).

#### 2.1.3.5 Lixiviação

Lixiviação é o processo de perda de N junto com a água de percolação no perfil do solo, para fora do alcance das raízes das plantas e em seguida para as águas subterrâneas (Ferreira, 2018). Ocorre quando há acúmulo de  $\text{NO}_3^-$  no solo, uma vez que este é muito solúvel e carregado negativamente, lixiviando com facilidade. A elevada mobilidade é também devida ao fato de não haver qualquer mecanismo que o retenha no solo, como os colóides que não o adsorvem, pois também possuem carga negativa (Santos, 2015).

A forma amoniacal também pode ser perdida proporcionalmente à quantidade de íons  $\text{NH}_4^+$  que estejam disponíveis na solução do solo, sobretudo quando a CTC desse solo for baixa, como acontece nos solos arenosos (Tisdale et al., 1985; Rodrigues e Coutinho, 2000). Elevada perda de N por lixiviação ocorre também quando a aplicação de fertilizantes tiver como fonte a ureia, que é muito solúvel em água, se ocorrer precipitação elevada antes que ocorra amonificação (Rodrigues e Coutinho, 2000).

As perdas de N por percolação, na maioria dos casos, têm maior significado que as perdas por erosão, pois quando ocorre o arrastamento interno, todas as formas de N solúvel em água vão ser carregados pela drenagem (Santos, 2015). A magnitude do fenômeno depende da textura do solo, da CTC, da dose, tipo e do momento da aplicação de fertilizantes nitrogenados, da pluviosidade da região e/ou da gestão da irrigação, da vegetação existente e da sua capacidade de absorção do N e, principalmente, se a quantidade de  $\text{NO}_3^-$  no solo for elevada. Assim, a lixiviação pode ser considerada um fenômeno sazonal (Rodrigues e Coutinho, 2000; Havlin et al., 2014; Santos, 2015).

Em regiões temperadas a lixiviação pode ocorrer em diferentes extensões consoante a época do ano. Na primavera, as perdas podem ser mais significativas, pois as condições favorecem a aplicação de fertilizantes e a nitrificação, ocorrendo o acúmulo de  $\text{NO}_3^-$ . Sobretudo se o estágio de desenvolvimento das plantas não for suficiente para absorver grande parte dos nitratos e houver a ocorrência de elevadas precipitações. No verão, a lixiviação é reduzida quando a evapotranspiração excede a precipitação e as taxas de absorção da cultura são elevadas. As perdas podem ser elevadas quando o sistema de irrigação for mal conduzido e a quantidade de água for excessiva. No outono e inverno, também pode ser reduzida devido às baixas temperaturas retardarem a mineralização, ou elevadas, pois pode ocorrer lixiviação do N residual da cultura antecessora, sobretudo porque essas estações concentram maior pluviosidade, sobretudo se o solo não estiver coberto por vegetação (Rodrigues e Coutinho, 2000).

A maior consequência da perda de nitratos pela lixiviação é o efeito negativo no ambiente, pois normalmente o seu destino final atinge corpos de água subterrâneos e superficiais. O aumento da disponibilidade de nutrientes na água, principalmente N e P, potencializam o processo de eutrofização, promovendo o desenvolvimento de vegetação aquática e consumindo o oxigênio disponível, gerando toxicidade potencial para os peixes. Os nitratos reduzem a qualidade da água, interferindo nas suas aplicações e na utilização para o consumo humano, uma vez que a presença de nitratos pode causar metahemoglobinemia. Por precaução, a União Europeia estabeleceu que o limite permitido na água de consumo é de 50 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dm<sup>-3</sup> (Santos, 2005; Wiesmann et al., 2007; Comissão Europeia, 2010).

#### 2.1.3.6 Erosão

Erosão é um processo físico de remoção da camada superficial do solo, que ocorre basicamente devido à ação do vento (erosão eólica) e da chuva (erosão hídrica) (Rodrigues e Coutinho, 2000). A erosão hídrica do solo é a maior responsável pela perda de nutrientes, sobretudo de N em todas as suas formas (Bertol et al., 2003). A perda de N ocorre em especial na forma orgânica, que é a conformação predominante de N na camada superficial. Assim o dispêndio não é do N prontamente absorvível pelas plantas, mas do N que seria disponibilizado gradualmente a prazo, após a mineralização (Santos, 2015; Rodrigues e Coutinho, 2000).

De acordo com Santos (2015), as perdas por erosão podem ser semelhantes às que ocorrem por lixiviação. Contudo, as perdas podem ser muito variáveis pois sofrem influência de diversos fatores, como a chuva, o solo, a topografia, a vegetação de cobertura e o manejo e práticas de conservação do solo (Cogo, 1981). Em áreas desprotegidas e fisicamente degradadas, típico de sistemas convencionais de preparo de solo, a quantidade de N perdida pela enxurrada pode ser particularmente elevada (Guadagnin et al., 2005).

#### 2.1.3.7 Adsorção do íon amônio

O íon NH<sub>4</sub><sup>+</sup> além de ser absorvido pelas plantas é facilmente adsorvido pelos coloides do solo (minerais ou orgânicos) (Santos, 2015). Esses coloides podem ser minerais de argila expansíveis, do tipo 2:1, denominadas vermiculitas, ilitas e em menor importância montmorilonitas, que adsorvem cátions para neutralizar as cargas negativas resultantes das substituições isomórficas (Rodrigues e Coutinho, 2000; Santos, 2015). Os minerais 1:1, como a caulinita, praticamente não tem capacidade de fixação de cátions, sendo que as cargas negativas são dependentes do pH do solo (Varenes, 2003).

A matéria orgânica com elevada estabilidade química e biológica, ou seja, o húmus possui uma estrutura coloidal semelhante à da argila e pode reter cátions (Kissel et al., 2008). As cargas negativas dos coloides húmicos também são dependentes do pH. Assim, em condições alcalinas, a capacidade de adsorção de cátions do húmus é elevada, ocorrendo o inverso em condição de acidez (Sengik e Albuquerque, 2003). A matéria orgânica também pode fixar  $\text{NH}_3$  através de reações químicas não biológicas (Kissel et al., 2008).

Assim, quando o N está fixado fica pouco disponível para as plantas e para as bactérias nitrificantes, reduzindo a eficiência de uso do nutriente. Entretanto essa retenção pode ser temporária, e assim ser benéfica para a fertilidade do solo, pois o  $\text{NH}_4^+$  fixado vai ser liberado lentamente ou ainda trocado com outros cátions presentes na solução do solo. Essa permutação (CTC) pode reduzir a taxa de nitrificação e os riscos de perdas de N por lixiviação e desnitrificação (Havlin et al., 2014; Santos, 2015)

#### 2.1.3.8 Fixação biológica de nitrogênio

O maior reservatório global de N é a atmosfera, que é constituída por aproximadamente de 79% desse elemento na sua forma gasosa. O N na forma  $\text{N}_2$ , segundo Rodrigues e Coutinho (2000), pode ser considerada a origem e o destino biogeoquímico do N. A molécula de  $\text{N}_2$  é um gás praticamente inerte, assim para ser utilizado pelos organismos deve ser transformado em moléculas mais reativas, como N-amoniaco ( $\text{NH}_3$  e  $\text{NH}_4^+$ ) e N-nítrico ( $\text{NO}_3^-$ ) (Aduan, 2004).

A fixação biológica e a industrial são as principais formas de fixação do N atmosférico (Fachin, 2005). Cooper e Scherer (2012), estimam que a quantidade de N fixado em sistemas agrícolas e ecossistemas naturais possa ser superior ao valor fixado industrialmente. Estima-se que a fixação dos campos agrícolas, supera em mais da metade o N aplicado via fertilizantes químicos obtidos de síntese industrial. Dessa forma, Stevenson (1986) coloca a FBN ao nível da fotossíntese e da respiração como processos biológicos determinantes para a vida na terra.

A fixação biológica é realizada naturalmente por microrganismos de vida livre ou simbiotes. É um processo mediado por um complexo enzimático designado nitrogenase e com participação direta de outros nutrientes minerais, em que o  $\text{N}_2$  é reduzido a  $\text{NH}_3$ . O sistema de maior interesse agrícola é constituído principalmente por bactérias da família Rhizobiaceae em simbiose com plantas conhecidas como leguminosas, pertencentes a família Fabaceae (Fachin, 2005; Cardoso et al., 2013).

A fixação simbiótica pode ser a principal ou até mesmo a única fonte de N para algumas culturas. Em determinadas condições pode dispensar a necessidade da aplicação de fertilizantes sintéticos, dependendo da capacidade da espécie de leguminosa, da estirpe da bactéria e das condições de clima e solo que possam favorecer a fixação do N atmosférico (Boddey et al., 1997; Santos, 2015).

A FBN além de ser benéfica para a leguminosa que se encontra em simbiose, também pode beneficiar plantas cultivadas em consócio (leguminosas ou não) ou por culturas subsequentes, uma vez que a decomposição das bactérias, dos nódulos, e das próprias plantas vai libertando N-mineral anteriormente fixado (Santos, 2015)

## 2.2 EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DO NITROGÊNIO

A influência direta do N no crescimento e desenvolvimento das culturas, torna a sua disponibilidade quase sempre um fator limitante da produção (Bredemeier e Mundstock, 2000). Por ser requerido em quantidades que normalmente não são supridas pelo solo, o uso de outras fontes de N é imprescindível para atender as exigências nutricionais das culturas (Amado et al., 2000). Assim, a adubação nitrogenada mineral é muito utilizada e representa um custo significativo na produção, além de causar impactos negativos no ambiente (Cui et al., 2014).

Devido a sua importância e a elevada mobilidade no sistema solo-planta-atmosfera, a dinâmica do N vem sendo muito estudada, buscando maximizar a eficiência do seu uso e minimizar as perdas do N no solo, bem como melhorar a sua absorção e metabolização pelas plantas (Bredemeier e Mundstock, 2000).

A eficiência de uso do nitrogênio (EUN) pode ser expressa de formas diversas. Pode significar a percentagem de N do fertilizante aplicado que é recuperado por uma cultura (Rodrigues e Coutinho, 2000). Pode também ser expressa pela razão entre a produtividade de grãos ou biomassa vegetal por unidade de N aplicado no solo (Moll et al., 1982). Ainda de acordo com Moll et al. (1982) a EUN pode ser representada por duas frações principais, a eficiência na absorção de nitrogênio (EAN), ou seja, a capacidade da planta em absorver N, e a eficiência na utilização de nitrogênio (EUtN), determinada como a aptidão da planta em utilizar cada unidade N absorvida para produção de grãos ou de matéria seca. Contudo, o indicador de EUN mais utilizado é o N aparentemente recuperado (NAR). É determinado pela quantidade de N recuperado em uma cultura fertilizada menos a quantidade recuperada em uma cultura não

fertilizada, dividindo pela quantidade de N aplicado como fertilizante (Wild, 1988; Rodrigues e Coutinho, 2000).

A EUN pode variar dentro de uma espécie em função das diferenças genótípicas e da interação genótipo-ambiente. Estas diferenças podem alterar a capacidade de absorção, transporte e utilização dos nutrientes pelas plantas (Steenbjerg e Jakobsen, 1963; Marschner, 1997). A EUN para um determinado nutriente pode variar à medida que sua disponibilidade no solo seja alterada. Em geral a EUN pela planta aumenta com a redução da disponibilidade do N no solo (Barros et al., 1986). Santana et al. (2002) referem que a alta eficiência para um dado nutriente não está associada à alta eficiência para os demais nutrientes.

Apesar de ser um dos nutrientes mais absorvidos pelas plantas, sabe-se que a recuperação de N, dos fertilizantes nitrogenados, é relativamente baixa, em muitos casos sendo menor que 50%. E quando as doses são maiores que as necessárias, a recuperação tende a ser menor ainda, gerando importantes implicações do ponto de vista econômico, na conservação da energia e na qualidade do meio ambiente (Rao et al., 1992; Rodrigues e Coutinho, 2000; Cardoso, 2013).

Rodrigues (1995), em trabalhos com a cultura da batata e utilizando o método das diferenças, observou redução linear nas percentagens de NAR, designadamente 75, 63, 38, 29 e 36%, conforme foi aumentando as doses de N de 50, 100, 150, 200 a 250 kg ha<sup>-1</sup> aplicados na forma de ureia. O mesmo autor avaliou outros índices, que indicaram a dose de 100 kg N ha<sup>-1</sup> como ótimo econômico, pois a partir dela a NAR decresceu bruscamente, assim como o retorno econômico do investimento em fertilizantes.

Beche et al. (2014) estudando cultivares de trigo lançadas entre 1940 e 2009, submetidas a quatro doses de adubação nitrogenada (0, 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup>) também registraram diminuição da EUN conforme aumento das doses de N, em uma amplitude de 10 a 75 gramas de grão por grama de N, provavelmente em razão do aumento gradual da produtividade de grãos com a adubação nitrogenada e da baixa eficiência de uso do nutriente, que foi em torno de 40 a 60%. Assim, os maiores valores de EUN foram obtidos nas doses de 0 e 60 kg N ha<sup>-1</sup>, independente da cultivar. Já a EAN aumentou linearmente no aumento das doses. Portanto, as cultivares aumentaram a sua capacidade de absorver e armazenar N proveniente do solo, o que foi interpretado como a contribuição do melhoramento genético do trigo no Brasil. A EUtN também apresentou redução conforme o aumento da dose de N, sendo que o seu valor máximo foi atingido na dose 0 kg N ha<sup>-1</sup> (27 a 42 g g<sup>-1</sup>) e nas doses de 60, 120

e 180 kg N ha<sup>-1</sup> valores menores (16 a 30 g g<sup>-1</sup>). Contudo, as cultivares modernas foram mais eficientes em utilizar o N do que as pioneiras.

Kolchinski e Schuch (2003) em ensaios com aveia branca no Brasil, testaram quatro doses de N (0, 24, 48 e 73 kg N ha<sup>-1</sup>) e encontraram aumento de grãos linearmente ao incremento nas doses de N. Porém a eficiência da fertilização nitrogenada reduziu com o aumento do suprimento de N. Sendo a eficiência na absorção e na remobilização do N as que mais contribuíram para este resultado, pois diminuíram de forma linear ao aumento da adubação, enquanto a EUtN não foi afetada pelas doses de N.

Fernandes (2005), em experimento com 6 cultivares de milho, também constatou que a EUN de todas as variedades diminuiu de 186,03, 65,04 para 31,11 (g planta<sup>-1</sup> de grão produzido por g de N aplicado) com o aumento da adubação nitrogenada de 30, 90 e 180 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Assim, à medida que há aumento na aplicação de fertilizantes nitrogenados no solo, ocorre redução na percentagem de recuperação do nutriente pelas plantas. E o excedente do que foi aproveitado pela cultura pode ter diversas destinações, sendo a perda de N do solo uma das mais importantes. A volatilização, a lixiviação e a desnitrificação tem sido apontadas como as principais causas de perda de N, e justificam a baixa eficiência de recuperação (Rao et al., 1992; Cardoso, 2013).

Uma gama de fertilizantes genericamente conhecida como de liberação gradual vem sendo desenvolvida de forma a ajustar a disponibilidade de N no solo com as necessidades das culturas e aumentar a EUN. Ainda no intuito de reduzir as perdas de N tem sido recomendada, para os sistemas de agricultura, a introdução das chamadas de culturas de captura (*catch crops*) após as culturas principais para absorver N residual e reduzir as perdas.

### 2.3 FERTILIZAÇÃO NITROGENADA

O mercado disponibiliza vários tipos de fertilizantes nitrogenados, que variam principalmente no teor de N total e na forma do N. Porém, independente da fórmula utilizada, uma vez no solo, o nitrogênio tende ser encontrado nas formas de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, que são aquelas predominantemente absorvidas pelas plantas. Atualmente também são disponibilizados fertilizantes com diferentes revestimentos e aditivos, que junto com as variadas formulações

auxiliam os agricultores a fazer o manejo correto da fertilização, aumentando a eficiência e reduzindo perdas (Reetz, 2017).

Mas somente a definição da melhor fonte de N não é o suficiente, sendo importante adotar melhores práticas de manejo de fertilizantes para observar maiores benefícios, como fazer a recomendação da dose correta, da época e o local de aplicação.

Para fazer a recomendação adequada da dosagem a ser aplicada, deve-se levar em consideração a capacidade do solo e da matéria orgânica em fornecer o nutriente, o tipo de fertilizante usado, a expectativa da produção e exportação da cultura, entre outros fatores (Rodrigues e Coutinho, 2000). Ao usar dosagens mais baixas às exigidas pelas culturas a produtividade será menor do que a esperada. Do mesmo modo, a aplicação de doses superiores pode resultar em prejuízo econômico ao produtor e prejuízos ao meio ambiente. Pois as plantas não absorvem tudo o que lhe foi fornecido e após a colheita o N-mineral que permanece no solo provavelmente será perdido por desnitrificação e lixiviação. Nesse caso, o uso de plantas de cobertura e o manejo dos resíduos culturais, para ajudar a manter o N no solo na forma de compostos orgânicos e reduzir à sua perda, é fundamental (Casarin e Stipp, 2013; Villalba, 2014; Reetz, 2017).

Os mesmos fatores devem ser levados em consideração para determinar a época de aplicação, juntamente com a dinâmica de absorção de N pela cultura e a logística disponível na propriedade para realizar a aplicação. Pensando em minimizar as perdas, parcelar a dose de N em diferentes estádios de crescimento da cultura, é uma das práticas mais recomendadas. Assim, aplicar o fertilizante o mais próximo possível do momento de maior exigência nutricional da planta, é uma estratégia de manejo que maximiza a EUN e melhora a produtividade, no entanto isso implica em um maior custo (Cantarella, 2007; Villalba, 2014).

O local de aplicação também deve ser bem manejado para reduzir perdas. Dessa maneira, conhecer a dinâmica do N no sistema solo-planta-atmosfera é fundamental. O fertilizante nitrogenado sempre que possível deve ser aplicado na região com maior concentração de raízes. A incorporação deve ser considerada, sempre que possível, principalmente quando a aplicação for de ureia convencional, uma vez que a sua aplicação na superfície pode provocar consideráveis perdas de N por volatilização, dependendo das condições do ambiente (temperatura elevada, solos demasiados secos ou com umidade excessiva) (Cardoso, 2013; Villalba, 2014; Reetz, 2017).

Além da incorporação da ureia, que é dificultada em sistemas conservacionistas de manejo do solo, e/ou sua aplicação com condições favoráveis, a adição de inibidores de urease

podem reduzir significativamente as perdas por volatilização. A utilização de ferramentas de agricultura de precisão também deve ter seu uso considerado, sobretudo em áreas onde há variação de fertilidade, assim pode ser feita a administração para locais específicos da lavoura e a aplicação diferenciada, reduzindo a falta ou o excesso de nutriente e de perdas (Cardoso, 2013; Villalba, 2014; Reetz, 2017).

### 2.3.1 FERTILIZANTES ORGÂNICOS

Os fertilizantes orgânicos são resíduos de origem vegetal, animal e misto, que quando aplicados no solo têm potencial para melhorar as suas propriedades químicas, físicas e biológicas, além de ser fonte de nutrientes (Malavolta e Moraes, 2009). Os resíduos orgânicos são de grande importância para a agricultura e para o meio ambiente, pois além de melhorar a qualidade do solo e fornecer alguns dos nutrientes essenciais para as culturas, também dão uma destinação útil aos dejetos de animais e resíduos sólidos urbanos (Paulus et al., 2000; Reetz, 2017).

Segundo Santos (1991) os corretivos orgânicos são produtos naturais usados para promover o crescimento e a produtividade das culturas, aumentar ou manter os níveis de matéria orgânica no solo, incrementando benefícios como o aumento da atividade microbológica do solo, a retenção de água, a aeração, as propriedades coloidais e de carga negativa, através da fração estável da matéria decomposta, o húmus.

Os resíduos quando dispostos no solo são decompostos pela ação de micro e macrorganismos que vão disponibilizando os nutrientes para as plantas e estabilizando uma fração na forma de húmus. Também podem ser liberados contaminantes, sobretudo metais pesados e patógenos, sendo por isso importante que os resíduos sofram um processo de transformação e/ou estabilização antes de serem utilizados (Santos, 1991). Além de serem uma fonte alternativa de nutrientes aos fertilizantes minerais podem ter um custo mais baixo, embora as fontes sejam por vezes escassas (Eckhardt, 2015).

### 2.3.2 FERTILIZANTES MINERAIS

Os solos usados para agricultura contínua, normalmente, não são suficientemente férteis para satisfazer as necessidades das culturas (Santos, 1991). Com isso, numerosos fertilizantes minerais têm sido desenvolvidos para fornecer os nutrientes exigidos pelos

vegetais. São produtos que tem origem inorgânica, natural ou sintética, disponibilizados na forma de grânulos, pulverulenta ou cristalina e que têm capacidade de fornecer nutrientes às plantas (Malavolta et al., 2002). Em geral, são sais minerais, exceto alguns que utilizam compostos orgânicos como a ureia que é facilmente convertida a  $\text{NH}_4^+$  (Reetz, 2017).

Segundo Reetz (2017) os fertilizantes são classificados normalmente em simples e compostos ou complexos. Os primeiros, são assim chamados, pois focam-se no suprimento de um único nutriente, embora, na realidade forneçam mais que um, como por exemplo o sulfato de amônio, que disponibiliza N e enxofre (S). Os segundos, como o nome já diz, são compostos por dois ou mais nutrientes, normalmente N, P e potássio (K), que são os três macronutrientes mais utilizados na agricultura mundial.

Sendo o N o nutriente mais requerido pelas culturas e sendo um elemento muito dinâmico no solo, que resulta na sua baixa eficiência de uso pelas plantas, a adubação nitrogenada é feita em maior quantidade e frequência que os outros elementos. Dessa forma, o consumo mundial de N supera há muito o consumo de P e K (Nasholm et al., 2009). Em 2017, a União Europeia estimou o consumo de 11,6 milhões de toneladas de fertilizantes nitrogenados, 88% maior que o uso de fertilizantes fosfatados, que foi de 1,3 milhões de toneladas (Eurostat, 2019).

Atualmente é produzida uma gama de fertilizantes nitrogenados, com diferentes formulações, propriedades e usos para os sistemas de produção. No entanto, todos eles iniciam com a amônia anidra que é obtida através do ar e gás natural, sob altas temperatura e pressão, pelo processo Haber-Bosch, que, em sua maioria, são convertidos a  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$  para serem aplicados no solo. Assim, o N amoniacal fica totalmente disponível na solução solo, porém relativamente mais lento, pois suas cargas positivas o adsorvem rapidamente às partículas do solo. Dessa forma, o  $\text{NH}_4^+$  vai sendo liberado e nitrificado gradualmente, ficando menos passível a lixiviação e outras perdas, o que pode ser benéfico para a EUN. Já o N nítrico fica imediatamente disponível na solução do solo e pode ser rapidamente absorvido. Porém é mais suscetível a perdas, sobretudo por lixiviação e desnitrificação (Reetz, 2017).

Isso confere ao N uma grande importância em decorrência do impacto que gera no meio ambiente. Assim, estratégias vêm sendo desenvolvidas para reduzir as perdas e a contaminação das águas, e também para promover uma melhora EUN (Rodrigues e Coutinho, 2000). Algumas das alternativas para melhorar as práticas de manejo de fertilizantes, são reduzir o uso de formas reativas de N no meio ambiente, controlar a dissolução dos fertilizantes nitrogenados, por meio do uso de produtos de baixa solubilidade ou de decomposição gradual.

Ainda podem ser utilizados produtos químicos que combinados com os fertilizantes inibam a nitrificação ou a hidrólise da ureia (Hauck, 1985; Rodrigues e Coutinho, 2000).

### 2.3.3 FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO GRADUAL

Os fertilizantes de liberação lenta ou controlada são aqueles que atrasam a sua disponibilidade para absorção e utilização dos nutrientes pelas plantas, ou que estendem a sua disponibilidade por mais tempo do que os fertilizantes com nutrientes rapidamente disponíveis (Reetz, 2017).

Os fertilizantes de liberação gradual, são aqueles que vão disponibilizando os nutrientes de forma gradual ao longo do ciclo da cultura, buscando sempre estar próximo da solução ideal. E podem ser diferenciados, sumariamente, por fertilizantes de liberação lenta ou de liberação controlada, de acordo com a forma que disponibilizados no mercado. Assim, os produtos de liberação controlada são aqueles que tem os fatores conhecidos que determinam a quantidade, o padrão e a duração da liberação dos nutrientes. Enquanto os fertilizantes de liberação lenta não têm a quantidade, o padrão e a duração da liberação dos nutrientes conhecidas, porém sabe-se que são mais lentas que os fertilizantes normais (Shaviv, 2005; Villalba et al., 2014).

Os fertilizantes de liberação lenta em geral são produtos com solubilidade reduzida e que resultam da condensação da ureia e ureia formaldeído. Uma das formulações mais importantes é decorrente da reação do formaldeído com excesso de ureia, da qual resulta uma mistura de metileno-ureias com polímeros de cadeia longa. As moléculas resultantes tem cadeias de diferentes comprimentos, o que faz com que o padrão e a liberação de N não sejam conhecidos nesse tipo de fertilizante. No entanto, a disponibilização dos nutrientes é mais lenta que os fertilizantes usuais, pois esse composto tem uma parte que é solúvel em água e fica rapidamente disponível e outra parte que é liberada de forma gradual por período mais longo, assim a liberação de N vai aumentando com o tempo (Trenkel, 2010; Villalba et al., 2014). Perante o Comitê Europeu de Normalização, para ser considerado fertilizante de liberação lenta, este deve atender três critérios: no máximo 15% pode ser liberado em 24 horas; não mais que 75% será liberado em 28 dias; e no mínimo 75% terá sido liberado quando atingir o prazo fixado pelo fabricante, sob a temperatura de 25° C (Trenkel, 2010).

Já os fertilizantes de liberação controlada são os fertilizantes usuais, como a ureia, revestidos ou encapsulados com materiais orgânicos ou inorgânicos capazes de controlar a liberação dos nutrientes (Cantarella, 2007). Dessa forma, os nutrientes vão sendo fornecidos

conforme a necessidade da planta e as perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$  são reduzidas, uma vez que a liberação dos nutrientes ocorre, em geral, quando há precipitações, o que favorece a incorporação do fertilizante (Almeida, 2014).

A liberação controlada acontece pela hidrólise lenta dos compostos que fazem o revestimento, e depende de vários fatores como os mecanismos que controlam a hidrossolubilidade do material, a qualidade do revestimento, o tipo de material e o método usado para fazer a confecção do material, entre outros. Fatores como a espessura da resina, presença de microfissuras ou poros, tamanho do grânulo influenciam a durabilidade e intensidade da liberação (Oertli, 1980).

O primeiro fertilizante de liberação controlada produzido em escala comercial resultou da granulação da ureia solúvel comumente utilizada envolvida por um revestimento a base de enxofre para controlar a entrada de água e a dissolução do N, denominado Sulfur Coated Urea (SCU). Atualmente os mais populares são os fertilizantes revestidos com membranas impermeáveis ou semipermeáveis de polímeros (poliuretanos, poliésteres, resinas), com poros finos. Ambos revestimentos têm uma decomposição lenta no solo e podem envolver processos microbiológicos, físicos e químicos (Trenkel, 2007).

De forma geral, o maior conhecimento sobre os padrões e liberação do N oferecido pelos fertilizantes de liberação controlada permite redução nas doses aplicadas e maior eficiência do uso do nutriente, minimizar os impactos ambientais reduzindo as perdas por lixiviação e volatilização e ainda por aumentar a produtividade pois a planta terá o elemento disponível conforme a sua necessidade (Shaviv, 2005; Cantarella et al., 2008)

#### 2.3.4 FERTILIZANTES COM INIBIDORES DA UREASE E INIBIDORES DA NITRIFICAÇÃO

No mercado atual os inibidores da urease e da nitrificação são as duas classes principais de fertilizantes nitrogenados estabilizados. Os fertilizantes estabilizados são aqueles que recebem a adição de estabilizantes, também chamados aditivos, com a capacidade de inibir transformações do N e aumentar o tempo de permanência do N, seja na forma de ureia ou de  $\text{NH}_4^+$  (Trenkel, 2010). A adição desses inibidores tem o intuito de prolongar a permanência do fertilizante nitrogenado na solução do solo, principalmente perto das raízes das plantas, criando melhores condições de absorção pelas culturas e reduzindo as perdas de N do sistema para o meio ambiente (Reetz, 2017).

Os inibidores da urease são aditivos que bloqueiam a atividade da enzima urease, responsável por realizar a hidrólise ou quebra da ureia, transformando-a em  $\text{NH}_4^+$  ou  $\text{NH}_3$  e  $\text{CO}_2$ . Assim, o processo de hidrólise pode ser retardado de 3 a 14 dias, reduzindo a perda de  $\text{NH}_3$  por volatilização (Cantarella, 2007; Trenkel, 2010). Uma ampla gama de compostos ou misturas, com diferentes características foram testados, e muitos patenteados como inibidores de urease (Villalba et al., 2014). Porém, de acordo com Cantarella et al. (2008), NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida) é o inibidor da urease que tem apresentado o melhor resultado na redução da volatilização da  $\text{NH}_3$  dentre todos os produtos.

Têm sido relatados também alguns estudos com metais que são capazes de inibir a atividade da enzima urease, entre eles prata (Ag), mercúrio (Hg), cádmio (Cd), cobre (Cu), manganês (Mn), níquel (Ni) e zinco (Zn) (Reddy e Sharma, 2000; Villalba et al., 2014). Porém, os resultados relatados por Cantarella (2007) não apresentaram redução significativa nas perdas de  $\text{NH}_3$ , além de que a utilização desses metais pode contaminar os solos.

Os inibidores de nitrificação também vêm sendo muito estudados, e apresentam diversos compostos registrados (Soares et al., 2012). Entre os principais estão nitrapiridina [2-cloro-6-(triclorometil) piridina], DCD (dicianodiamida) e DMPP (3,4-dimetil pirazol fosfato) (Villalba et al., 2014). Esses inibidores podem ser eficientes em reduzir a nitrificação, ou seja, bloqueiam a ação das bactérias *Nitrosomonas* na oxidação da  $\text{NH}_3$ . Com isso, podem melhorar a nutrição das plantas e reduzir as perdas por desnitrificação e lixiviação (Cantarella, 2007). Todavia, estudos têm mostrado que o uso dos inibidores de nitrificação pode aumentar as perdas por volatilização, uma vez que prolongam o tempo do  $\text{NH}_4^+$  no solo (Villalba et al., 2014).

A duração do efeito pode se estender por dias ou semanas, dependendo do clima e de fatores do solo que estão relacionados com o processo de nitrificação, como pH, matéria orgânica, aeração, temperatura e atividade biológica podem influenciar na eficiência do inibidor da nitrificação (Barth et al., 2001; Cantarella, 2007).

### 2.3.5 USO DE CONDICIONADORES DE SOLO

Além dos corretivos minerais e orgânicos convencionais, também existem diversos outros corretivos de solo designados condicionadores, que são substâncias capazes de melhorar características específicas do solo e de forma mensurável para determinado uso (GSST, 2008). Em geral, são aplicados com o objetivo de melhorar as propriedades físicas do solo, em especial aquelas que estão relacionadas com a retenção e drenagem da água, ou seja, a estrutura. Embora,

muitas vezes, os condicionadores também promovam melhorias químicas e biológicas ou tenham algum efeito fertilizante (Bernardi et al., 2014; Santos, 2015).

No mercado existem diversos tipos de condicionadores, de variada natureza, que vão desde material orgânico até aos produtos sintéticos, alguns com elevado valor que restringem o seu uso (Santos, 2015). Porém, neste trabalho serão descritos de forma sucinta dois produtos, que foram utilizados na parte experimental deste trabalho, biochar e zeólitos.

#### 2.3.5.1 Biochar

O termo biochar, por vezes chamado de “black carbon” ou traduzido para “biocarvão”, é utilizado para designar um tipo de carvão que permite melhorias nas características biológicas, físicas e químicas do solo (Nóbrega, 2011; Novotny et al., 2015). Pode ser considerado como qualquer produto oriundo de uma biomassa de carbono, processado termicamente através de pirólise, com a finalidade de aplicação no solo (Novotny et al., 2015).

O foco do estudo com o biochar nos últimos anos tem sido pela sua elevada estabilidade, gerando uma grande capacidade para sequestrar carbono, reduzindo emissões para a atmosfera (Nóbrega, 2011). Na agricultura, embora já usado há milhares de anos pelos índios da Amazônia para melhorar a fertilidade do solo, a necessidade e o seu potencial de aumentar os rendimentos agrícolas, através da melhoria das propriedades do solo e da eficácia dos fertilizantes, tem aumentando o interesse e o estudo no uso do biochar (Farrell et al., 2013; Silva et al., 2018).

Para produção deste condicionador diversas fontes de matéria orgânica não contaminada podem ser utilizadas, tal como resíduos de culturas, madeira e estrumes (Nóbrega, 2011). Esse produto carbonado será submetido a um processo conhecido como pirólise, que consiste na decomposição térmica da biomassa a temperaturas que variam de 300 a 600 °C em um ambiente quase ou anaeróbico (Nóbrega, 2011; Zhang et al., 2015).

Como podem ser obtidos através de diversos tipos de biomassa, é provável que além de carbono, o biochar também contenha nutrientes e outros elementos, como cobre (Cu), chumbo (Pb) e arsênio (As). Porém, é possível que estes contaminantes, estejam menos biodisponíveis no solo, devido à maior dificuldade da matéria orgânica pirolisada em ser mineralizada (Farrell et al., 2013). No entanto, por ser um produto muito estável, com tempo de permanência no solo estimado de 2000 anos, a preocupação se dá a longo prazo, e ainda deve ser muito estudada, bem como os benefícios da sua utilização (Farrell et al., 2013).

Estudos realizados por Manyá (2012) mostraram que a utilização de biochar em solos agricultáveis promovem a melhoria da fertilidade e do rendimento das culturas, devido à elevada área de superfície do condicionador, que favorece a capacidade da sorção do solo, o aumento da CTC e do armazenamento de água. O seu uso também está relacionado com o aumento da biomassa microbiana, que conseqüentemente leva ao aumento da mineralização dos restos vegetais e liberação de nutrientes (Santos, 2013). Para Zwieten et al. (2010), devido à CTC do biochar, ocorre uma redução da acidez e da disponibilidade de alumínio no solo, beneficiando o ambiente radicular e com isso a absorção de nutrientes pelas plantas, como por exemplo do N. Nigussie et al. (2012), também observaram aumento dos nutrientes disponíveis, mas além do N, incluíram o P e o K. Amin (2018) também contribuiu com o seu estudo, onde verificou que, com o uso do biochar, o P manteve-se retido no solo mas sendo facilmente disponibilizado para as plantas, com isso ocorre também uma redução nos riscos de impactos ambientais.

#### 2.3.5.2 Zeólitos

O uso de argilominerais como aditivo na fertilização dos solos vem sendo muito estudado como forma de aumentar a disponibilidade e a eficiência de uso de diversos nutrientes. Um dos mais promissores e que está bastante difundido é o uso de zeólitos (Villalba et al., 2014). O seu nome resulta da conjugação das palavras gregas *Zeo* (“ferver”) e *Lithos* (pedra ou rocha), em razão do fenômeno que permitiu a sua descoberta, mineral que quando aquecido libera água (Percarmona, 2003).

Zeólitos são aluminossilicatos hidratados cristalinos de metais alcalinos ou alcalinos-terrosos minerais (Bernardi et al., 2014). Apresentam uma estrutura tridimensional formada por tetraedros de  $AlO_4$  e  $SiO_4$ , que unidos criam um sistema de canais, cavidades e poros com a capacidade de reter cátions grandes e moléculas de água, permitindo a troca iônica e desidratação reversível (Fungaro et al., 2004; Bernardi et al., 2014).

Existem variados tipos de zeólitos, que podem ser de origem natural ou sintética. A primeira pode ser encontrada na natureza, em regiões onde existam rochas vulcânicas com atividade alcalina. Apresentam um processo pouco complexo de produção e com isso custo mais baixo (Izidoro, 2013). Enquanto as segundas são obtidas por meio da produção de soluções aquosas compostas por aluminatos e silicatos e, normalmente, expostas a temperaturas que variam de 25 a 300 °C (Gianetto, 1990). Os zeólitos sintéticos apresentam um custo mais

elevado, porém a vantagem na sua utilização é a uniformidade na forma e tamanho dos canais e por terem composição química conhecida (Resende et al., 2008).

Por apresentar uma gama muito variada de tipos, e ser um material com elevado poder de adsorção e CTC, é ampla a sua utilização. Na agricultura têm uma grande importância, pois os zeólitos podem controlar a retenção e a liberação do íon  $\text{NH}_4^+$  em sua estrutura, reduzindo as perdas por volatilização e lixiviação, aumentando a EUN (Villalba et al., 2014). Também podem ser usadas para aumentar a liberação e a disponibilidade de P da rocha fosfática e para reduzir as perdas de cátions, como o K, por lixiviação (Bernardi et al., 2014).

Outro benefício é referido por Polat e Mehmet (2004), que asseguram que os zeólitos podem atuar como reservatórios de água em períodos secos, pois a elevada porosidade e a sua estrutura permitem que as moléculas de água sejam evaporadas e reabsorvidas sem sofrer danos. Bernardi et al. (2008) e Resende et al. (2008) também atribuíram aos zeólitos efeitos de descontaminação de solo, devido ao seu alto poder de absorção e CTC poder ser utilizado para recuperação de áreas e águas contaminadas, sobretudo com metais pesados ou contaminantes orgânicos, além de reduzir as perdas com a lixiviação de N para os lençóis freáticos.

## 2.4 CULTURAS DE CAPTURA

O manejo do N vem sendo muito estudado por apresentar uma grande importância para o desenvolvimento, produtividade e qualidade das culturas, e devido aos impactos negativos causados no meio ambiente (Rodrigues et al., 2005). Em sistemas de produção vegetal, após a colheita da cultura principal, grandes quantidades de N podem permanecer no solo, ficando suscetível a perdas, especialmente durante as chuvas do inverno europeu (Thorup-Kristensen, 1994). A fim de reduzir as perdas do N, sobretudo as perdas de nitratos por lixiviação, que é a principal forma responsável pela contaminação das águas subterrâneas e eutrofização das águas superficiais, estratégias de manejo vêm sendo testadas e recomendadas (Notaris et al., 2018). Um método que vem apresentando redução deste problema é a utilização de culturas de captura após a safra principal.

As culturas de captura, ou *catch crops*, são plantas com alta capacidade de absorção de N, cultivadas com o propósito de capturar o N remanescente no solo e reduzir a sua concentração na água de percolação do solo (Thorup-Kristensen, 1994; Notaris et al., 2018). O  $\text{NO}_3^-$ , em geral, é a forma mais disponível no solo e mais passível de lixiviação, por apresentar

cargas negativas e elevada mobilidade. Essas plantas têm a capacidade de limitar essas perdas, seja pela absorção direta dos nitratos ou pela utilização do excesso de umidade, evitando a percolação desse íon para a solução do solo até aos lençóis freáticos (Cicek et al., 2015; Notaris et al., 2018).

Segundo Cicek et al. (2015) a escolha de uma boa cultura de captura é determinante para a efetiva captura do N, pois a sua velocidade de estabelecimento, taxa de crescimento, profundidade das raízes e tolerância ao frio definem a sua capacidade de absorção. Além disso, tem de ser uma espécie que ao final do ciclo, a decomposição do seu material leve a mineralização rápida, disponibilizando facilmente o N para a cultura subsequente. Assim, a relação C:N deve ser um fator levado em consideração. Portanto, a *catch crop* ideal deve absorver rapidamente o N disponível e prontamente liberá-lo para a próxima safra, evitando a competição com a cultura, reduzindo as perdas e a necessidade de fertilização (Thorup-Kristensen, 1994; Cicek et al., 2015).

Para isso muitas espécies vêm sendo estudadas, gramíneas como azevém (*Lolium multiflorum*), centeio de inverno (*Secale cereale*) e cevada (*Hordeum vulgare*) têm sido eficazes na recuperação no N do solo, devido ao seu rápido crescimento, mas com a sua relação C:N alta a liberação do N ocorre mais lentamente (Thorup-Kristensen e Dresboll, 2010; Constantin et al., 2012). Algumas brássicas, como rabanete forrageiro (*Raphanus sativus*), também apresentam uma rápida captura do N, mas ainda não está clara a sua contribuição com o suprimento de N na safra seguinte, porém acredita-se que a liberação ocorra rapidamente como resultado de sua menor relação C:N (Thorup-Kristensen et al., 2003). Já as leguminosas, sabe-se que disponibilizam rapidamente o N para a próxima cultura, pois tem uma baixa relação C:N, mas ainda não tem esclarecida a sua capacidade para reduzir a lixiviação de N (Cicek et al., 2015; Valkama et al., 2015).

As culturas de captura têm se mostrado mais eficazes na recuperação dos nutrientes do que outras técnicas de manejo como a redução dos fertilizantes e das técnicas de preparo do solo (Thorup-Kristensen et al., 2003; Constantin et al., 2012). Aronsson e Torstensoon (1998) observaram que as culturas de captura diminuíram até 50% da lixiviação do N em sistemas convencionais. Já Askegaard et al. (2005) encontraram valores de 30% a 38% em sistemas de agricultura orgânica. Estas culturas podem trazer outros benefícios ao solo a longo prazo, como o aumento do teor de matéria orgânica e da produtividade pelo fornecimento de nutrientes no final do seu ciclo (Constantin et al., 2012; Doltra e Olesen, 2013; Notaris et al., 2018).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi instalado na quinta experimental do Instituto Politécnico de Bragança, denominada Quinta do Poulão, localizada na zona rural de Bragança, NE Portugal, com coordenadas 41°46'48.9"N 6°47'54.2"W e altitude de 704 metros (Figura 1). No dia 23 de outubro de 2018 teve início o experimento com a sementeira da cultura da aveia e a condução se estendeu até o dia 07 de maio de 2019, com a colheita da biomassa aérea da planta.

A componente experimental apresentada nesta tese é parte de um trabalho mais amplo que se iniciou com a cultura do milho, inserida na rotação como cultura principal e cultivada de maio a agosto de 2018. A aveia a que se refere este trabalho foi inserida como cultura de captura (*catch crop*) para avaliar o efeito residual da fertilização do milho e o seu potencial para reduzir as perdas de nitratos para os cursos de água e óxidos de azoto para a atmosfera. A aveia, em si, não foi fertilizada.

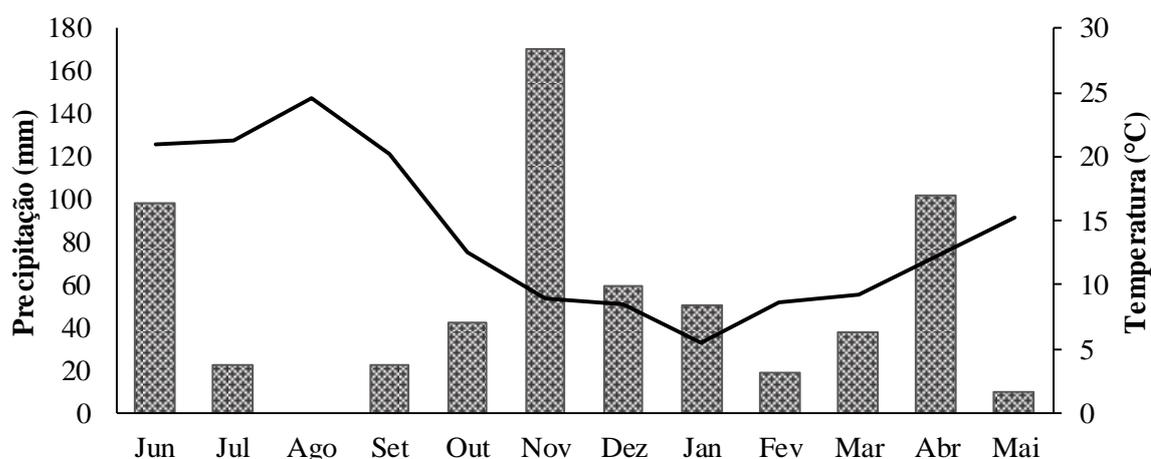


**Figura 1-** Imagem do local de implantação do experimento (GOOGLE, 2019).

Esta região apresenta uma temperatura média anual de 11,7 °C, onde o mês mais quente, agosto de 2018, apresentou temperatura média de 24,5°C. Já no mês mais frio, janeiro de 2019, a temperatura média foi de 5,4 °C. A precipitação média anual entre junho de 2018 e maio de 2019 foi de 632 mm, sendo novembro o mês mais chuvoso com uma precipitação de 170 mm, e agosto o mais seco, sem registro de precipitação. Segundo a classificação de Koppen, Bragança possui clima do tipo Csb (clima temperado com verão seco e suave) (IPMA, 2019). Os registos de precipitação e temperatura médias mensais que se observaram no período em que o experimento decorreu são apresentados na figura 2.

O solo na Quinta do Poulão é classificado como Fluvissoleto éutrico (IUSS Working Group WRB, 2014), de textura franca, compreendendo 54% de areia, 25% de silte e 21% de argila. O local do experimento estava integrado numa rotação octoanual de regadio com quatro

anos de pastagem temporária seguida de quatro anos de milho. O solo para a semeadura do milho foi preparado em maio de 2018 com uma aração e uma gradagem com retirada das pedras maiores do terreno antes da aplicação dos fertilizantes. Os fertilizantes minerais utilizados no milho foram nitrato de amônio (27% N), superfosfato (18% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e cloreto de potássio (60% K<sub>2</sub>O). O nitrogênio é o elemento usado no delineamento experimental (em taxas variáveis), juntamente com condicionadores de solo e fertilizantes de liberação gradual, enquanto o fósforo e o potássio foram usados em todas as parcelas como um plano de fertilização basal.



**Figura 2-** Precipitação e temperatura média do ar mensais da cidade de Bragança entre junho de 2018 e maio de 2019 (ESA - IPB, 2019).

A fertilização mineral de nitrogênio convencional foi efetuada de forma fracionada, isto é, a adubação de base foi feita em maio de 2018 (na semeadura do milho) e consistiu na aplicação de metade da dose do fertilizante mineral em cada um dos talhões fertilizados. A metade restante do fertilizante consistiu na adubação de cobertura e foi aplicada em junho de 2018. O fertilizante orgânico foi aplicado totalmente em fundo, porém um dos talhões recebeu fertilizante mineral em cobertura. Os condicionadores e os fertilizantes de liberação gradual foram totalmente aplicados em fundo em maio imediatamente antes da semeadura.

Após a colheita do milho o solo permaneceu sem vegetação até o dia 23 de outubro de 2018, quando foi realizada a sementeira da aveia branca, cultivar Boa Fé, utilizando 130 kg ha<sup>-1</sup> de semente, que foi lançada e depois incorporada com o escarificador. Não houve adubação de base nem de cobertura, pois o intuito deste trabalho é determinar o quanto a aveia é eficiente na recuperação dos nutrientes que permaneceram no solo após a colheita do milho.

Antes da semeadura da aveia, no dia 23 de outubro de 2018, realizou-se a coleta de amostras de solo, em três repetições por parcela, a uma profundidade de 0-20 cm, para

determinar o teor de nutrientes minerais remanescentes no solo, assim como no dia 07 de maio de 2019, após a colheita da aveia. Estas amostras foram encaminhadas para o laboratório de análises químicas do IPB para determinações analíticas.

A colheita foi realizada quando as plantas já estavam no estágio fenológico espigamento. Utilizou-se um quadro de metal, com dimensão de meio metro quadrado, e cortaram-se as plantas inteiras (parte aérea) rente ao solo. Após a colheita, as amostras foram levadas ao laboratório, onde foram secas em estufa de ventilação forçada a 70 °C para se obter a produção de massa seca e para as determinações analíticas.

### 3.1 DELINEAMENTOS EXPERIMENTAIS E FERTILIZANTES UTILIZADOS

O ensaio com a aveia foi conduzido em dois delineamentos experimentais independentes. Disposto em parcelas de 4x5m, onde para cada combinação de fatores, três repetições foram incluídas. Os ensaios estão detalhados a seguir.

#### 3.1.1 FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO GRADUAL

Um dos experimentos integrou fertilizantes de liberação gradual de nutrientes em comparação com um fertilizante convencional nitrogenado e um corretivo orgânico. Este experimento foi conduzido em delineamento experimental completamente casualizado. Os tratamentos foram constituídos por três fertilizantes comerciais, um estrume de curral e uma testemunha não fertilizada. As designações comerciais dos fertilizantes minerais utilizados são: Nitro 27 (27% N, sendo 50% na forma de  $\text{NH}_4^+$  e 50% na forma de  $\text{NO}_3^-$ ), um fertilizante mineral (nitrato de amônio) aplicado em três doses (50, 100 e 200 kg N  $\text{ha}^{-1}$ ); Exactyon®12-10-18, um fertilizante composto NPK de liberação controlada usado nas doses de 100 e 200 kg N  $\text{ha}^{-1}$ ; e Entec®26, um fertilizante estabilizado com um inibidor da nitrificação, usado também nas doses de 100 e 200 kg N  $\text{ha}^{-1}$ . O corretivo orgânico (estrume de vaca) foi usado em uma dose correspondente à aplicação de 100 kg N  $\text{ha}^{-1}$ , aplicado em dois talhões, sendo que um deles recebeu em cobertura 100 kg  $\text{ha}^{-1}$  de N mineral. Os fertilizantes minerais foram repartidos em duas aplicações (fundo + cobertura) na forma 50 (25 + 25), 100 (50 + 50) e 200 (100 + 100) kg  $\text{ha}^{-1}$ . Assim, foram constituídos dez tratamentos fertilizantes incluindo a testemunha. Cada tratamento foi replicado três vezes, totalizando 30 unidades experimentais (30 parcelas). Na

tabela 1 encontram-se descritos os tratamentos, as doses e a designação abreviada dos fertilizantes utilizados neste ensaio.

**Tabela 1** - Descrição dos tratamentos com os fertilizantes utilizados.

| Fertilizante       | Dose de N,<br>(fundo + cobertura)<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | Tratamento<br>(abreviação) |
|--------------------|---|----------------------------|
| Testemunha         | -   | Test                       |
| Corretivo orgânico | 100 + 0   | Org                        |
| Corretivo orgânico | 100 + 100   | Org 100                    |
| Nitro 27           | 25 + 25   | NA 50                      |
| Nitro 27           | 50 + 50   | NA 100                     |
| Nitro 27           | 100 + 100   | NA 200                     |
| Exactyon®12-10-18  | 100 + 0   | LC 100                     |
| Exactyon®12-10-18  | 200 + 0   | LC 200                     |
| Entec®26           | 100 + 0   | FE 100                     |
| Entec®26           | 200 + 0   | FE 200                     |

Em seguida fornece-se informação suplementar sobre cada um dos fertilizantes.

**Corretivo orgânico** - O corretivo orgânico utilizado no experimento foi um estrume de vaca proveniente da própria exploração, resultando da cama dos animais, em que inclui as fezes e urinas misturadas com camas de palha de cereais e restos de feno. O material foi posteriormente compostado ao ar livre com reviramento periódico. A sua composição é apresentada na tabela 2.

**Tabela 2** - Composição química do corretivo orgânico.

| Macronutrientes                  |      | Micronutrientes                 |        |
|----------------------------------|------|---------------------------------|--------|
| Nitrogênio (g kg <sup>-1</sup> ) | 25,0 | Ferro (mg kg <sup>-1</sup> )    | 9398,0 |
| Fósforo (g kg <sup>-1</sup> )    | 07,2 | Zinco (mg kg <sup>-1</sup> )    | 162,4  |
| Potássio (g kg <sup>-1</sup> )   | 25,5 | Manganês (mg kg <sup>-1</sup> ) | 423,3  |
| Cálcio (g kg <sup>-1</sup> )     | 10,3 | Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )    | 45,0   |
| Magnésio (g kg <sup>-1</sup> )   | 1,73 | Boro (mg kg <sup>-1</sup> )     | 50,6   |
| Razão C/N                        | 12,7 |                                 |        |

Nitro 27 (nitrato de amônio 27% N) - É um fertilizante nitrogenado, composto por nitrato de amônio (50% N nítrico e 50% de N amoniacal) e diluído com calcário (4% MgO). É um fertilizante granulado que garante um fornecimento de nitrogênio imediato às culturas devido à sua elevada solubilidade em água. A combinação de nitrogênio amoniacal e de nitrogênio nítrico faz deste produto um fertilizante de utilização universal. A excelente

granulação e o tratamento especial de superfície dos grãos garantem uma estabilidade ótima de armazenamento e excelentes características de espalhamento.

Exactyon 12-10-18 (fertilizante de liberação controlada) - Exactyon faz parte de uma gama de fertilizantes de liberação controlada de longa duração (6 meses), indicado para a fertilização de fundo. Apresentando grânulos revestidos com uma cápsula de polímero orgânico, extremamente segura e resistente, combina distintas espessuras no revestimento para que estes sejam disponibilizados à planta de forma escalonada ao longo do tempo. Assim, grande parte do fósforo e também uma parte do potássio irão ser disponibilizados nos primeiros meses após a plantação, para um excelente enraizamento das plantas e para um arranque ótimo. O nitrogênio irá sendo disponibilizado de uma forma contínua ao longo dos seis meses de duração do fertilizante.

Entec 26 (fertilizante estabilizado por um inibidor da nitrificação) - É um fertilizante nitrogenado granulado composto por 26% de nitrogênio (7,8% nitrogênio nítrico + 18,5% de nitrogênio amoniacal) e 32,5% de SO<sub>3</sub>. O fertilizante incorpora como inibidor da nitrificação a molécula 3,4-dimetil-1H-pirazolfosfato (DMPP). Os fertilizantes com inibidor de nitrificação retardam a conversão de amônia em nitratos.

Testemunha - A testemunha consistiu em um tratamento sem adição de nenhum produto fertilizante, mantendo as características originais do solo para futura comparação com os outros tratamentos utilizados e para calcular índices de eficiência de uso do nitrogênio.

### 3.1.2 CONDICIONADORES DE SOLO

O segundo ensaio foi organizado em um fatorial completo com condicionadores de solo, fertilizante mineral e doses de nitrogênio. O fator condicionadores de solo incluiu três níveis, dois condicionadores, designadamente Biochar, Zeólitos e um Fertilizante Nitrogenado Mineral. O fator doses de nitrogênio incluiu quatro níveis de fator, com quatro doses aplicadas metade em fundo e metade em cobertura na forma 0 (0 + 0), 50 (25 + 25), 100 (50 + 50) e 200 (100 + 100) kg N ha<sup>-1</sup> do fertilizante Nitro 27. O biochar utilizado é comercialmente denominado por Ecochar, sendo proveniente de biomassa de lenha de poda de acácia, e foi aplicado em uma taxa correspondente à aplicação de 10 t ha<sup>-1</sup>. Os zeólitos, conhecidos no mercado por Fertcel, são um mineral 100% natural do tipo aluminossilicato hidratado, sendo utilizado uma taxa correspondente a 5 t ha<sup>-1</sup>. Este experimento incluiu 36 unidades experimentais resultantes de três condicionadores, quatro doses de nitrogênio e três repetições.

Na tabela 3 encontram-se descritos os tratamentos e as doses juntamente com a quantidade de fertilizante aplicada na base e em cobertura no experimento.

**Tabela 3** - Descrição dos tratamentos realizados no ensaio 2.

| Fertilizante | Dose de N,<br>(fundo + cobertura)<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | Tratamento<br>(abreviação) |
|--------------|---|----------------------------|
| Nitro 27     | 0 + 0   | Mineral N0                 |
| Nitro 27     | 25 + 25   | Mineral N50                |
| Nitro 27     | 50 + 50   | Mineral N100               |
| Nitro 27     | 100 + 100   | MineralN200                |
| Biochar      | 0 + 0   | Biochar N0                 |
| Biochar      | 25 + 25   | Biochar N50                |
| Biochar      | 50 + 50   | Biochar N100               |
| Biochar      | 100 + 100   | Biochar N200               |
| Zeólitos     | 0 + 0   | Zeólitos N0                |
| Zeólitos     | 25 + 25   | Zeólitos N50               |
| Zeólitos     | 50 + 50   | Zeólitos N100              |
| Zeólitos     | 100 + 100   | Zeólitos N200              |

As informações complementares sobre a testemunha e o fertilizante Nitro 27 (nitrato de amônio 27% N), já foram descritas no item anterior. Na tabela 4 estão destacadas as principais características dos condicionadores de solo utilizados.

**Tabela 4** - Principais características dos condicionadores de solo utilizados neste estudo.

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

<sup>1</sup>Densidade Aparente, <sup>3</sup> Carbono Orgânico Total, <sup>2</sup> Teor Micológico Total.

## 3.2 DETERMINAÇÕES EM CAMPO

### 3.2.1 VALORES DE CLOROFILA-SPAD

A intensidade da cor verde das folhas da aveia foi determinada com o objetivo de avaliar o seu estado nutricional em nitrogênio, usando um aparelho portátil SPAD (Soil Plant Analysis Development). O medidor portátil SPAD-502 estima o teor de clorofila nos tecidos foliares medindo a transmitância de luz através da folha nos comprimentos de onda de 650 nm (luz vermelha, absorvida pela clorofila) e 940 nm (luz infravermelha, sem absorção de clorofila). O medidor fornece um valor adimensional proporcional ao teor de clorofila da folha (Minolta Camera Co. Ltd., 2009).

A medição em campo foi realizada no dia 18 de março de 2019, quando a cultura estava no estágio fenológico ‘primeiro nó detectável’, utilizando as folhas da parte média das plantas. Efetuaram-se 10 leituras em cada uma das três repetições.

### 3.2.2 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI

Determinou-se o índice de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que é um índice da condição geral da vegetação no campo, usando o aparelho Fieldscout CM1000. O aparelho lê comprimentos de onda de 660 nm e 840 nm, emite um feixe de luz sobre a folha e fornece um índice de vegetação NDVI. O valor do NDVI (-1 a 1) é calculado a partir da área medida por comparação entre a luz refletida nos dois comprimentos de onda, de acordo com a expressão  $[(\% \text{Infravermelho próximo} - \% \text{Vermelho}) / (\% \text{Infravermelho próximo} + \% \text{Vermelho})]$ . Valores  $> 0$  representam vegetação e valores  $< 0$  são outros objetos (Gitelson et al., 1996).

As medições foram realizadas no dia 18 de março de 2019, quando a cultura já estava no estágio fenológico primeiro nó detectável. As leituras foram feitas pressionando um gatilho, que ativa os lasers de segmentação, fazendo a mensuração e calculando os valores. As leituras foram tiradas à distância de cerca de 80 cm, apontando ao coberto em diferentes pontos, com cerca de 10 leituras por repetição.

### 3.2.3 AMOSTRAGEM DE SOLO

Em ambos experimentos foram coletadas amostras de solo com profundidade de 0 a 20 cm em duas datas. No dia 23 de outubro de 2018 logo imediatamente antes da semeadura da aveia e no dia 07 de maio de 2019 após a colheita das plantas. Posteriormente as amostras foram levadas ao laboratório de solos e mantidas em um congelador até as análises se realizarem.

### 3.2.4 AMOSTRAGEM DE PLANTAS

A coleta de plantas foi realizada no dia 07 de maio de 2019, quando a aveia se encontrava no estágio fenológico espigamento. Utilizou-se um quadro de metal, com dimensão de meio metro quadrado, e cortaram-se as plantas inteiras (parte aérea) rente ao solo. Após a colheita, as amostras foram levadas ao laboratório, onde foram secas em estufa de ventilação forçada a 70 °C para retirar a umidade e posteriormente fazer as determinações analíticas.

## 3.3 ANÁLISES LABORATORIAIS

### 3.3.1 ANÁLISES DE SOLO

No início do processo analítico as amostras de solos foram crivadas em malha de 2 mm, e divididas em subamostras, sendo uma parte destas amostras utilizada a fresco e a outra parte seca em estufa a 40 °C, conforme o determinado para cada procedimento.

Em seguida descrevem-se os procedimentos analíticos nas amostras de solo.

#### 3.3.1.1 Nitrogênio facilmente mineralizável

Como indicador de nitrogênio facilmente mineralizável foi efetuada a extração de nitrogênio mineral com uma solução de KCl a quente e a frio. A uma amostra de 10 g de solo foram adicionados 40 mL de KCl 2M. Os recipientes com a mistura solo/KCl foram colocados numa estufa a 100 °C durante 4 horas. Após arrefecer filtrou-se a suspensão com papel Watman 42, na qual se determinou a concentração dos íons  $\text{NH}_4^+$ . Em paralelo procedeu-se da mesma forma sem introduzir as amostras em estufa e após filtração procedeu-se à determinação da concentração de íons  $\text{NH}_4^+$  no extrato frio. O potencial de  $\text{NH}_4^+$  liberado por mineralização, ou a quantidade de nitrogênio amoniacal hidrolisável, encontrou-se pela diferença entre  $\text{NH}_4^+$  extraído a quente e o extraído a frio (Rodrigues, 2000). A concentração de íons  $\text{N-NH}_4^+$

determinou-se pelo método do fenato que tem como princípio a formação de um composto de cor azul, indofenol, pela reação da amônia, hipoclorito e fenol, catalisado pelo nitroprussido de sódio (Clescerl et al., 1998).

#### 3.3.1.2 Determinação de nitrato

Foi pesada uma amostra de 10 g à qual se adicionou 40 mL de KCl 2 M sendo a mistura agitada durante 30 minutos para extração do íon nitrato. Ao fim do tempo de agitação, a suspensão foi filtrada com papel Watman 42 e a concentração em nitratos foi efetuada por espectrofotometria UV/VIS nos comprimentos de onda 220 e 275 nm. A leitura neste último comprimento de onda tem como objetivo eliminar as interferências de compostos orgânicos dissolvidos no extrato (Clescerl et al., 1998).

### 3.3.2 ANÁLISES DE PLANTAS

As amostras de tecidos vegetais das plantas inteiras foram recebidas em laboratório, secas em estufa com ventilação forçada, regulada a 70°C. Após desidratadas e pesadas, foram retiradas subamostras e moídas em moinho com malha de 1 mm, para posteriormente proceder-se à determinação da composição elementar dos tecidos.

Em seguida descrevem-se os procedimentos analíticos nas amostras de planta.

#### 3.3.2.1 Produtividade

Para avaliar a produtividade da cultura da aveia foi coletada uma quantidade representativa de 0,5 m<sup>2</sup> de plantas, com três repetições por tratamento, quando as plantas estavam no estágio fenológico espigamento. Após a colheita, as amostras foram levadas ao laboratório, onde foram secas em estufa de ventilação forçada a 70 °C para retirar a umidade e obter o peso seco da amostra e para calcular a produção total de biomassa por cada parcela e expressa por kg de matéria seca por ha.

#### 3.3.2.2 Quantificação de nitrogênio

A quantificação do nitrogênio total nos tecidos vegetais foi feita pelo procedimento Kjeldahl, o qual envolve dois passos: o primeiro consiste na conversão do N orgânico em N amoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) por meio de digestão sulfúrica. O segundo passo consiste na quantificação do íon amônio por titulação. Para a realização desta análise, transferiu-se 1 g das amostras de

tecidos para tubos de digestão, onde se adicionaram 15 ml de ácido sulfúrico concentrado e duas pastilhas de um catalisador de selênio. Em seguida, as amostras foram posicionadas em um bloco em alumínio para ocorrer a digestão, a uma temperatura de 400 °C por 70 minutos. Após a digestão e o período de arrefecimento, os tubos foram encaminhados para o equipamento Kjeltac TM 8400 Autoanalyser FOSS. O íon  $\text{NH}_4^+$  é determinado durante a destilação do digerido após adição de NaOH por titulação com ácido clorídrico numa solução receptora de ácido bórico (Bremner, 1996).

### 3.3.2.3 Quantificação de boro

Pesou-se 1,0 g das amostras de plantas já moídas, que foram transferidas para cadinhos de porcelana onde se adicionou 0,10 g de óxido de cálcio que foi macerado até a obtenção uma amostra 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 absorvância das amostras em espectrofotômetro com comprimento de onda 420 nm (Walinga et al., 1989; Jones, 2001).

### 3.3.2.4 Quantificação dos outros nutrientes

Na determinação de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco nos tecidos foi digerida uma amostra de 0,25 g de matéria seca com 10 mL de ácido nítrico em um digestor por micro-ondas MARS, CEM corporation. O fósforo foi determinado por colorimetria com o método de molibdato de amônio azul com ácido ascórbico com agente redutor (Walinga et al., 1989) e espectrofotômetro GENESYS com comprimento de onda de 882 nm. O potássio por espectrofotometria de emissão de chama, num equipamento UNICAM PU 9100X. Os restantes nutrientes foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica.

## 3.4 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 ( $\alpha < 0,05$ ), as médias foram separadas pelo teste de comparação múltipla de médias Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). As tabelas e gráficos foram elaborados no programa Excel.

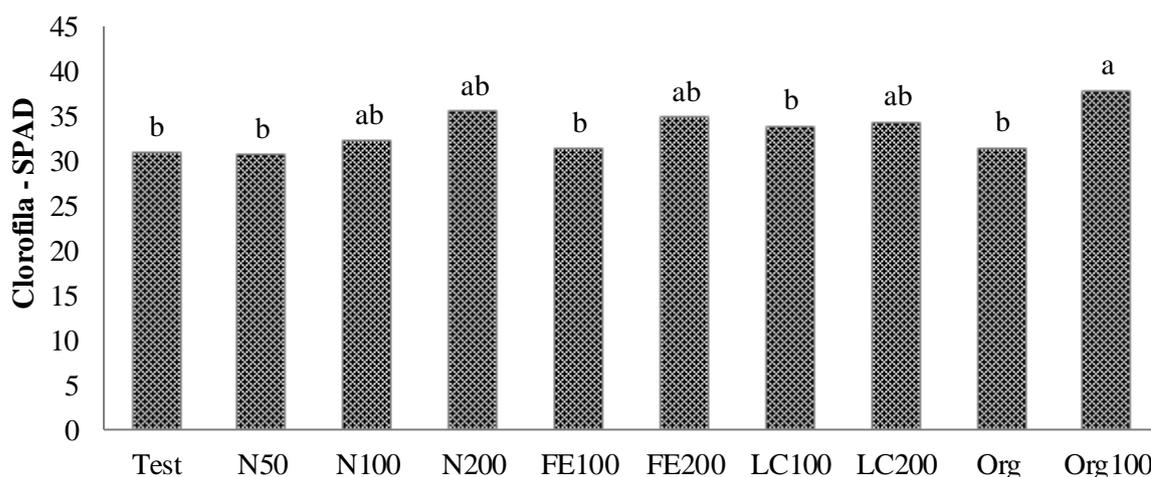
## 4. RESULTADOS

Neste capítulo serão expostos os resultados dos parâmetros avaliados tanto em campo, quando em laboratório, de solo e de aveia. Serão organizados separadamente em cada um dos experimentos.

### 4.1 FERTILIZAÇÃO NITROGENADA

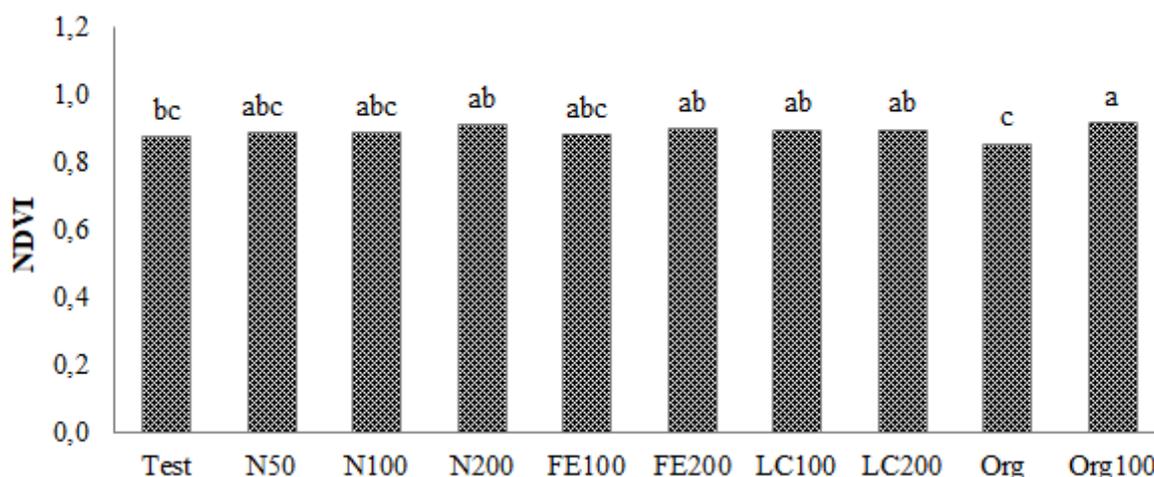
#### 4.1.1 INDICADORES DE ESTADO NUTRICIONAL DAS PLANTAS E PRODUÇÃO DE BIOMASSA.

A figura 3 apresenta os valores obtidos de leituras nas folhas da aveia com o aparelho SPAD 502, que avalia a intensidade da cor verde das plantas e com isso fornece uma estimativa do teor de clorofila. As leituras indicam que com o aumento da dose de N, houve uma tendência ao aumento do teor de clorofila. Os menores valores foram obtidos na testemunha e na dose 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, que foram de 30,9 e 30,6, respectivamente, embora não tenham diferido estatisticamente dos tratamentos FE100, LC100 e Org. O tratamento Org100 apresentou o maior valor, que foi de 37,8. As plantas que receberam maior dose de N, correspondente aos tratamentos N200, FE200, LC200 ficaram com valores intermediários, que variaram de 34,3 a 35,5, porém não apresentaram diferenças significativas com os menores e o maior valor.



**Figura 3** - Valores da leitura SPAD nas folhas da aveia no estágio de primeiro nó detectável (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

A figura 4 apresenta os valores do índice de vegetação NDVI na cultura da aveia em função das diferentes doses de N e tipos de fertilizantes no estado fenológico ‘primeiro nó detectável’. Semelhante às leituras de clorofila, o tratamento Ogr100 registou o maior valor (0,92), enquanto Org exibiu o menor valor (0,86) não diferindo estatisticamente da Test (0,88). Os demais tratamentos não demonstraram diferença significativa entre si e entre o maior e o menor valor, com leituras que variam de 0,88 a 0,91.

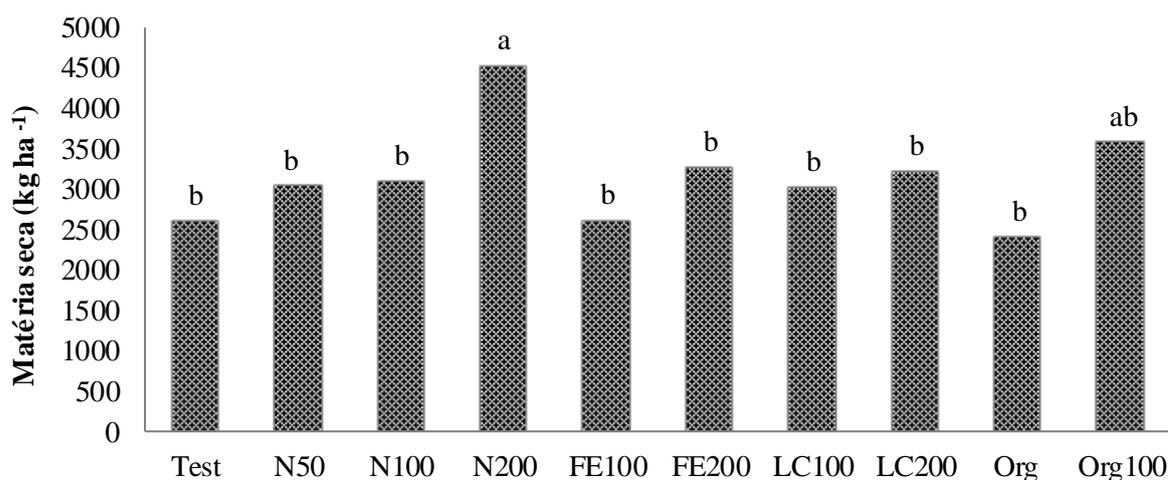


**Figura 4** - Valores do índice de vegetação NDVI nas folhas da aveia no estágio de primeiro nó detectável (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

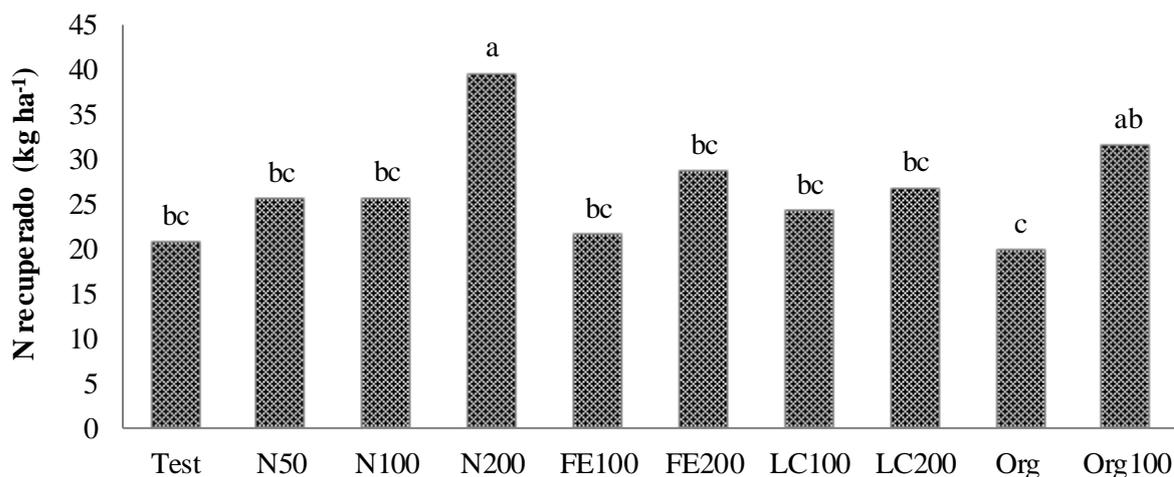
A figura 5 mostra os valores de produtividade encontrados na cultura da aveia. É possível observar efeito significativo do tratamento com N mineral na maior dose (N200), que resultou também na maior produção de biomassa, em média 4527 kg ha<sup>-1</sup> de matéria seca. O tratamento Org100, foi o que apresentou o segundo maior valor de massa seca, com 3572 kg ha<sup>-1</sup>, e não diferiu significativamente do maior e nem das menores produtividades. As menores médias encontram-se na Test e no tratamento Org com, respectivamente, 2595 e 2409 kg ha<sup>-1</sup> de matéria seca, porém estatisticamente foram iguais aos tratamentos N50, N100, FE100, FE200, LC100 e LC200, com produtividades que variaram de 2608 a 3261 kg ha<sup>-1</sup>.

A figura 6 mostra a quantidade de N recuperada pela cultura da aveia na colheita, avaliada através da concentração de N nos tecidos e da produtividade. É possível observar que nas maiores doses de N a recuperação foi superior, no entanto não ocorreram diferenças significativas dentro do mesmo tipo de fertilizantes com o aumento da dose de N.

O tratamento que mais se destacou foi o N200 com 39,6 kg N ha<sup>-1</sup> recuperado, que não foi significativamente diferente da segunda maior recuperação, que ocorreu no tratamento Org100 e foi de 31,6 kg N ha<sup>-1</sup>. Em oposição, o tratamento Org foi o que resultou na menor quantidade de N recuperado com 20,0 kg N ha<sup>-1</sup>. Os demais tratamentos exportaram valores intermediários de 20,6 a 28,7 kg N ha<sup>-1</sup> e não apresentaram diferença significativa com o tratamento Org.



**Figura 5** - Produtividade da aveia em matéria seca (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).



**Figura 6** - Teor de N recuperado na matéria seca (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Relativamente à concentração de N nos tecidos das plantas de aveia, a tabela 5 mostra que não ocorreu diferença significativa entre tratamentos e doses testadas, tendo os valores variado de 8,0 a 8,9 g kg<sup>-1</sup>. O mesmo aconteceu com Ca e Mg que não apresentaram diferenças significativas na concentração nas plantas. Já para o P, o tratamento N200 foi o teve maior concentração, 2,2 g kg<sup>-1</sup>, mas que não diferiu significativamente dos demais tratamentos e doses de N, exceto do LC100 que apresentou a menor percentagem de P com 1,8 g kg<sup>-1</sup>. No entanto, a concentração de K nas plantas de aveia apresentou o maior valor no tratamento Org100 com 16,1 g kg<sup>-1</sup> e o menor valor no tratamento LC100 com 10,4 g kg<sup>-1</sup>. Os demais tratamentos apresentaram médias que variaram de 10,8 a 14,1 g kg<sup>-1</sup> e mostraram alguma semelhança entre si, com o maior e/ou com o menor valor.

**Tabela 5** - Concentração de macronutrientes na matéria seca das plantas de aveia (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

| Tratamento | Nitrogênio         |   | Fósforo |    | Potássio |     | Cálcio | Magnésio |
|------------|--------------------|---|---------|----|----------|-----|--------|----------|
|            | g kg <sup>-1</sup> |   |         |    |          |     |        |          |
| Test       | 8,1                | a | 2,0     | ab | 11,3     | bc  | 0,9    | a        |
| N50        | 8,5                | a | 2,1     | ab | 13,2     | abc | 1,0    | a        |
| N100       | 8,3                | a | 1,9     | ab | 10,8     | bc  | 1,1    | a        |
| N200       | 8,7                | a | 2,2     | a  | 12,4     | bc  | 1,2    | a        |
| FE100      | 8,4                | a | 2,1     | ab | 13,1     | abc | 1,1    | a        |
| FE200      | 8,8                | a | 1,9     | ab | 14,1     | ab  | 1,0    | a        |
| LC100      | 8,0                | a | 1,8     | b  | 10,4     | c   | 1,0    | a        |
| LC200      | 8,3                | a | 1,8     | ab | 12,4     | bc  | 1,0    | a        |
| Org        | 8,3                | a | 2,1     | ab | 13,7     | abc | 0,8    | a        |
| Org100     | 8,9                | a | 2,2     | ab | 16,1     | a   | 1,0    | a        |

A tabela 6 apresenta a concentração dos micronutrientes na matéria seca das plantas de aveia. Quando se observou a concentração de B, encontraram-se diferenças significativas entre os tratamentos e doses de N, sendo o LC200 e o LC100 que apresentaram os maiores valores, 8,8 mg kg<sup>-1</sup> e 8,6 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, sendo o tratamento com o menor teor de B, o N100 com 3,0 mg kg<sup>-1</sup>. A concentração de Fe foi maior na testemunha com 90,8 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto os tratamentos Org e FE200 apresentaram os menores teores com 43,5 e 45,3 mg Fe kg<sup>-1</sup>. Os valores intermediários registrados nos outros tratamentos variam de 54,7 a 84,1 mg Fe kg<sup>-1</sup>.

Para o Mn, o maior valor registrado foi de 118,2 mg kg<sup>-1</sup> e foi encontrado em N200, que apresenta semelhança estatística com o FE100 e o FE200 (105,9 e 108,8 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente). O menor valor, de 65,4 mg Mn kg<sup>-1</sup>, foi registrado em Org100 e este não

diferiu significativamente de N50, N100, LC100, LC200 e Org que variam de 69,8 a 82,6 mg Mn kg<sup>-1</sup>. A testemunha apresentou uma concentração intermediária de 88,6 mg Mn kg<sup>-1</sup>. A concentração de Zn, tal como a do Fe, teve o valor mais elevado de 30,3 mg kg<sup>-1</sup> na testemunha, embora sem diferença estatística com o segundo maior valor de 26,4 mg kg<sup>-1</sup> registrado no tratamento FE100. O menor valor, 5,9 mg Zn kg<sup>-1</sup>, foi encontrado no tratamento N100 e não apresentou diferença significativa para N50, FE200 e LC100. A concentração de Cu não mostrou diferença significativa entre tratamentos e as médias variaram de 5,9 a 7,0 mg kg<sup>-1</sup>.

**Tabela 6** - Concentração de micronutrientes na matéria seca das plantas de aveia (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

| Tratamento | Boro |     | Ferro |     | Manganês            |    | Zinco |    | Cobre |   |
|------------|------|-----|-------|-----|---------------------|----|-------|----|-------|---|
|            |      |     |       |     | mg kg <sup>-1</sup> |    |       |    |       |   |
| Test       | 4,1  | def | 90,8  | a   | 88,6                | bc | 30,3  | a  | 6,9   | a |
| N50        | 3,3  | ef  | 64,7  | bcd | 71,3                | cd | 17,9  | c  | 6,9   | a |
| N100       | 3,0  | f   | 59,3  | cd  | 80,6                | cd | 15,1  | c  | 5,9   | a |
| N200       | 5,9  | cde | 84,1  | ab  | 118,2               | a  | 18,1  | bc | 6,5   | a |
| FE100      | 4,4  | def | 63,1  | bcd | 105,9               | ab | 26,4  | ab | 6,9   | a |
| FE200      | 3,7  | def | 45,3  | d   | 108,8               | ab | 16,6  | c  | 6,5   | a |
| LC100      | 8,6  | ab  | 68,8  | abc | 81,7                | cd | 16,9  | c  | 6,8   | a |
| LC200      | 8,8  | a   | 67,6  | bc  | 69,8                | cd | 19,3  | bc | 7,0   | a |
| Org        | 8,1  | abc | 43,5  | d   | 82,6                | cd | 18,3  | bc | 7,3   | a |
| Org100     | 6,1  | bcd | 54,7  | cd  | 65,4                | d  | 21,2  | bc | 7,5   | a |

#### 4.1.2 NITROGÊNIO MINERAL NO SOLO

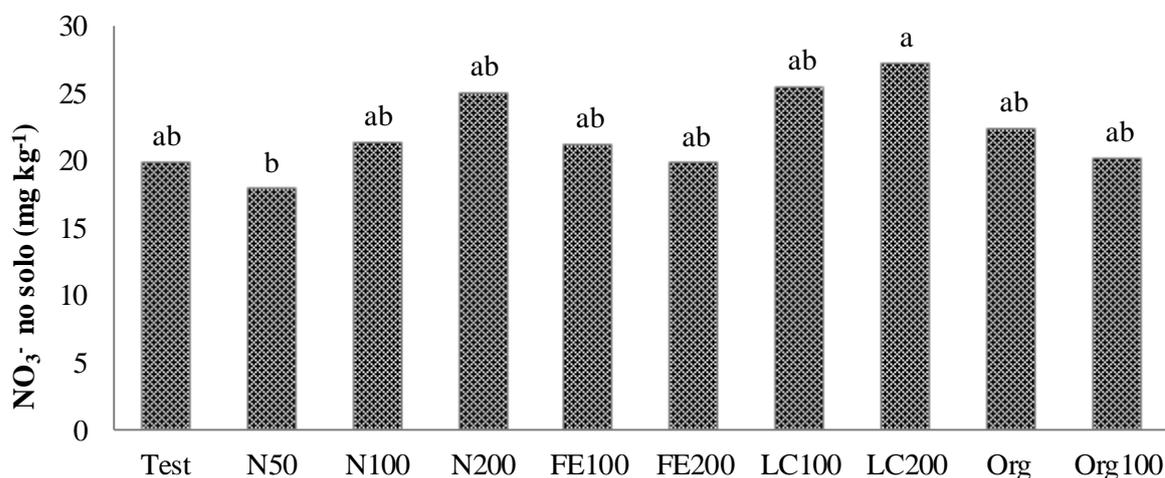
A tabela 7 mostra os valores de N facilmente mineralizável analisados no solo coletado em maio, na colheita da aveia, e é apresentado por meio de três índices, designadamente NH<sub>4</sub><sup>+</sup> com dois métodos de extração, KCl a quente e a frio, e a diferença entre os dois, que é denominada NH<sub>4</sub><sup>+</sup> hidrolisável.

Os valores de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> extraídos a frio ficaram entre 1,15 e 2,92 mg kg<sup>-1</sup> e não mostraram diferença significativa entre tratamentos. Já para a extração a quente de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, os tratamentos Ogr100 e LC100, apresentaram as maiores médias, 17,81 e 17,75 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, mas não mostraram diferença estatística com os demais tratamentos, exceto com o FE100, que apresentou o menor valor, 12,25 mg kg<sup>-1</sup>. Dessa forma, quando estudado os valores de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> hidrolisável, percebe-se que os tratamentos Test, N50, N100, N200, FE100, LC100, LC200 e Org apresentaram médias intermediárias que variaram de 11,94 e 14,83 mg kg<sup>-1</sup>, e ficaram entre o maior valor de 15,57 mg kg<sup>-1</sup> com Org100 e o menor de 10,14 com o tratamento FE100.

**Tabela 7** - Concentração de  $\text{NH}_4^+$  no solo na colheita da aveia (maio de 2019) obtido por extração com KCl a frio e a quente e de  $\text{NH}_4^+$  hidrolisável, obtido por subtração da determinação a quente e a frio (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200  $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

| Tratamento | $\text{mg kg}^{-1}$  |                        |                              |
|------------|----------------------|------------------------|------------------------------|
|            | $\text{NH}_4^+$ frio | $\text{NH}_4^+$ quente | $\text{NH}_4^+$ hidrolisável |
| Test       | 1,80 a               | 14,83 ab               | 13,02 ab                     |
| N50        | 1,55 a               | 14,80 ab               | 13,25 ab                     |
| N100       | 1,15 a               | 15,64 ab               | 14,49 ab                     |
| N200       | 1,38 a               | 15,36 ab               | 13,98 ab                     |
| FE100      | 2,11 a               | 12,25 b                | 10,14 b                      |
| FE200      | 2,13 a               | 14,80 ab               | 12,67 ab                     |
| LC100      | 2,92 a               | 17,75 a                | 14,83 ab                     |
| LC200      | 2,64 a               | 14,59 ab               | 11,94 ab                     |
| Org        | 2,30 a               | 15,67 ab               | 13,37 ab                     |
| Org100     | 2,24 a               | 17,81 a                | 15,57 a                      |

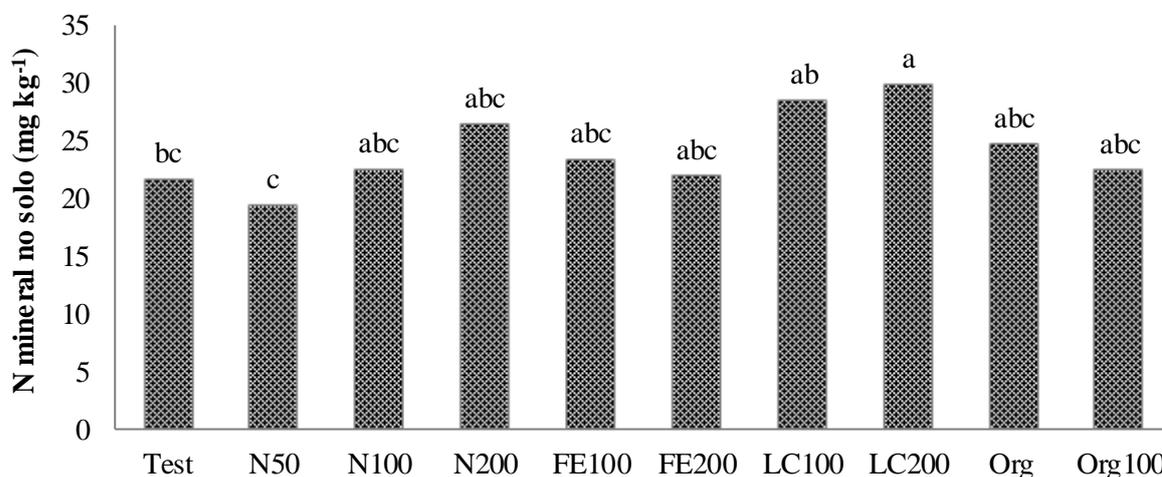
A figura 7 apresenta a concentração de nitratos no solo ao fim da colheita da aveia, sendo possível observar que o tratamento LC200 originou maior teor de  $\text{NO}_3^-$ , com uma média de 27,23  $\text{mg kg}^{-1}$ , diferindo significativamente do tratamento N50 que apresenta o menor resultado com 17,89  $\text{mg kg}^{-1}$ . Os restantes tratamentos não diferiram estatisticamente entre si, e individualmente também não diferiram de LC200 e o N50, com médias que variaram de 19,82 a 25,54  $\text{mg kg}^{-1}$ .



**Figura 7** - Teor de  $\text{NO}_3^-$  no solo na cultura da aveia em maio de 2019 (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200  $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

A figura 8 mostra a concentração de N mineral no momento no corte da aveia. Influenciado pelos resultados do teor de nitratos no solo (figura 7), o tratamento N50 foi o que apresentou a mais baixa concentração de N, com 19,44  $\text{mg kg}^{-1}$ , seguido da testemunha com

21,72 mg kg<sup>-1</sup>, assim como o maior resultado foi encontrado no LC200 com 29,87 mg kg<sup>-1</sup> seguido do LC100 com 28,46 mg kg<sup>-1</sup>. Os restantes tratamentos não apresentaram diferenças estatísticas entre si, com médias que variam de 21,95 a 26,45 mg kg<sup>-1</sup>.



**Figura 8** - Teor de N mineral no solo na cultura da aveia em maio de 2019 (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

A tabela 8 mostra os valores de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> analisados sob extração com KCl a frio, a quente e a diferença entre a extração a quente e a frio, no fim do verão após a colheita do milho e antes das chuvas de inverno e da implantação da aveia (em outubro de 2018). Relativamente aos valores de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> encontrados na extração a frio, o tratamento FE200 apresentou o maior valor (9,16 mg kg<sup>-1</sup>), embora sem diferenças significativas com os tratamentos N200 e LC 200 (7,76 e 5,68 mg kg<sup>-1</sup>). Assim, genericamente, pode-se dizer que a adubação com as maiores doses de N se refletiu no maior teor de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> residual. Em oposição, Test, LC100 e Org apresentaram os menores valores (1,47, 1,49 e 1,66 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente).

Para os valores de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> na extração a quente, o resultado mais elevado, 39,65 mg kg<sup>-1</sup>, corresponde ao tratamento FE200, enquanto as menores concentrações com diferenças significativas são referentes aos tratamentos Test, N50, N100, Org e Org 100, que variaram de 25,71 a 28,21 mg kg<sup>-1</sup>. Os demais tratamentos apresentaram valores intermediários. Quando estudado o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> hidrolisável foi possível observar que o menor valor (22,73 mg kg<sup>-1</sup>) foi registado no tratamento N100, assim como os maiores resultados (30,67 e 31,01 mg kg<sup>-1</sup>) foram encontrados para LC100 e FE100, respectivamente. Sem diferenças estatísticas relativamente a

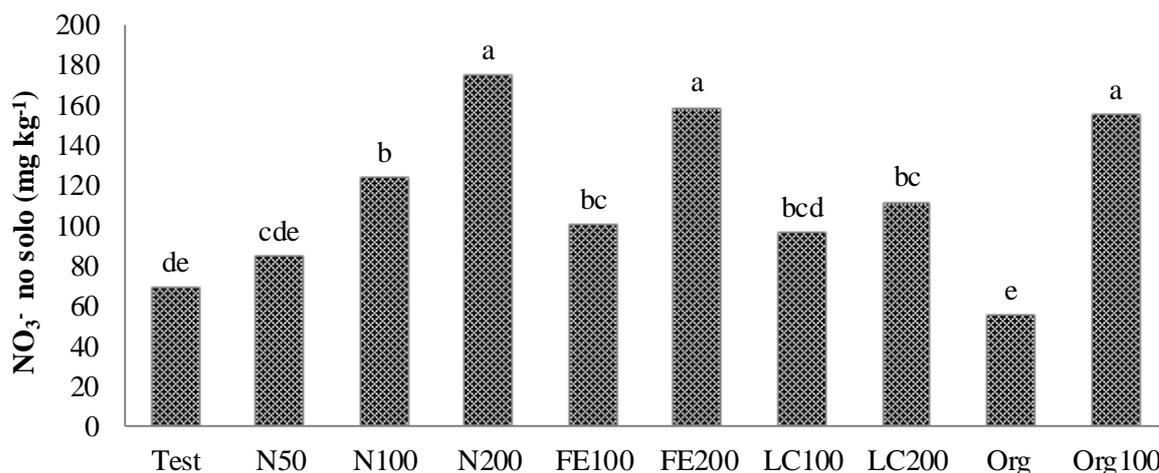
estes estiveram Test, N50, N200, FE200, LC200, Org e Org100, com médias que variaram de 23,73 a 26,34 mg kg<sup>-1</sup>.

**Tabela 8** - Concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo coletado em outubro de 2018, na sementeira da aveia, em extração com KCl a frio e a quente, e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> hidrolisável obtido por diferença do procedimento a quente e a frio (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

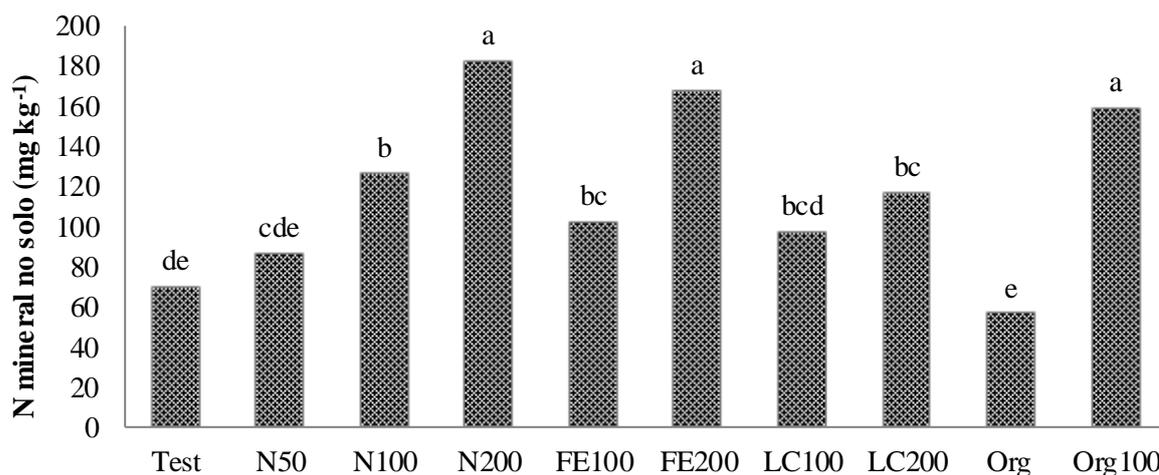
| Tratamento | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> frio |     | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> quente |    | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> hidrolisável |    |
|------------|-----------------------------------|-----|-------------------------------------|----|---|----|
|            | mg kg <sup>-1</sup>               |     |                                     |    |   |    |
| Test       | 1,47                              | d   | 26,17                               | b  | 24,70                                     | ab |
| N50        | 2,50                              | cd  | 27,69                               | b  | 25,20                                     | ab |
| N100       | 2,98                              | cd  | 25,71                               | b  | 22,73                                     | b  |
| N200       | 7,76                              | ab  | 31,84                               | ab | 24,08                                     | ab |
| FE100      | 2,09                              | cd  | 33,12                               | ab | 31,03                                     | a  |
| FE200      | 9,16                              | a   | 39,65                               | a  | 30,50                                     | ab |
| LC100      | 1,49                              | d   | 32,16                               | ab | 30,67                                     | a  |
| LC200      | 5,68                              | abc | 32,03                               | ab | 26,34                                     | ab |
| Org        | 1,66                              | d   | 27,92                               | b  | 26,26                                     | ab |
| Org100     | 4,53                              | bcd | 28,27                               | b  | 23,73                                     | ab |

Com relação à concentração de nitratos residuais no solo após a cultura do milho, é possível observar na figura 9 que a menor média de 54,82 mg kg<sup>-1</sup> corresponde ao tratamento Org, que não apresenta diferença estatística com a testemunha e N50, com valores respectivos de 68,63 e 84,21 mg kg<sup>-1</sup>. Já os tratamentos que receberam as maiores doses de N, foram os que apresentaram os teores de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> mais elevados, 174,51, 158,49 e 154,77 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente em N200, FE200 e Org100, exceto o LC200 que apresentou um valor mais baixo de 111,32 mg kg<sup>-1</sup>, que foi semelhante ao do FE100 com 100,32 mg kg<sup>-1</sup> e ao do LC100 com 96 mg kg<sup>-1</sup>.

A figura 10 apresenta o teor de N mineral residual no solo após a cultura do milho em outubro de 2018. Assim como no teor do nitratos, os tratamentos que receberam as maiores doses de N, N200, FE100 e Org 100, foram os que registaram maior quantidade de N no solo, respectivamente 182,27, 167,65 e 159,31 mg kg<sup>-1</sup>. O tratamento LC200, foi uma exceção e apresentou uma média de 117 mg kg<sup>-1</sup> com semelhança ao segundo maior valor estatístico de N100 com 126,41 mg kg<sup>-1</sup> e sem diferença estatística com FE100 com valor de 102,41 mg kg<sup>-1</sup>. O menor valor de 56,48 mg kg<sup>-1</sup> corresponde ao tratamento Org, que não diferiu significativamente da testemunha com 70,10 mg kg<sup>-1</sup>.



**Figura 9** - Teor de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> residual no solo na cultura do milho em outubro de 2018 (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).



**Figura 10** - Teor de N mineral residual no solo na cultura do milho outubro de 2018 (Test, testemunha; N, nitrato de amônio; FE, fertilizante estabilizado; LC, fertilizantes de liberação controlada; Org, corretivo orgânico; 50, 100 e 200 correspondem às doses de N de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

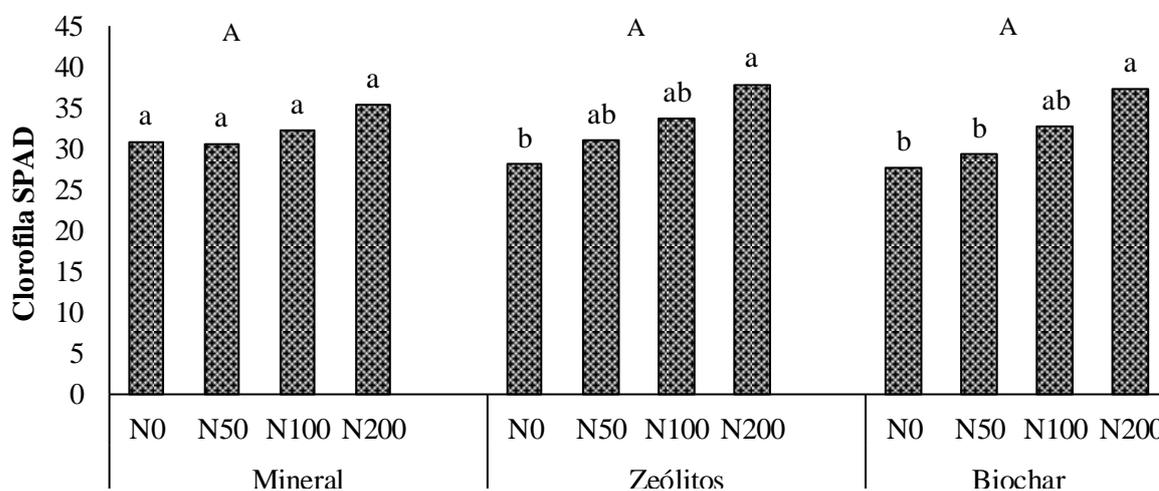
## 4.2 CONDICIONADORES DE SOLO

### 4.2.1 INDICADORES DE ESTADO NUTRICIONAL DAS PLANTAS E PRODUÇÃO DE BIOMASSA.

São apresentados os resultados da avaliação nutricional das plantas de aveia em resposta aos diferentes tratamentos utilizados, envolvendo fertilizante nitrogenado mineral e

condicionadores de solo. Os índices de clorofila-SPAD e NDVI foram realizados a campo, no estágio de primeiro nó perceptível, e as concentrações de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (B, Fe, Mn, Zn e Cu) foram analisados nos tecidos da planta inteira após a colheita. A produtividade da aveia será também apresentada em matéria seca.

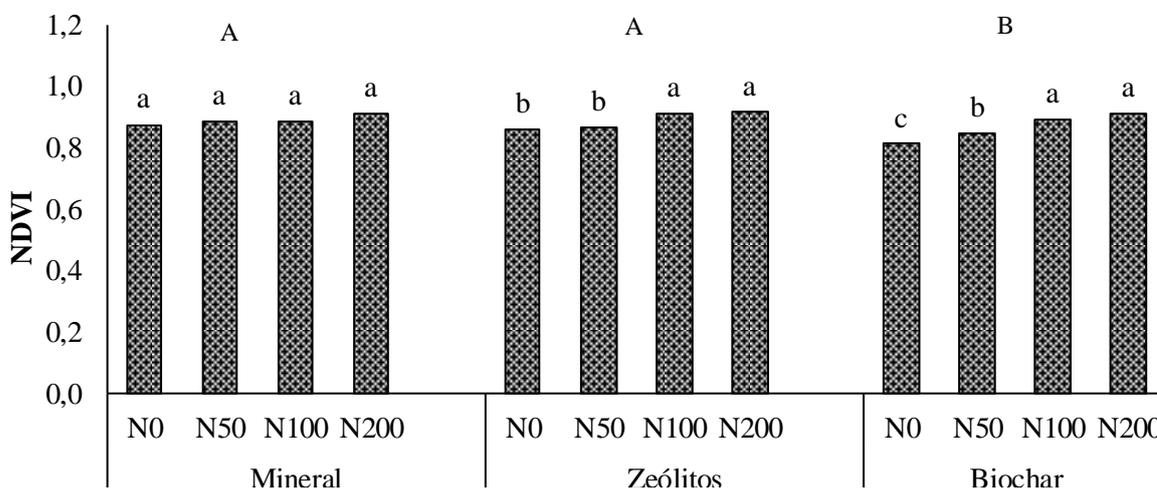
A figura 11 apresenta as estimativas dos teores de clorofila encontrados por meio de leituras com o aparelho SPAD 502. Quando comparadas apenas as fontes de estudo, não se observa diferença significativa entre mineral (32,3), zeólitos (32,7) e biochar (31,8). Por sua vez, dentro da fonte mineral, as doses de N não alteraram os índices de clorofila, os quais variaram entre 30,6 a 35,5, entre a testemunha e a dose de 200 kg de N ha<sup>-1</sup>, respectivamente. No entanto na presença de condicionadores de solo, tanto para zeólitos quanto para o biochar, a maior dose de N (N200), apresentou o maior valor SPAD, sendo 37,9 e 37,4, respectivamente. Para zeólitos o menor valor também está no tratamento que não recebeu fertilizantes nitrogenado (N0), com 28,1, e os tratamentos N50 e N100, ficaram com valor intermediário e não diferem de N0 e de N200. Para o biochar o menor valor foi 27,7 para N0, seguindo-se 29,3 para N50 e 32,8 para N100, sem diferenças significativas entre eles. Entre N100 e N200 também não se registaram diferenças significativas.



**Figura 11** - Valores da leitura SPAD nas folhas da aveia no estágio de primeiro nó detectável (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Ao analisar os valores referentes ao índice NDVI, apresentados na figura 12, é possível observar que há diferença significativa entre condicionadores. No tratamento biochar o valor médio (0,87) foi mais baixo que nos tratamentos mineral (0,89) e zeólitos (0,89). Ao analisar

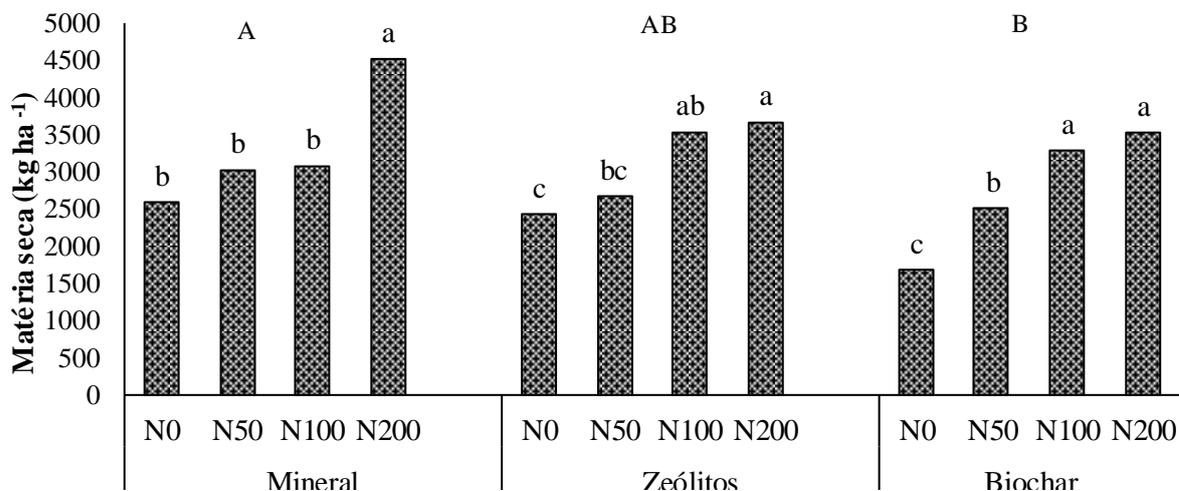
doses dentro do fator fertilizante mineral não ocorreram diferenças estatísticas, com médias a variar de 0,88 a 0,91. Nos talhões com zeólitos e biochar, as maiores doses de N, N100 e N200, apresentaram maiores valores de NDVI (respectivamente 0,91 e 0,92 e 0,89 e 0,91).



**Figura 12** - Valores do índice de vegetação NDVI nas folhas da aveia no estágio de primeiro nó detectável (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

A produção de biomassa da aveia é apresentada na figura 13. Quando analisado o efeito das fontes estudadas, pode-se dizer que a presença de biochar resultou na menor produtividade 2752 kg ha<sup>-1</sup>, embora este não apresente diferença estatística com os zeólitos, com 3083 kg ha<sup>-1</sup>. Contudo, entre o tratamento com biochar e o tratamento mineral ocorreram diferenças significativas, sendo os valores do último de 3311 kg ha<sup>-1</sup>. Se observarmos apenas as doses de N, é possível perceber que há um aumento contínuo na produção de matéria seca com o aumento da dose de N, independente do condicionador.

Analisando as doses dentro do fertilizante mineral, observa-se que N200 obteve a maior produtividade com 4527 kg ha<sup>-1</sup> diferindo significativamente de 3088 kg ha<sup>-1</sup> em N100, 3021 kg ha<sup>-1</sup> em N50 e 2595 kg ha<sup>-1</sup> em N0. No tratamento com zeólitos a maior quantidade de matéria seca (3680 kg ha<sup>-1</sup>) também é encontrada na dose N200 e a menor (2432 kg ha<sup>-1</sup>) em N0. Com a aplicação de biochar o resultado foi semelhante, onde N0 registou a menor produtividade com 1586 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto N100 e N200 não apresentam diferenças significativas entre si, registrando as maiores produções, 3288 e 3525 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Intermediário a estes e com diferença estatística para N0 e também para N100 e N200 está o N50 com 2509 kg ha<sup>-1</sup>.



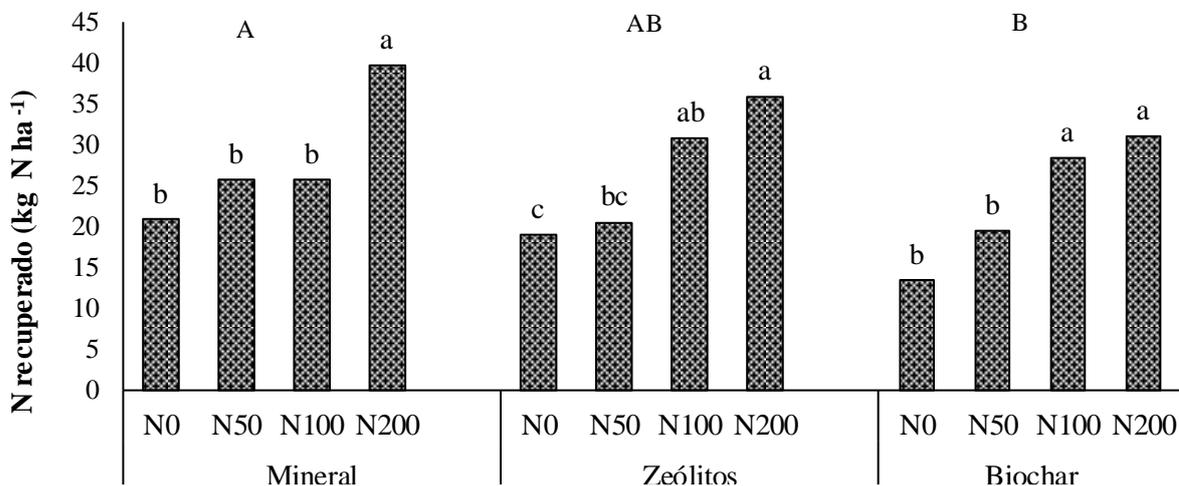
**Figura 13** - Produtividade em matéria seca de aveia (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

A partir da concentração de N dos tecidos da aveia e da produtividade é possível determinar a quantidade de N recuperado pela cultura, o que é mostrado na figura 14. Os resultados encontrados apresentam relação semelhante à da produtividade. Assim ao observar apenas o fator condicionadores de solo, é possível observar que o biochar apresentou a menor recuperação de N com 23,1 kg ha<sup>-1</sup>, diferindo significativamente do tratamento mineral que mostrou a maior recuperação de N com 27,9 kg ha<sup>-1</sup>. A aplicação de zeólitos originou valores intermédios (26,6 kg N ha<sup>-1</sup>), sem diferença significativa para qualquer um dos outros tratamentos.

Ao investigar doses e condicionadores, observa-se que o valor em N200 foi maior no mineral, com 39,6 kg N ha<sup>-1</sup> recuperado, e o menor em N0, com 20,8 kg N ha<sup>-1</sup>. O valor de N0, contudo, não diferiu estatisticamente do de N50 (25,7 kg N ha<sup>-1</sup>) e N100 (25,7 kg N ha<sup>-1</sup>). O valor de N200 também foi maior com zeólitos (35,9 kg N ha<sup>-1</sup>) embora sem diferença significativa para N100 (30,8 kg N ha<sup>-1</sup>), mas diferindo de N50 (20,6 kg N ha<sup>-1</sup>) e N0 (19,1 kg N ha<sup>-1</sup>) que apresentaram os valores mais baixos de N recuperado. Para biochar, N200 também apresentou a maior quantidade de N recuperado (31,08 kg N ha<sup>-1</sup>), sem diferença estatística para N100 (28,35 kg N ha<sup>-1</sup>) mas com diferença estatística para N50 (19,45 kg N ha<sup>-1</sup>) e N0 (13,42 kg N ha<sup>-1</sup>), que registaram os menores valores mais baixos.

As concentrações de N nos tecidos de aveia estão apresentadas na tabela 9. É possível observar que não ocorreram diferenças significativas para o teor de N entre os condicionadores,

nem quando comparadas as doses de N em cada condicionador. Os valores, contudo, mostram uma tendência consistente com o aumento da dose de nitrogênio, embora sem diferença estatística para  $P < 0,05$ .



**Figura 14** - Teor de N recuperado na matéria seca (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

As concentrações dos demais macronutrientes avaliadas nos tecidos de aveia estão apresentadas na tabela 9. Quando analisados os teores de P observa-se que não há diferença significativa para nenhum dos fatores em estudo. Para o K, ao se estudar o efeito dos condicionadores de solo, zeólitos e biochar apresentam os maiores valores, respectivamente 15,6 e 16,6 g kg<sup>-1</sup>, diferindo significativamente do fertilizante mineral que registra o menor teor de K com 11,9 g kg<sup>-1</sup>. O fator doses de N não apresenta diferença quando associada ao uso do fertilizante mineral ou do biochar. Na presença de zeólitos a concentração de K aumenta conforme aumenta a dose de N, sendo 11,7 g kg<sup>-1</sup> em N50, 15,4 g kg<sup>-1</sup> em N100 e 20,4 g kg<sup>-1</sup> em N200. Quando não há adição de N em zeólitos (N0), o valor 14,8 g kg<sup>-1</sup> não difere se N50 e N100.

O mesmo ocorre com o Mg, não sendo possível observar diferença significativa para nenhum dos fatores analisados, exceto entre as doses de N na presença de zeólitos. Os maiores resultados são encontrados sem diferença significativa entre elas nas maiores doses, N200 com 1,6 g kg<sup>-1</sup> e N100 com 1,5 g kg<sup>-1</sup>, os quais diferem significativamente de N0 com 1,1 g kg<sup>-1</sup> e de N50 com 1,3 g kg<sup>-1</sup>.

Para a concentração de Ca, quando se compara somente o efeito dos condicionadores não se registra diferença significativa. Na presença de zeólitos, N0 e N50 apresentam os menores teores de Ca, 0,9 e 1,0 g kg<sup>-1</sup>, e com diferença significativa para N100 e N200 respectivamente com 1,3 e 1,4 g kg<sup>-1</sup>.

**Tabela 9** - Concentração de macronutrientes na matéria seca das plantas de aveia (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras maiúsculas distintas a seguir às médias indicam diferença significativa entre condicionadores e letras minúsculas indicam diferença significativa entre doses dentro de cada condicionador pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

|          |      | Nitrogênio         |   | Fósforo |   | Potássio |    | Cálcio |   | Magnésio |   |
|----------|------|--------------------|---|---------|---|----------|----|--------|---|----------|---|
|          |      | g kg <sup>-1</sup> |   |         |   |          |    |        |   |          |   |
| Mineral  |      | 8,4                | A | 2,1     | A | 11,9     | B  | 1,1    | A | 1,3      | A |
| Zeólitos |      | 8,5                | A | 2,0     | A | 15,6     | A  | 1,2    | A | 1,4      | A |
| Biochar  |      | 8,3                | A | 2,0     | A | 16,6     | A  | 1,1    | A | 1,3      | A |
| Mineral  | N0   | 8,1                | a | 2,0     | a | 11,3     | a  | 0,9    | a | 1,1      | a |
|          | N50  | 8,5                | a | 2,1     | a | 13,2     | a  | 1,0    | a | 1,3      | a |
|          | N100 | 8,3                | a | 1,9     | a | 10,8     | a  | 1,1    | a | 1,4      | a |
|          | N200 | 8,7                | a | 2,2     | a | 12,4     | a  | 1,2    | a | 1,4      | a |
| Zeólitos | N0   | 7,9                | a | 2,0     | a | 14,8     | bc | 0,9    | b | 1,1      | b |
|          | N50  | 7,7                | a | 2,0     | a | 11,7     | c  | 1,0    | b | 1,3      | b |
|          | N100 | 8,7                | a | 1,8     | a | 15,4     | b  | 1,3    | a | 1,5      | a |
|          | N200 | 9,8                | a | 2,1     | a | 20,4     | a  | 1,4    | a | 1,6      | a |
| Biochar  | N0   | 8,0                | a | 2,1     | a | 15,9     | a  | 1,0    | a | 1,2      | a |
|          | N50  | 7,7                | a | 2,2     | a | 16,7     | a  | 1,2    | a | 1,4      | a |
|          | N100 | 8,7                | a | 1,8     | a | 17,0     | a  | 1,2    | a | 1,4      | a |
|          | N200 | 8,8                | a | 1,8     | a | 16,7     | a  | 1,2    | a | 1,3      | a |

A tabela 10 apresenta as concentrações de micronutrientes. Para o teor de B, os condicionadores não apresentam diferenças significativas entre si. No entanto, dentro de cada condicionador, percebe-se algumas alterações com o aumento da taxa de N. A maior concentração de B (5,9 mg kg<sup>-1</sup>) ocorre para N200 embora não difira de N0 (4,1 mg kg<sup>-1</sup>), mas apresenta diferença significativa para N50 (3,3 mg kg<sup>-1</sup>) e N100 (3,0 mg kg<sup>-1</sup>). Na presença de zeólitos os valores mais baixos estão presentes em N0 (2,0 mg kg<sup>-1</sup>) e N100 (3,2 mg kg<sup>-1</sup>) que diferem significativamente dos maiores teores em N50 (6,5 mg kg<sup>-1</sup>) e N200 (7,2 mg kg<sup>-1</sup>). E para o biochar, apenas o tratamento N100 apresentou diferença significativa dos demais, registrando este o maior teor de B com 7,5 mg kg<sup>-1</sup>.

Para os teores de Fe o fertilizante mineral mostrou-se com 74,7 mg kg<sup>-1</sup> o maior resultado quando comparado com biochar (62,4 mg kg<sup>-1</sup>) e com zeólitos (43,7 mg kg<sup>-1</sup>), diferindo significativamente do último. O fator doses de N não apresenta diferença significativa na presença de zeólitos e biochar. Entretanto no talhão do fertilizante mineral os maiores valores

são encontrados nas doses N0 e N200, com concentrações respectivas de 90,8 e 84,1 mg kg<sup>-1</sup>, que diferem significativamente de N50 com 64,7 mg kg<sup>-1</sup> e de N100 com 59,3 mg kg<sup>-1</sup>.

Os teores de Mn não apresentaram diferença significativa entre os condicionadores de solo e nem para as diferentes doses de N dentro do tratamento biochar. No entanto, para zeólitos as diferentes doses de N originaram diferença significativa, sendo que a menor concentração de Mn foi obtida no tratamento N0 com 78,2 mg kg<sup>-1</sup> e a maior em N100 com 112,5 mg kg<sup>-1</sup>. As doses de N também originaram diferença significativa na concentração de Mn no talhão fertilização mineral, sendo que o maior teor de Mn, 118,2 mg kg<sup>-1</sup>, é encontrado em N200.

Quando se analisam os teores de Zn, observa-se que não ocorreu diferença significativa entre os condicionadores de solo. Na presença de zeólitos as doses de N não influenciaram na concentração desse micronutriente no tecido da aveia. Entretanto para fertilizante mineral e biochar a dose N0 apresentou o resultado mais elevado (30,3 e 29,1 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente) diferindo significativamente de N50, N100 e N200.

Para a concentração de Cu ocorreram diferenças significativas entre os diferentes condicionadores de solo. O biochar mostrou maior resultado com 8,3 mg kg<sup>-1</sup>, que difere significativamente de zeólitos com 7,5 mg kg<sup>-1</sup>, que também difere do fertilizante mineral que apresentou a teor mais baixo com 6,6 mg kg<sup>-1</sup>. O fator doses de N não mostrou diferença significativa na presença dos condicionadores.

**Tabela 10** - Concentração de micronutrientes na matéria seca das plantas de aveia (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras maiúsculas distintas a seguir às médias indicam diferença significativa entre condicionadores e letras minúsculas indicam diferença significativa entre doses de N dentro de cada condicionador pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

|          | Boro                |     | Ferro |      | Manganês |       | Zinco |      | Cobre |     |   |
|----------|---------------------|-----|-------|------|----------|-------|-------|------|-------|-----|---|
|          | mg kg <sup>-1</sup> |     |       |      |          |       |       |      |       |     |   |
| Mineral  | 4,1                 | A   | 74,7  | A    | 89,7     | A     | 20,4  | A    | 6,6   | C   |   |
| Zeólitos | 4,7                 | A   | 43,7  | B    | 96,2     | A     | 21,9  | A    | 7,5   | B   |   |
| Biochar  | 4,0                 | A   | 62,4  | AB   | 79,2     | A     | 23,6  | A    | 8,3   | A   |   |
| Mineral  | N0                  | 4,1 | ab    | 90,8 | a        | 88,6  | b     | 30,3 | a     | 6,9 | a |
|          | N50                 | 3,3 | b     | 64,7 | b        | 71,3  | b     | 17,9 | b     | 6,9 | a |
|          | N100                | 3,0 | b     | 59,3 | b        | 80,6  | b     | 15,1 | b     | 5,9 | a |
|          | N200                | 5,9 | a     | 84,1 | a        | 118,2 | a     | 18,1 | b     | 6,5 | a |
| Zeólitos | N0                  | 2,0 | b     | 28,0 | a        | 78,2  | c     | 20,1 | a     | 6,8 | a |
|          | N50                 | 6,5 | a     | 54,6 | a        | 102,5 | ab    | 22,0 | a     | 6,9 | a |
|          | N100                | 3,2 | b     | 33,0 | a        | 112,9 | a     | 20,8 | a     | 7,9 | a |
|          | N200                | 7,2 | a     | 59,0 | a        | 91,1  | bc    | 24,7 | a     | 8,3 | a |
| Biochar  | N0                  | 2,6 | b     | 74,0 | a        | 58,3  | a     | 29,1 | a     | 8,5 | a |
|          | N50                 | 2,8 | b     | 75,1 | a        | 82,0  | a     | 21,9 | b     | 8,5 | a |
|          | N100                | 7,5 | a     | 50,2 | a        | 90,8  | a     | 21,9 | b     | 8,2 | a |
|          | N200                | 2,9 | b     | 42,4 | a        | 85,9  | a     | 21,4 | b     | 8,1 | a |

#### 4.2.2 NITROGÊNIO MINERAL NO SOLO

Os resultados das análises de solo realizadas após a cultura da aveia para o experimento com condicionadores de solo e diferentes doses de N são apresentados a seguir. A tabela 11 mostra os valores de N facilmente mineralizável, por meio dos índices  $\text{NH}_4^+$  extraído com KCl a quente e a frio, e a diferença entre os dois, que é designada  $\text{NH}_4^+$  hidrolisável.

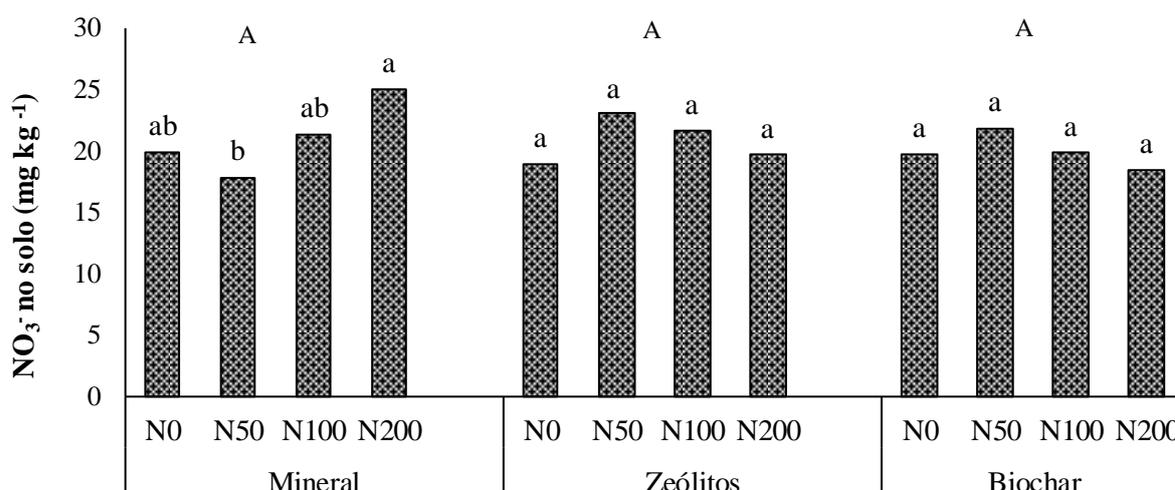
Quando se estuda apenas o fator condicionador de solo não é observada diferença significativa entre fertilizante mineral, zeólitos e biochar em  $\text{NH}_4^+$  a frio. Ao contrário do que acontece com  $\text{NH}_4^+$  a quente e  $\text{NH}_4^+$  hidrolisável, onde biochar apresenta as menores concentrações de  $\text{NH}_4^+$  (12,84 e 11,46  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente) com diferença significativa do fertilizante mineral, que representa os resultados mais elevados com 15,16 para  $\text{NH}_4^+$  a quente e 13,68  $\text{mg kg}^{-1}$  para  $\text{NH}_4^+$  hidrolisável.

Ao analisarmos as diferentes doses em cada condicionador não são encontradas diferenças significativas para  $\text{NH}_4^+$  extraído a quente e  $\text{NH}_4^+$  hidrolisável. Para o  $\text{NH}_4^+$  extraído a frio ocorre diferença significativa somente entre as doses no fertilizante mineral, sendo o tratamento N0 o mais elevado com 1,80  $\text{mg kg}^{-1}$  e o N100 o mais baixo com 1,15  $\text{mg kg}^{-1}$ .

**Tabela 11** - Concentração de  $\text{NH}_4^+$  no solo obtido por extração com KCl a frio e a quente e  $\text{NH}_4^+$  hidrolisável, obtido por subtração da determinação a quente e a frio após a colheita da aveia em maio de 2019 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200  $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras maiúsculas distintas a seguir às médias indicam diferença significativa entre condicionadores e letras minúsculas indicam diferença significativa entre doses de N dentro dos condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

|          |      | $\text{NH}_4^+$ frio |    | $\text{NH}_4^+$ quente |    | $\text{NH}_4^+$ hidrolisável |    |
|----------|------|----------------------|----|------------------------|----|------------------------------|----|
|          |      | $\text{mg kg}^{-1}$  |    |                        |    |                              |    |
| Mineral  |      | 1,47                 | A  | 15,16                  | A  | 13,68                        | A  |
| Zeólitos |      | 1,64                 | A  | 13,70                  | AB | 12,06                        | AB |
| Biochar  |      | 1,38                 | A  | 12,84                  | B  | 11,46                        | B  |
| Mineral  | N0   | 1,80                 | a  | 14,83                  | a  | 13,02                        | a  |
|          | N50  | 1,55                 | ab | 14,80                  | a  | 13,25                        | a  |
|          | N100 | 1,15                 | b  | 15,64                  | a  | 14,49                        | a  |
|          | N200 | 1,38                 | ab | 15,36                  | a  | 13,98                        | a  |
| Zeólitos | N0   | 1,64                 | a  | 13,71                  | a  | 12,07                        | a  |
|          | N50  | 1,38                 | a  | 11,85                  | a  | 10,47                        | a  |
|          | N100 | 1,62                 | a  | 15,24                  | a  | 13,62                        | a  |
|          | N200 | 1,92                 | a  | 14,01                  | a  | 12,09                        | a  |
| Biochar  | N0   | 1,28                 | a  | 12,63                  | a  | 11,35                        | a  |
|          | N50  | 1,56                 | a  | 12,64                  | a  | 11,08                        | a  |
|          | N100 | 1,39                 | a  | 11,75                  | a  | 10,35                        | a  |
|          | N200 | 1,29                 | a  | 14,36                  | a  | 13,07                        | a  |

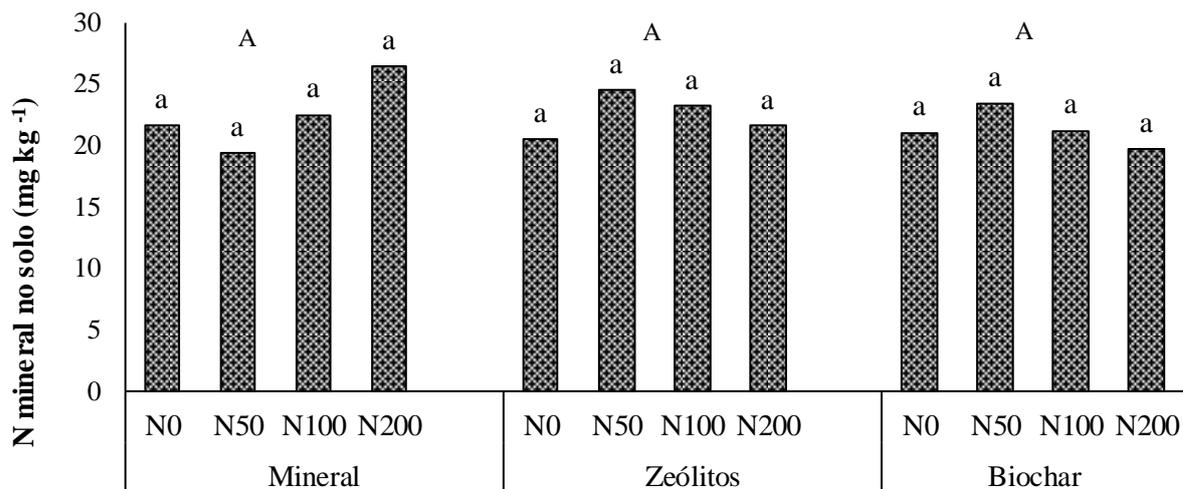
O teor de nitratos no solo após a colheita da aveia é mostrado na figura 15. Quando estudado o efeito dos condicionadores de solo não se encontra diferença significativa entre fertilizante mineral, zeólitos e biochar. Assim como não se registaram diferenças entre doses de N dentro de cada condicionador, exceto para fertilizante mineral, onde N200 apresentou a maior concentração de  $\text{NO}_3^-$  com  $25,1 \text{ mg kg}^{-1}$  diferindo significativamente de N50 com o teor mais baixo,  $17,9 \text{ mg kg}^{-1}$ .



**Figura 15** - Teor de  $\text{NO}_3^-$  no solo na cultura da aveia em maio de 2019 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

A figura 16 mostra o teor de N mineral no solo após a colheita da aveia. Este resultado é obtido através da concentração de  $\text{NO}_3^-$  somado com a concentração de  $\text{NH}_4^+$  extraído a frio, portanto influenciado diretamente por estes dois índices. O teor de N mineral no solo não apresenta diferença significativa para nenhum dos fatores estudados.

A tabela 12 mostra o resultado da extração de  $\text{NH}_4^+$  com KCl a quente e a frio, e o índice  $\text{NH}_4^+$  hidrolisável para a colheita de solos efetuada no outono após a colheita do milho. Com relação ao  $\text{NH}_4^+$  extraído a frio, regista-se diferença significativa em todos fatores. Em estudo do efeito dos condicionadores de solo, é possível observar que o menor valor de  $\text{NH}_4^+$  a frio corresponde ao fertilizante mineral ( $3,68 \text{ mg kg}^{-1}$ ), que difere significativamente de zeólitos ( $8,94 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e de biochar ( $7,47 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Para a comparação das doses dentro de cada condicionador, identifica-se N200 com o resultado mais elevado para mineral ( $7,76 \text{ mg kg}^{-1}$ ), zeólitos ( $12,76 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e biochar ( $12,88 \text{ mg kg}^{-1}$ ).



**Figura 16** - Teor de N mineral no solo na cultura da aveia em maio de 2019 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Para os valores de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> extraído a quente, a tabela 12 mostra que para o fator condicionadores de solo, o fertilizante mineral expressa a maior quantidade de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> extraído a quente (27,85 mg kg<sup>-1</sup>) quando comparado com zeólitos (18,49 mg kg<sup>-1</sup>) e com biochar (19,62 mg kg<sup>-1</sup>), diferindo significativamente. Para doses de N associada ao condicionador, não há diferença estatística para fertilizante mineral e biochar, apenas para zeólitos que apresenta N0 com a menor concentração (14,97 mg kg<sup>-1</sup>) diferindo significativamente de N100 que mostra o resultado mais elevado com 23,32 mg kg<sup>-1</sup>.

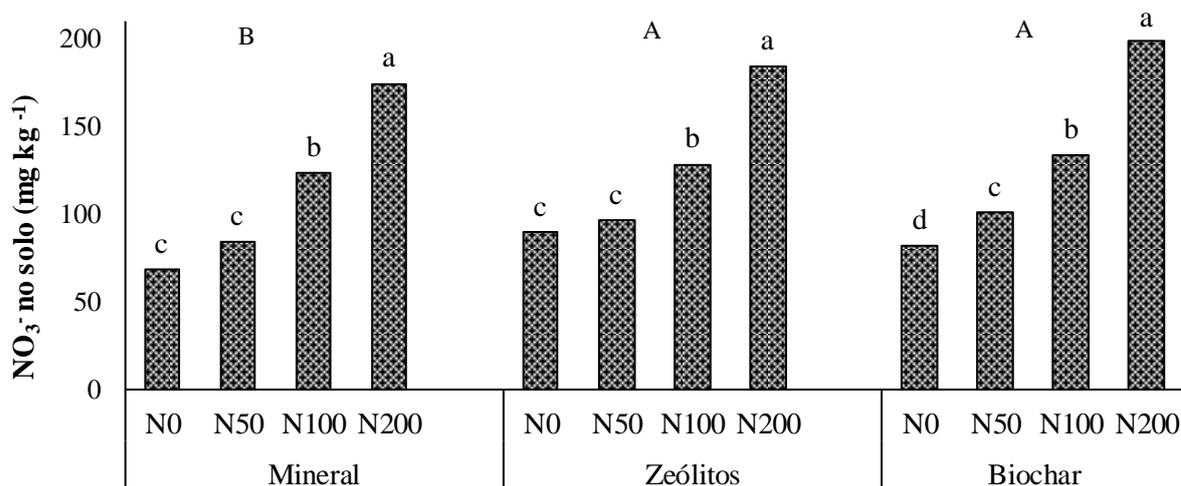
No índice NH<sub>4</sub><sup>+</sup> hidrolisável, ao comparar-se os condicionadores de solo, observa-se influência direta do NH<sub>4</sub><sup>+</sup> extraído a quente. Assim, o fertilizante mineral (24,18 mg kg<sup>-1</sup>) expressa resultado maior que zeólitos (9,54 mg kg<sup>-1</sup>) e biochar (12,15 mg kg<sup>-1</sup>), diferindo significativamente. Quando se analisam as diferentes doses de N dentro do tratamento com fertilizante mineral e com biochar. Entretanto na presença de zeólitos, N100 apresenta o maior valor (14,64 mg kg<sup>-1</sup>) diferindo significativamente dos que foram encontrados em N200 (6,95 mg kg<sup>-1</sup>) e N0 (7,16 mg kg<sup>-1</sup>).

A figura 17 apresenta a concentração de nitratos residuais no solo após a colheita do milho. Na comparação entre os condicionadores de solo, zeólitos e biochar apresentam os maiores teores de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> com 124,68 e 128,88 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, diferindo significativamente do fertilizante mineral com 112,69 mg kg<sup>-1</sup>. Para fertilizante mineral, bem como para zeólitos e biochar o tratamento N200 corresponde ao maior resultado

(respectivamente 174,51, 184,43 e 198,85 mg kg<sup>-1</sup>) diferindo significativamente dos demais, assim como N0 seguido de N50 apresentam as menores médias.

**Tabela 12** - Concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo obtido por extração com KCl a frio e a quente e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> hidrolisável, obtido por subtração da determinação a quente e a frio, após a colheita do milho em outubro de 2018 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras maiúsculas distintas a seguir às médias indicam diferença significativa entre condicionadores e letras maiúsculas indicam diferença significativa entre doses de N dentro dos condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

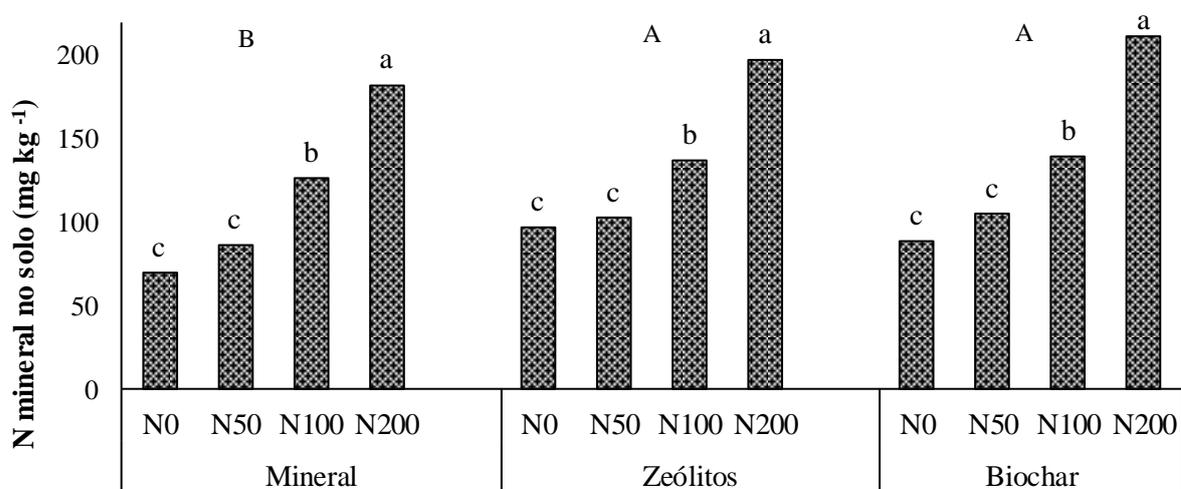
|          |      | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> frio |    | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> quente |    | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> hidrolisável |    |
|----------|------|-----------------------------------|----|-------------------------------------|----|---|----|
|          |      | mg kg <sup>-1</sup>               |    |                                     |    |   |    |
| Mineral  |      | 3,68                              | B  | 27,85                               | A  | 24,18                                     | A  |
| Zeólitos |      | 8,94                              | A  | 18,49                               | B  | 9,54                                      | B  |
| Biochar  |      | 7,47                              | A  | 19,62                               | B  | 12,15                                     | B  |
| Mineral  | N0   | 1,47                              | c  | 26,17                               | a  | 24,70                                     | a  |
|          | N50  | 2,50                              | bc | 27,69                               | a  | 25,20                                     | a  |
|          | N100 | 2,98                              | b  | 25,71                               | a  | 22,73                                     | a  |
|          | N200 | 7,76                              | a  | 31,84                               | a  | 24,08                                     | a  |
| Zeólitos | N0   | 7,81                              | b  | 14,97                               | b  | 7,16                                      | b  |
|          | N50  | 6,52                              | b  | 15,95                               | ab | 9,43                                      | ab |
|          | N100 | 8,68                              | b  | 23,32                               | a  | 14,64                                     | a  |
|          | N200 | 12,76                             | a  | 19,71                               | ab | 6,95                                      | b  |
| Biochar  | N0   | 6,63                              | b  | 19,49                               | a  | 12,87                                     | a  |
|          | N50  | 4,29                              | b  | 18,36                               | a  | 14,07                                     | a  |
|          | N100 | 6,09                              | ab | 16,80                               | a  | 10,71                                     | a  |
|          | N200 | 12,88                             | a  | 23,84                               | a  | 10,96                                     | a  |



**Figura 17** - Teor de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo após a colheita do milho em outubro de 2018 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

A figura 18 apresenta o teor de N mineral que permaneceu no solo após a colheita do milho, ficando passível de lixiviar. Ao se comparar o fator condicionadores, observa-se em

fertilizante mineral o menor resultado 116,37 mg kg<sup>-1</sup>, que difere estatisticamente de zeólitos e biochar, com 133,62 e 136,35 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Em comparação em cada condicionador, as doses mostraram a mesma relação linear da aplicação com o teor de N remanescente, assim N0 e N50 correspondem igualmente a menor concentração de N mineral, diferindo significativamente de N100 com valor intermediário e de N200 com o resultado mais elevado, sendo 182,27 mg kg<sup>-1</sup> para fertilizante mineral, 197,19 mg kg<sup>-1</sup> para zeólitos e 211,73 mg kg<sup>-1</sup> para biochar.



**Figura 18** - Teor de N mineral no solo após a colheita do milho em outubro de 2018 (N0, N50, N100 e N200 correspondem às doses de N de 0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras minúsculas distintas sobre as colunas indicam diferença significativa entre doses em cada condicionador, letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os condicionadores pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1 FERTILIZAÇÃO NITROGENADA

A fertilização efetuada ao milho influenciou o teor de N mineral remanescente no solo. Em outubro de 2018, após a colheita do milho, é possível observar que os talhões que receberam maiores doses de N (N200, FE200 e Org100), também foram os que apresentaram maior quantidade de N mineral residual no solo. O resultado pode ser explicado pela baixa recuperação do N pela cultura do milho, que raramente atinge os 50%. Sabe-se que a EUN pelas plantas se reduz para doses elevadas de N aplicado, aumentando o N residual no solo passível de perdas, sobretudo de lixiviação e desnitrificação (Barros et al., 1986; Rao et al., 1992; Yamada, 2000).

Para os tratamentos Org100 e FE200, além da grande quantidade de N aplicada, o tempo para a liberação do nutriente dos fertilizantes, que tende a ser mais lenta que em N200, pode contribuir para o elevado teor de N residual após a cultura do milho.

Para o fertilizante de liberação controlada houve uma baixa concentração de nitratos quando comparados com os outros tratamentos que receberam a mesma dose (100 e 200 kg N ha<sup>-1</sup>), o que corresponde a um menor teor de N mineral residual, comprovando a sua eficiência, pela disponibilização lenta do N e pela manutenção do N na forma amoniacal por mais tempo, sendo esta, por sua vez, mais facilmente imobilizada pelos microrganismos. O mesmo pode ser justificado quando se compara o FE200 com o N200, que apesar de não diferirem significativamente, FE200 apresenta um menor teor de nitrato, mostrando algum efeito de inibição da nitrificação mantendo N na forma amoniacal por mais tempo no solo e sendo este preferencialmente imobilizado pelos microrganismos.

O tratamento Org, correspondente a uma dose de 100 kg ha de N, apresenta o menor valor de N mineral mesmo em comparação com a testemunha não fertilizada. O que pode ser justificado não apenas pelo balanço entre o N aplicado e o exportado, mas também por perdas que ocorrem durante o ciclo e pela forma como o N permanece no solo (Schoröder et al., 2000). Sendo o Org um material orgânico, para os nutrientes ficarem disponíveis tem de ocorrer mineralização, que é um processo lento. Os fertilizantes orgânicos liberam os nutrientes ao longo do tempo, por vezes ao longo de vários anos, sendo está a principal razão que justifica o menor teor de nitratos residuais no solo. Parte do N ainda se encontra imobilizado pela microbiota do solo que decompõe o substrato orgânico ou nas estruturas orgânicas originais que ainda não foram atacadas (Havlin et al., 2014; Santos, 2015).

Para Assmann et al. (2003) a maior disponibilidade de N mineral é um fator positivo, uma vez que as plantas posteriores teriam mais acesso ao nutriente nesta forma, mas não deixa de salientar, que esta disponibilidade pode deixar o N suscetível a perdas por lixiviação e desnitrificação.

A fertilização nitrogenada efetuada ao milho influenciou os indicadores de estado nutricional SPAD e NDVI, na cultura da aveia cultivada na estação de crescimento seguinte (março de 2019), pois o N compõe a molécula de clorofila e participa do processo fotossintético. O aumento da disponibilidade deste nutriente no solo, incrementou a sua absorção e no teor de N na folha, assim como o teor de clorofila, permitindo uma maior eficiência fotossintética (Taiz e Zeiger, 2013). Assim, as maiores doses de N resultaram em um maior teor de N mineral residual no solo, que, por sua vez, aumentaram os indicadores SPAD e NDVI e ajudaram na nutrição da cultura seguinte, tal como observado em outros estudos (Prado e Vale, 2008).

Da mesma maneira, a fertilização nitrogenada à cultura do milho influenciou a produtividade da aveia. O teor de clorofila tem correlação direta com o rendimento da cultura, pois a maior eficiência fotossintética, conseqüentemente acelera a taxa de crescimento, aumentando a produção de massa seca (Heringer e Moojen, 2002; Quadros e Bandinelli, 2005). A maior dose de N aplicado (N200), sem mecanismo para retardar a liberação, resultou no maior teor de N mineral residual no solo e, conseqüentemente, apresentou a maior produtividade em matéria seca da aveia. Org100 apresentou a segunda maior produção de biomassa, embora não difira significativamente da de N200, também não difere dos demais tratamentos que resultaram em menores produtividades, incluindo os que receberam pouca ou nenhuma fertilização nitrogenada.

À medida que houve incremento na produção de massa seca aumentou também a quantidade de N recuperado pela aveia. O teor de N recuperado pode ser aumentado quando a aveia é submetida a sistemas de produção de animal a pasto (pastejo) ou a cortes, pois a relação direta do N com a clorofila e a fotossíntese faz com que este nutriente esteja em grandes quantidades nas folhas. Assim, a cada desfolha as plantas terão que absorver N do solo para renovar a área foliar. Quanto maior a desfolha, maior a demanda por nutrientes e maior a recuperação (Dechen e Nachtigall, 2007; Bernardon 2016).

Portanto, pode se atribuir à aveia uma elevada capacidade em recuperar o N disponível no solo e eficiência na sua utilização para produção de biomassa, uma vez que a concentração de N nos tecidos não diferenciou significativamente para nenhum tratamento. O resultado pode ser atribuído ao efeito de diluição do N, que pode ocorrer quando há aumento da massa seca

acumulada da cultura, isto é, mais N disponível no solo nos tratamentos que receberam maior quantidade de N, originou maior produção de massa seca de aveia tendo a concentração de N nos tecidos ficado diluída e não mostrando diferenças significativas (Lamaire e Salette, 1984).

A fertilização nitrogenada ao milho influenciou o teor de N residual no solo antes e após a colheita da aveia, onde se percebe uma redução (diferença) em mais de 50% no teor de  $\text{NH}_4^+$  hidrolisável, em especial nos tratamentos com inibidor de nitrificação e com fertilizante de liberação controlada. Quando se compara o teor de N mineral residual, observa-se que após a cultura da aveia, ocorreu redução em mais de 80% nos talhões N200, FE200 e Org100 que mostraram os maiores valores de N residual no fim do ciclo do milho. Parte do  $\text{NO}_3^-$  pode ter descido no perfil do solo ou ter sido imobilizado pela microbiota do solo, mas a maior parte do N mineral residual foi absorvido pela aveia o que se pode avaliar pela produção de biomassa e N exportado.

## 5.2 CONDICIONADORES DE SOLO

Os condicionadores aplicados antes da sementeira do milho influenciaram o teor de N mineral no solo em outubro após a colheita do milho. No entanto, para o teor de  $\text{NO}_3^-$  e de N mineral residual o mineral correspondeu a menor concentração, diferindo significativamente de biochar e zeólitos. Este resultado pode estar relacionado com a capacidade de retenção e liberação de nutrientes, sobretudo do N, devido a elevada CTC dos condicionadores. O biochar e os zeólitos podem ter mantido a forma amoniacal por mais tempo, reduzindo as perdas de nitrato e aumentando a disponibilidade para a cultura posterior, como é referido por outros autores (Manya, 2012; Nigussie et al., 2012; Villalba et al., 2014). À medida que aumenta a dose de N, também é percebido aumento do teor de N mineral residual, o que pode estar relacionado com a baixa eficiência de recuperação de N do milho, que é acentuada quando se excede a dose técnica ótima (Tyler e Bishop, 1983)

Os condicionadores aplicados antes da sementeira do milho não influenciaram o indicador de estado nutricional SPAD, porém influenciaram no indicador NDVI na cultura da aveia cultivada na estação de crescimento seguinte, em que o biochar mostrou o menor valor. Como os valores de SPAD correspondem a leituras do teor de clorofila da folha, que é correlacionado com o teor de N, possivelmente não apresentou diferença pois a concentração de N no tecido também não apresentou diferença significativa. Efeito semelhante foi encontrado

por Decarlos Neto et al. (2002), que relataram correlação positiva entre leituras SPAD e o teor de N das folhas.

A produtividade da aveia e o teor de N recuperado pela cultura foram influenciados pelos condicionadores aplicados antes da sementeira do milho, sendo que foi o bichar o que originou menor produtividade de matéria seca e conseqüentemente de N recuperado. O resultado pode ser justificado por uma reação do biochar com a cultura e o solo, que não permitiu o aumento da produtividade. Blackwell et al. (2009) explicam que o biochar pode ou não aumentar o rendimento das culturas, e em situação em que o biochar não aumenta o rendimento, pode ser usado para fins de proteção ambiental, devido ao seu efeito na redução da lixiviação e na emissão de óxido nitroso.

O fertilizante mineral foi o que resultou na maior produtividade, embora sem diferença significativa para os zeólitos, o que pode ser atribuído a maior disponibilização de nutriente deste. Um estudo realizado por Covalsky (2018) com azevém leva a perceber que os zeólitos fornecem nutrientes em quantidade e gradualmente ao longo do tempo, aumentando o rendimento da planta e melhorando o seu equilíbrio nutricional, especialmente quando se trata de N. Polat e Mehmet (2004) relatam também os benefícios dos zeólitos na agricultura, na melhoria da eficiência dos fertilizantes utilizados e no melhor desenvolvimento das plantas.

O teor de N mineral no solo após a cultura da aveia não foi influenciado pela aplicação de condicionadores antes da sementeira do milho. Embora os condicionadores apresentem uma recuperação 3% maior que o fertilizante mineral, não diferiram significativamente. No entanto, ao comparar o teor de N mineral residual do milho com o teor residual da aveia, se encontra uma redução média de 81%, chegando a uma recuperação de 91% de N na maior dose (N200).

À medida que há um incremento nas doses de N na cultura do milho, ocorre um maior teor de N mineral residual no solo e um aumento da produtividade e da recuperação de N pela aveia. Dessa forma, como já comentando anteriormente, pode se atribuir à aveia uma elevada capacidade em capturar o N disponível no solo e eficiência na sua utilização para produção de biomassa, o que a torna uma cultura de captura eficiente, de acordo com Thorup-Kristensen (2001), uma vez que esta evita grandes perdas de N por lixiviação e reduz a concentração de nitrato no solo a níveis muito baixos.

## 6. CONCLUSÃO

À medida que houve aumento nas doses de N aplicadas a cultura do milho, ocorreu também aumento do teor de N mineral residual no solo livre para perdas por lixiviação, desnitrificação e erosão. A utilização de fertilizantes nitrogenados de liberação gradual, sobretudo os de liberação controlada, mostraram-se eficientes em manter o N na forma amoniacal por mais tempo, assim como o N mineral residual no solo. Os condicionadores de solo, biochar e zeólitos, também apresentaram elevada capacidade de retenção do N residual no solo e de posterior disponibilização para as culturas.

O excesso de fertilização nitrogenada ao milho resulta no maior teor de N mineral residual no solo, proporcionando a aveia, cultivada em sequência, um bom desenvolvimento e produtividade, sem receber adubação complementar. Assim, pode se atribuir à aveia uma elevada capacidade em recuperar o N disponível no solo e eficiência na sua utilização para produção de biomassa.

A aveia pode ser considerada uma cultura de captura com grande eficiência na recuperação do N residual, uma vez reduziu em média 80% do teor de N no solo ao final do ciclo, evitando assim grandes perdas de N, sobretudo por lixiviação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduan, R. E.; Vilela, M. de F.; Reis Júnior, F. B. dos. (2004). Os Grandes ciclos biogeoquímicos do planeta. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 25 p. ISSN 1517-5111.
- Almeida, R.E.M. (2014). Fertilização nitrogenada no consórcio milho–braquiária em solos de clima tropical úmido no sistema de integração lavoura-pecuária. Thesis (PhD), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba.
- Amado, T.J.C.; Mielniczuk, J.; Fernandes, S.B.V. (2000). Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para o milho em sistemas de preparo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 24:179-189.
- Amin, A.EE.A.Z. (2018) Phosphorus dynamics and corn growth under applications of corn stalks biochar in a clay soil. Arabian Journal of Geosciences. V. 379, p11.
- Aronsson, H., Torstensson, G. (1998). Measured and simulated availability and leaching of nitrogen associated with frequent use of catch crops. Soil Use Manage. 14, 6–13.
- Askegaard, M., Olesen, J.E., Kristensen, K. (2005). Nitrate leaching from organic arable crop rotations: effects of location, manure and catch crop. Soil Use and Management 21, 181 e 188.
- Assmann, T. S.; Ronzelli Júnior, P.; Moraes, A. et al. (2003). Rendimento de milho em área de integração lavoura-pecuária sob o sistema de plantio direto, em presença e ausência de trevo branco, pastejo e nitrogênio. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, n.4, p.675-683.
- Barros, N. F. et al. (1986). Classificação nutricional de sítios florestais - Descrição de uma metodologia. Revista Árvore, v. 10, n. 2, p. 112-120.
- Barth, G.; von Tucher, S.; Schmidhalter, U. (2001). Influence of soil parameters on the effect of 3,4-dimethylpyrazole-phosphate as a nitrification inhibitor. Biology and Fertility of Soils, v. 34, p. 98-102.
- Beche, E., Benin, G., Bornhofen, E., Dalló, S. C., Sassi, L. H. e Oliveira, R. (2014). Eficiência de uso de Nitrogênio em cultivares de trigo pioneiras e modernas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 49, 948-957.
- Bernardi, A. C. D. C. (2008). Potencial do uso de zeólitas na agropecuária. Embrapa Pecuária Sudeste, p. 46.
- Bernardi, A. C. C.; Polidoro, J. C.; Monte, M. B. M.; Pereira, E. I.; Oliveira, C. R. (2014) The use of clay minerals to improve nitrogen fertilizer use efficiency. In: World Fertilizer Congress Of CIEC, 16., 2014, rio de Janeiro. Technological innovation for a sustainable tropical agriculture. p. 24-26.
- Bernardon, A. (2016). Altura do pasto e adubação nitrogenada sobre a produção de forragem e eficiência no uso de nutrientes em sistema de Integração Lavoura Pecuária. 96 f. Dissertação

(Mestrado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção vegetal), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco.

Bertol, I.; Mello, E.L.; Guadagnin, J.C.; Zapparoli, A.L.V.; Carrafa, M.R. (2003). Nutrients losses by water erosion. *Sci. Agric.*, 3:581-586.

Blackwell, P., Riethmuller, G., Collins, M. (2009). Biochar Application to Soil. 207 – 222. In Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Earthscan. 449 p.

Boddey, R.M.; Sá, J.C.D.M.; Alves, B.J.R.; Urquiaga, S. (1997). The contribution of biological nitrogen fixation for sustainable agricultural systems in the tropics. *Soil Biology and Biochemistry*, v.29, p.787-799.

Bredemeier, C., Mundstock, C. M. (2000). Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 365-372. ISSN 0103-8478.

Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-Total. In: Sparks, D. L. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 3- Chemical Methods*. SSSA. Book series n° 5. Madison, Wisconsin.

Bryson, G., 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., Athens, GA.

Campbell, C. A. (1978). Soil organic carbon, nitrogen and fertility. In: Schnitzer, M.; Khan, S. U. (Eds). *Soil Organic Matter*. Elsevier, Development in Soil Science, 8, Amsterdam.

Cantarella, H. (2007). Nitrogênio. In: Novais, R.F.; Alvarez., V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (Ed.). *Fertilidade do Solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 375-470.

Cantarella, H.; Trivelim, P. C. O.; Contin, T. L. M. et al. (2008). Ammonia volatilisation from ureaseinhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. *Scientia Agricola*, v. 65, n. 4, p. 397-401.

Cardoso, A. A.; Garcia, G.; Santos, O. A. M. dos;. (2013). Da escassez ao estresse do planeta: Um século de mudanças no ciclo do nitrogênio. *Quim. Nova*, Vol. 36, No. 9, pp. 1468-1476. ISSN 0100-4042. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422013000900032>.

Casarin, V.; Stipp, S. R. (2013). Quatro medidas corretas que levam ao uso eficiente dos fertilizantes. *Informações Agronômicas*, n. 142, p. 14-20.

Cicek, H.; Martens, K. R. T.; Bamford, K. C.; Entz, M. H. (2015). Late-season catch crops reduce nitrate leaching risk after grazed green manures but release N slower than wheat demand. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. v. 202, 1 abr, p. 31-41.

Clescerl, L., Greenberg, A. E., Eaton, A. D. (1998). *Standard Methods for Examination of Water & Wastewater (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater)* (20 ed.). APHA, AWWA, WEF.

Cogo, N.P. (1981). Effect of residue cover, tillage induced roughness, and slope length on erosion and related parameters. West Lafayette, Purdue University. 346p. (Tese de Doutorado)

Comissão Europeia (2010). A Directiva <Nitratos> da União Europeia. Portugal, Jan. 2010. Disponível em: < <http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/nitrates/pt.pdf>>. Acesso em: Fev, 2019.

Constantin, J.; Beaudoin, N.; Launay, M.; Duval, j.; Mary, B.; (2012). Long-term nitrogen dynamics in various catch crop scenarios: Test and simulations with STICS model in a temperate climate. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 147. p. 36– 46.

Cooper, J., Scherer, H. (2012). Nitrogen fixation. In: Marschner, P. (Ed.) *Marschner's mineral nutrition of higher plants*, Third Edition. Academic Press, London. pp. 389–408.

Covalski, C. D. A. (2018). Influência da aplicação de Biochar e Zeólitos na dinâmica do azoto no sistema solo-planta. Dissertação (mestrado). Escola Superior Agrária. Instituto Politécnico de Bragança. Bragança-PT.

Coyne, M. S. (2008). Biological denitrification. In: Schepers, J. S., Raun, W. R. (Eds.). *Nitrogen in Agricultural Systems*. Agronomy Monograph n.º49. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA. p. 201–253.

Cui, Z., Wang, G., Yue, S., Wu, L., Zhang, F. e Chen, X. (2014). Closing the N-use efficiency gap to achieve food and environmental security. *Environmental Science and Technology*, 48, 5780-5787.

Decarlos Neto, A. et al. (2002) Crescimento de porta-enxertos de citros em tubetes influenciados por doses de N. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 199-203.

Dechen, A. R.; Nachtigall, G. R. (2007). Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.) *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 95.

Doltra, J.; Olesen, J. E. (2013). The role of catch crops in the ecological intensification of spring cereals in organic farming under Nordic climate. *Europ. J. Agronomy* 44, p. 98– 108.

Eurostat (2019). Agri-environmental indicator - mineral fertiliser consumption. Mar, 2019. Disponível em: < [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental\\_indicator\\_-\\_mineral\\_fertiliser\\_consumption](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_mineral_fertiliser_consumption)>. Acesso em: Mai, 2019.

Eckhardt, D. P. (2015). Fertilizantes orgânicos: índice de eficiência e produção de alface, cenoura e mudas de eucalipto. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciências do solo, RS. p. 98.

Escola Superior Agrária (ESA). (2019). Clima na Escola Superior Agrária de Bragança. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, PT. Disponível em: <https://esa.ipb.pt/clima.php?clima=historico1ano>. Acesso em: Mai, 2019.

Fachin, V. (2005). Nutrição mineral de plantas. Lavras: UFLA / FAEPE. p.: il. - Curso de Pós-Graduação “Lato Sensu” (Especialização) a Distância: Solos e Meio Ambiente.

Farrell, M.; Rangott, G.; Krull, E. (2013). 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.

Fernandes, F. C. S., Buzetti, S.; ARF, O.; Andrade, J. A. da C. (2005). Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.4, n.2, p.195-204.

Ferreira, I. A. de Q. M. (2018). Estudos de fertilização de azoto, fósforo, potássio e boro em oliveira. 235 f. Tese de doutoramento – Curso de Ingeniería de Biosistemas, Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria, León, 2018.

Firestone, M. K. (1982). Biological denitrification. In: Stevenson, F. J. (ed.). *Nitrogen in Agricultural Soils*. Agronomy, n° 22, p. 289-318.

Francis, D. D., Vigil, M. F., Mosier, A. R. (2008). Gaseous losses of nitrogen other than through denitrification. In: Schepers, J. S., Raun, W. R. (Eds.). *Nitrogen in agricultural systems*. Madison. WI: ASA, CSSA, SSSA. 255–79.

Fungaro, D.A., Flues, M.S.S., Celebrioni, A.P. (2004). Estabilização de solo contaminado com zinco usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão. *Quim. Nova.*, v. 27, p.582-585.

Giannetto, G. (1990). *Zeolitas – características, propiedades y aplicaciones industriales*. Caracas: Edit Editorial Innovación Tecnológica.

Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J.; Merzlyak, M.N. (1996). Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 58:289-298.

Glossary of Soil Science Terms. GSST. (2008). Madison, Wisconsin, USA.

Google (2019). Dados Maps. Portugal.

Guadagnin, J. C.; Bertol, I.; Cassol, P. C.; Amaral, A. J. do. (2005). Perdas de solo, água e nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, (Sin mês). ISSN 0100-0683. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214036013>. Acesso em: Mai, 2019.

Harper, J.E. (1994). Nitrogen metabolism. In: Boote, K.J., Bennett, J.M., Sinclair, T.R., et al. *Physiology and determination of crop yield*. Madison: ASA/CSSA/SSSA. Chapt.11A. p.285-302

Hauck, R. D. (1985). Slow-release and bioinhibitor-amended nitrogen fertilizers. In: Engelstad, O. P. (ed). *Fertilizer Technology and Use*, 3ª ed., Madison, Wisconsin, 293 - 322 p.

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers, an introduction to nutrient management*, 8th edition. Pearson, Inc, New Jersey, USA.

Heringer, I.; Moojen, E. L. (2002). Potencial produtivo, alterações da estrutura e qualidade da pastagem de milho submetida a diferentes níveis de nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.31, n.2, p.875-882.

Instituto Português do Mar e da Atmosfera - IPMA (2019).

Izidoro, J.C. (2013). Síntese e caracterização de zeólita pura obtida a partir de cinzas volantes de carvão. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Tese (doutorado) - Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Jones Jr., J. B. (2001). *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press, Boca Raton, Washington, D.C.

Kolchinski, E. M.; Schuch, L. O. (2003). Eficiência no uso do nitrogênio por cultivares de aveia branca de acordo com a adubação nitrogenada. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 27:1033-1038.

Kissel, D. E., Cabrera, M. L., Paramasivan, S. (2008). Ammonium, ammonia, and urea reactions in soils. In: Schepers, J. S., Raun, W. R. (Eds.). *Nitrogen in agricultural systems*. Madison, WI: ASA, CSSA, SSSA. pp. 101–155.

Lemaire, G.; Salette, J. (1984). Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélevement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. 1. Etude de l'effet du milieu. *Agronomie*, v.4, p.241-249.

Malavolta, E. Gomes, F. P. Alcarde, J. C. (2002) *Adubos e Adubações*. Nobel. pg. 29-110. São Paulo.

Malavolta, E.; Moraes, M. (2009). Nitrogênio na agricultura brasileira. in: Lápido-Loureiro, F. E.; Melamed, R.; Figueiredo Neto, J. (Ed.). *Fertilizantes, agroindústria e sustentabilidade*. rio de Janeiro: CETEM/MCT. p. 211-255.

Malavolta, E., Vitti, G. C., Oliveira, S. A. (1997). *Avaliação do estado nutricional das plantas, princípios e aplicações*. 2ed. Potafos, 319 p.

Manyà, J. J. (2012). Pyrolysis for Biochar Purposes: A Review to Establish Current Knowledge Gaps and Research Needs. *Environmental Science & Technology*, [s.l.], v. 46, n. 15, p.7939-7954, 7 ago. 2012. American Chemical Society (ACS). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/es301029g>>. Acesso em: Jun, 2019.

Marchener, H. (1997). *Mineral nutrition of higher plants*. 2.ed. San Diego: Academic Press, 1997. 889 p.

Militão, C. M. T. (2004). Estudo do ciclo do azoto: Uma aplicação para o ensino. Dissertação (mestrado). Departamento de Botânica. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto.

Minolta Camera Co. Ltd. (2009). *Chlorophyll meter SPAD-502Plus*. Minolta, Osaka, Japan

Moll, R. H., Kamprath, E. J. e Jackson, W. A. (1982). Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal*, 74, 562-564.

- Mosier, A. R., Duxubury, J. M., Freney, J. R., Heinemeyer, O., Minami, K. (1996). Nitrous oxide emissions from agricultural fields: assessment, measurement and mitigation. *Plant and Soil* 181: 95-108.
- Nasholm, T.; Kielland, K.; Ganeteg, U. (2009). Uptake of organic nitrogen by plants. *New Phytologist*, Osford, v. 182, p. 31-48.
- Nelson, D. W. (1982). Gaseous losses of nitrogen other than through denitrification. In: Stevenson, F. J. (Ed.). *Nitrogen in agricultural soils*. *Agronomy*, nº 22. pp 327-363.
- Nigussie, A., Kissi, E., Misganaw, M., Ambaw, G. (2012). 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.
- Nóbrega, I. P. C. (2011). Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: Sequestro de carbono no solo. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, p. 46.
- Notaris, C. de; Rasmussen, J.; Sorensen, P.; Olesen, J. E. (2018). Nitrogen leaching: A crop rotation perspective on the effect of N surplus, field management and use of catch crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 255. p. 1–11.
- Novotny, E. H. et al. (2015). Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use - a critical review. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, [s.l.], v. 39, n. 30 2, p.321-344, abr. 2015. Fap UNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcs20140818>>. Acesso em: Mai, 2019.
- Oertli, J.J. (1980). Controlled release fertilizers. *Fert. Res.*, 1: 103-123. Zurich.
- Olson, R. A.; Kurtz, L. T. (1982). Crop Nitrogen requirements, utilization, and fertilization. In: Stevenson, F. J. (ed.). *Nitrogen in Agricultural Soils*. *Agronomy*, nº 22, p. 567-604.
- Paulus, G.; Muller, A.M.; Barcellos, L.A.R. (2000). *Agroecologia aplicada: práticas e métodos para uma agricultura de base ecológica*. Porto Alegre: EMATER/RS. p. 86.
- Pescarmona, P. P. (2003). An exploration of Silsesquioxanes and Zeolites using High-Speed experimentation. *Universita di Torino* (PhD).
- Polat, E. Mehmet K, O. N. A. (2004). 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.
- Quadros, F. L. F.; Bandinelli, D. G. (2005). Efeitos da adubação nitrogenada e de sistemas de manejo sobre a morfogênese de *Lolium multiflorum* Lam. e *Paspalum urvillei* Steud. em ambiente de várzea. *Revista Brasileira de Zootecnia*, n.34, n.1, p.44-53.
- Rao, A.C.S.; Smith, J.L.; Parr, J.F. & Papendick, R.I. (1992). Considerations in estimating nitrogen recovery efficiency by the difference and isotopic dilution methods. *Fert. Res.*, 33:209-217.

Reddy, D. D.; Sharma, K. L. (2000). Effect of amending urea fertilizer with chemical additives on ammonia volatilization loss and nitrogen-use efficiency. *Biology and Fertility of Soils*, v. 32, p. 4-27.

Reetz, H.F. (2017). Fertilizantes e o seu uso eficiente. International Fertilizer Industry Association, Paris.

Resende, N. G. A. M.; Monte, M. B. M.; Paiva, P. R. P. (2008). Zeolitas Naturais. Rochas e Minerais Industriais – CETEM/2008, 2a Edição.

Rodrigues, M. A. (1995). Influência da fertilização mineral orgânica na cultura da batata. Eficiência na utilização do azoto. Tese de mestrado em Nutrição Vegetal, Fertilidade dos Solos e Fertilização. ISA/UTL, Lisboa, p. 184.

Rodrigues, M. A. (2000): Gestão do azoto na cultura da batata. Estabelecimento de indicadores do estado nutritivo das plantas e da disponibilidade do azoto no solo. Tese de doutoramento, UTAD, Vila Real, p. 277.

Rodrigues, M. A. (2005). Utilização de fertilizantes e qualidade de produtos vegetais: o problema dos nitratos. Curso Qualidade e Segurança Alimentar em Produtos de Origem Vegetal, 17-22.

Rodrigues, M. A.; Coutinho, J. F. (2000). Eficiência de utilização do azoto pelas plantas. Edição: Instituto Politécnico de Bragança. ISBN: 972-745-053-9.

Rosa, R. da S.; Messias, R. A.; Ambrozini, B.; Rezende, M. O. de O. (2003). Importância da compreensão dos ciclos biogeoquímicos para o desenvolvimento sustentável. Instituto de Química de São Carlos, São Carlos, SP.

Santana, C. R.; Barros, N. F.; Neves, J. C. L. (2002). Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus aaligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. *R. Árvore*, Viçosa-MG, v.26, n.4, p.447-457.

Santos, J. L. S. (2013). Biocarvão como condicionador da fertilidade e da microbiota de solo de Cerrado cultivado com soja. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. p. 102.

Santos, J. Q. (1991). Fertilização - Fundamentos da Utilização dos Adubos e Corretivos. Publicações Europa-América, Mem Martins, Lisboa. p.442.

Santos, J. Q. (2001). Fertilização e Ambiente: Reciclagem agro-florestal de resíduos e efluentes. Europa-América, Lda. Edição n.º:137053/7621. Mem Martins-PT.

Santos, J. Q. (2015). Fertilização-Fundamentos agroambientais da utilização dos adubos e corretivos. Service Point.

Santos, M. C. R., Pacheco, D. M., Santana, F. J. P. e Rodrigues, A. M. F. (2005). A eutrofização das lagoas das Sete Cidades e Furnas (S. Miguel – Açores). Análise evolutiva entre 1988 e 2002. Associação portuguesa dos recursos hídricos.

Schröder, J.J., VanDijk, W., DeGroot, W.J.M. (1996). Effects of cover crops on the nitrogen fluxes in a silage maize production system. *Neth. J. Agron. Sci.* 44, 293–315.

Sengik, E.; Albuquerque, K. P. (2003). Os colóides do solo. Nupel, 18p. Disponível em: <<http://www.nupel.uem.br/coloides-2003.pdf>>. Acesso em: Mar, 2019.

Shaviv, A. Controlled release fertilizers. In: IFA International Workshop On Enhanced-Efficiency Fertilizers, 2005, Frankfurt. Proceedings... Paris, International Fertilizer Industry Association, 2005. p.1-15.

Silva, D. L. (2018). Efeito da aplicação de condicionadores do solo na biodisponibilidade de metais pesados. Dissertação (mestrado). Escola Superior Agrária - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança-PT. p. 93.

Soares, J. R.; Cantarella, H.; Menegale, M. L. C. (2012). Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 52, p. 82-89.

Steenbjerg, F.; Jakobsen, S. T. (1963). Plant nutrition and yield curves. *Soil Science*, v. 95, p. 69-88.

Stevenson, F. J. (1986). *Cycles of Soil. Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients.* John Wiley & Sons, New York. 380 pp.

Taiz, L.; Zeiger, E. (2013). Nutrição Mineral. In: \_\_\_\_\_. *Fisiologia vegetal.* Porto Alegre: Artmed, 2013. p.107-130.

Thorup-Kristensen K. (1993). Root development of nitrogen catch crops and of a succeeding crop of broccoli. *Acta Agric. Scand., Sect. B, Soil Plant Sci.* 43, 58–64.

Thorup-Kristensen K. (1994). Effect of nitrogen catch crop species on the nitrogen nutrition of succeeding crops, *Fert. Res.* 37, 227– 234.

Thorup-Kristensen K. (2001). Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured?. *Plant and Soil* 230: 185–195.

Thorup-Kristensen, K.; Dresbøll, D.B. (2010). Incorporation time of nitrogen catch crops influences the N effect for the succeeding crop. *Soil Use Manage.* 26, 27–35.

Thorup-Kristensen, K., Magid, J., Jensen, L.S. (2003). Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy* 79, 227 e 302.

Tisdale, S. L.; Nelson, W. L.; Beaton, J. D. (1985). *Soil Fertility and Fertilizers.* 4<sup>a</sup> ed., Macmillan Publishing Company, New York, 754 p.

Trenkel, M. E. (2007). *Ullmann's Agrochemicals. Fertilizers*, 3 (Chap. 4.4 and 4.5). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim.

Trenkel, M. E. (2010). Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient efficiency in agriculture. 2nd ed. International Fertilizer Industry Association, pg. 163. Pais.

Tyler, K. B. Bishop J. C. (1983). Efficiency of nitrogen uptake by potatoes. Pg.261-269. Portugal.

Valkama, E.; Lemola, R.; Kankanem, H.; Turtola, E. (2015). Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 203. p. 93–101.

Varenes, A. (2003). *Produtividade dos solos e Ambiente*. Escolar Editora.

Villalba, H. A. G.; Leite, J. M.; Otto, R.; Trivelin, P. C. O. (2014). Fertilizantes nitrogenados: Novas tecnologias. *Informações Agronômicas* Nº 148 – Dez. p. 10.

Walinga, I.; Van Vark, W.; Houba, V. J. G; Van Der Lee, J. J. (1989). *Soil and Plant analysis. Part 7 Planta analysis*. Department of soil science and plant nutrition.

Wild, A. (1988). Plant nutrients in soil: Nitrogen. In: Wild, A. (ed.). *Russell's Soil Conditions & Plant Growth*. 11<sup>a</sup> ed., Longman Scientific & Technical, New York, 652 - 694 p.

Wiesmann, U., Choi, I.S. e Dombrowski (2007) *Fundamentals of Biological Wastewater Treatment*. 1<sup>o</sup> edição, Wiley-VCH Verlag GmGH & Co. KGaA, Weinheim.

Yamada, T.D. Abdalla, S.R.S. (2000). Como melhorar a eficiência da adubação nitrogenada do milho. *Informações Agronômicas*, 91. P. 5. Potafos. Piracicaba.

Zhang, H. (2014). *Biochar Effects on Soil Microbial Biomass and Activity*. 2014. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doctor Of Philosophy In Land Resource Science, The University Of Guelph, Guelph, Ontario, Canada.

Zwieten, V. L.; Kimber, S.; Morris, S.; Chan, K. Y.; Downie, A.; Rust, J.; Joseph, S.; Cowie, A. (2010). Effect of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327: 235-246.