

**APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES DE LIBERTAÇÃO LENTA E
CONTROLADA DE NUTRIENTES EM CASTANHEIRO**
(Castanea sativa Mill.)

Leonardo Bomfim Belotto

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

Prof. Manuel Ângelo Rosa Rodrigues - IPB

Coorientação

Prof.^a Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues - IPB

Prof. Luis Cesar Cassol – UTFPR

Bragança

2022

LEONARDO BOMFIM BELOTTO

APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES DE LIBERTAÇÃO LENTA E
CONTROLADA DE NUTRIENTES EM CASTANHEIRO

(*Castanea sativa* Mill.)

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^ª. Dra. Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues.

Prof Dr. Luis Cesar Cassol.

BRAGANÇA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo Dom da Vida, pelas infinitas bênçãos derramadas em minha vida, desde meu nascimento até os dias de hoje, guiando e abençoando meus passos, pensamento e atitudes.

Agradeço aos meus amados pais, Verlani Roque Belotto e Eni Conceição Bomfim Belotto, e ao meu irmão Diego Bomfim Belotto, pelo amor incondicional, apoio, dedicação, compreensão, educação, colaboração e incentivo, sempre acreditando em meus sonhos e potencializando-os para minha realidade, nunca deixando que me faltasse nada, principalmente o amor, fazendo de tudo para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Agradeço minha namorada Juliana Aparecida Marchetti, pelo companheirismo e amor durante todo esse processo. Por ter sonhado comigo que somos capazes de buscar nosso melhor.

Agradeço aos meus orientadores, Professor Dr. Manuel Ângelo Rosa Rodrigues, Professora Dra. Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues e Professor Dr. Luis Cesar Cassol, pela paciência em transmitir e auxiliarem meu processo de aprendizagem, e acima de tudo pelo apoio, disponibilidade e conselhos para conclusão desta dissertação.

Agradeço a equipe técnica do laboratório de Solos do IPB, por todo o suporte e disponibilidade para realização das análises, em especial Rita Diz, Ana Pinto, David Carvalho e Soraia Raimundo.

Agradeço as instituições idealizadoras: Instituto Politécnico de Bragança e Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade em participar do programa de mestrado e dupla diplomação, estudando fora do meu país de origem e contribuindo para meu crescimento.

Agradeço pelo apoio emocional de todos meus familiares, em especial meus tios, tias, madrinhas, primos, primas e afilhados.

Agradeço a todos meus amigos e colegas que durante toda minha trajetória acadêmica estiveram comigo, fisicamente e espiritualmente.

RESUMO

O castanheiro europeu (*Castanea sativa* Mill.) é uma espécie da família Fagaceae que está vastamente distribuída na Terra Fria Transmontana. Portugal está entre os 10 maiores produtores mundiais do fruto, ocupando a sétima posição com 42 180 toneladas no ano de 2020. Atualmente a espécie vêm apresentando diversos problemas fitossanitários que estão comprometendo sua produtividade, deixando os produtores com maiores cuidados na condução, buscando também a uma fertilização adequada que atenda a demanda das plantas, adotando fertilizantes de síntese industrial mais elaborados. O presente estudo visa avaliar os efeitos da aplicação de fertilizantes de liberação lenta e controlada de nutrientes no solo em comparação com uma modalidade testemunha não fertilizada. Foram selecionadas 20 árvores com tamanho de copa equivalente, sorteadas em cinco grupos (tratamentos) com quatro árvores individuais (repetições) por grupo, em delineamento experimental inteiramente casualizado. Os tratamentos consistiam nos fertilizantes BoskGrow 20:05:20 (duração 3 meses), Exactyon 18:05:13_3m (duração 3 meses), Exactyon 18:05:12_6m (duração 6 meses) e Humix 12:03:05 (com componente orgânica) e Testemunha. Aplicaram-se 4 kg de fertilizante por árvore anualmente (2019, 2020, 2021). Amostras de folhas e frutos foram colhidas todos os anos e amostras de solos foram colhidas no primeiro (geral) e último (por tratamento) anos. Quando não fertilizado o castanheiro apresentou concentrações baixas de nutrientes nas folhas e nos frutos. O fertilizante BoskGrow 20:05:20 assegurou boa produtividade acumulada e originou maiores concentrações de nitrogênio e potássio nas folhas. O tratamento com o fertilizante Exactyon 18:05:13_3m, foi o que deu origem a maior acúmulo de nitratos no solo. O fertilizante Exactyon 18:05:12_6m aparentemente disponibilizou menos nitrogênio para as plantas, tendo originado uma produtividade acumulada equivalente à testemunha. O fertilizante orgânico Humix 12:03:05 assegurou produtividade equivalente a BoskGrow 20:05:20 e Exactyon 18:05:13_3m embora com menores concentrações de nitrogênio nas folhas e níveis de nitrogênio biodisponível no solo.

Palavras chave: fertilizantes de liberação lenta; fertilizantes de liberação controlada; fertilizante orgânico; fertilidade do solo.

ABSTRACT

European chestnut (*Castanea sativa* Mill.) is a species of the Fagaceae family that is widely distributed in the Terra Fria Transmontana, Northeast Portugal. Portugal is among the 10 largest producers of the fruit in the world, occupying the seventh position with 42,180 t in 2020. Currently, the species has been presenting several phytosanitary problems that are compromising its productivity, leading producers to take greater care in crop management, seeking also for an adequate fertilization that meets the demand of the plants and resorting to more elaborate industrial synthesis fertilizers. The present study aims to evaluate the effects of applying slow- and controlled-release fertilizers in comparison with an unfertilized control. Twenty trees with equivalent crown size were selected, randomly assigned to five groups (treatments) with four individual trees (replications) per group, in a completely randomized design. The treatments consisted of the fertilizers BoskGrow 20:05:20 (duration 3 months), Exactyon 18:05:13_3m (duration 3 months), Exactyon 18:05:12_6m (duration 6 months) and Humix 12:03:05 (with organic component) and control. The rate of fertilizers was 4 kg per tree and year (2019, 2020, 2021). Leaf and fruit samples were taken every year and soil samples were taken in the first (general) and last (per treatment) years. In the control treatment, the chestnut tree presented low leaf and fruit nutrient concentrations. The BoskGrow 20:05:20 fertilizer ensured good accumulated productivity and resulted in higher concentrations of nitrogen and potassium in the leaves. The treatment with Exactyon 18:05:13_3m fertilizer gave the greatest accumulation of nitrates in the soil. The Exactyon 18:05:12_6m fertilizer apparently made less nitrogen available to the plants, resulting in an accumulated productivity equivalent to the control. Organic fertilizer Humix 12:03:05 ensured yields equivalent to BoskGrow 20:05:20 and Exactyon 18:05:13_3m although with lower leaf nitrogen concentrations and low levels of soil nitrogen bioavailability.

Keywords: slow-release fertilizers; controlled-release fertilizers; organic fertilizer; soil fertility.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1. Agricultura sustentável	10
2.2. Fertilização e poluição ambiental	11
2.2.1 Fertilizantes como fontes poluidoras.....	13
2.3. Fertilizantes de liberação gradual de nutrientes	15
2.3.1. Fertilizantes de eficiência aprimorada	15
2.3.2. Fertilizantes de liberação controlada de nutrientes.....	15
2.3.3. Fertilizantes de liberação lenta de nutrientes.....	17
2.3.4. Estudos sobre fertilizantes de eficiência aprimorada	18
2.4. A cultura do castanheiro	19
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. Caracterização do local	21
3.2. Delineamento experimental	22
3.3. Coleta de amostras	23
3.3.2. Análises de solos	25
3.3.3. Análises de tecidos vegetais	28
3.3.4. Análise estatística	29
4. RESULTADOS	30
4.1. Concentração de nutrientes nas folhas	30
4.2. Avaliação da intensidade da cor verde das folhas	38
4.3. Concentração de nutrientes nos frutos	39
4.3.1. Concentração de nutrientes no miolo	39
4.3.2. Concentração de nutrientes na casca	42
4.4. Produtividade das árvores e calibre da castanha	44
4.5. Propriedades do solo	45
5. DISCUSSÃO	49
6. CONCLUSÕES	54
7. REFERÊNCIAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Normal climatológica da região e registos meteorológicos durante o período experimental.	21
Figura 2. Aparelho SPAD-502 no momento em que se realizava uma leitura na folha do castanheiro.	24
Figura 3. Concentração de nitrogênio (N) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos fertilizantes. **, ***diferenças significativas para $P < 0,01$ e $P < 0,001$, respetivamente. As barras verticais são o erro padrão das médias.	31
Figura 4. Concentração de fósforo (P) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. * diferenças significativas para $P < 0,05$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.	31
Figura 5. Concentração de potássio (K) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. ** diferenças significativas para $P < 0,01$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.	32
Figura 6. Concentração de cálcio (Ca) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. ** diferenças significativas para $P < 0,01$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.	33
Figura 7. Concentração de magnésio (Mg) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.	33
Figura 8. Concentração de boro (B) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. **, *** diferenças significativas para $P < 0,01$ e $P < 0,001$. As barras verticais são o erro padrão das médias.	35
Figura 9. Concentração de ferro (Fe) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. * diferenças significativas para $P < 0,05$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.	35
Figura 10. Concentração de manganês (Mn) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. *, **, ***diferenças significativas para $P < 0,05$, $P < 0,01$ e $P < 0,001$. As barras verticais são o erro padrão das médias.	36
Figura 11. Concentração de zinco (Zn) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. ** diferenças significativas para $P < 0,01$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.	37

Figura 12. Concentração de cobre (Cu) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. ** diferenças significativas para $P < 0,01$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.	37
Figura 13. Produtividade da castanha em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes (Exactyon 18:05:13_3m, Exactyon 18:05:12_6m, BoskGrow 20:05:20, Humix 12:03:05, e Testemunha (não fertilizada)). As diferenças significativas são apresentadas para * $\alpha < 0,05$, ** $\alpha < 0,01$ e *** $\alpha < 0,001$, e ns, para as diferenças não significativas. As barras de erro são o desvio padrão das médias.	44
Figura 14. Calibre dos frutos da castanha em função do ano de amostragem e dos tratamentos fertilizantes. Para cada um dos anos, a mesma letra sobre as colunas indica que não se registaram diferenças significativas para $P < 0,05$. As barras verticais são o erro padrão das médias.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores SPAD nas folhas do castanheiro em função dos tratamentos fertilizantes nos três anos de estudo.	38
Tabela 2. Concentração de macronutrientes no miolo da castanha em função dos tratamentos fertilizantes nos anos de estudo 2019 e 2021.....	40
Tabela 3. Concentração de micronutrientes no miolo da castanha em função dos tratamentos com fertilizantes nos anos de estudo 2019 e 2021.....	41
Tabela 4. Concentração de macronutrientes na casca da castanha em função dos tratamentos fertilizantes nos anos de estudo 2019 e 2021.....	42
Tabela 5. Concentração de micronutrientes na casca da castanha em função dos tratamentos com fertilizantes nos anos de estudo 2019 e 2021.....	43
Tabela 6. Teores médio de carbono (C) orgânico, pH (H ₂ O), pH (KCl), fósforo e potássio extraíveis em amostras de solo colhidas em 2021 na camada 0,0-0,2 m em função dos tratamentos fertilizantes.....	46
Tabela 7. Bases do complexo de troca, acidez de troca e capacidade de troca catiónica (CTC), em amostras de solo colhidas em 2021 na camada 0,0-0,2 m em função dos tratamentos fertilizantes.....	47
Tabela 8. Concentração de micronutrientes em amostras de solo colhidas em 2021 na camada 0,0-0,2 m em função dos tratamentos fertilizantes.....	48
Tabela 9. Concentração de amônio (NH ₄ ⁺), obtido por extração com KCl a quente (Q) e a frio (F) e NH ₄ ⁺ hirolisável (H) e concentração de nitrato (NO ₃ ⁻) em amostras de solo colhidas em 2021 na camada 0,0-0,2 m em função dos tratamentos fertilizantes.....	49

1. INTRODUÇÃO

O castanheiro (*Castanea sativa*) é uma espécie da família Fagaceae que está vastamente distribuída na Terra Fria Transmontana (Cardoso e Pereira, 2007). Nos últimos 10 anos a Europa apresentou 8,8 % na participação na produção de castanha no mundo, sendo a Ásia com 87,5% e as Américas com 3,7%. Durante esses anos, Portugal esteve entre os 10 maiores produtores do fruto, ocupando a sétima posição. No ano de 2020 obteve a produção média de 42 180 mil toneladas em uma área de 51 700 mil hectares (FAOSTAT, 2022). A produção de castanha em Portugal concentra-se na região Norte, sendo a mesma responsável por mais de 80% da produção do país (Estatísticas Agrícolas, 2016).

Atualmente a espécie apresenta diversos problemas fitossanitários, que podem comprometer a produtividade das culturas. Pode-se citar como as ameaças mais críticas a tinta do castanheiro (*Phytophthora canelae* Rand e *Phytophthora cambivora* (Petri) Buisman), cancro-do-castanheiro (*Cryphonectria parasitica* (Murrill) Barr) e a vespa-da-galha-do-castanheiro (*Dryocosmus kuriphilus* Yasumatsu) (Gouveia, 2020; Murolo et al. 2019; Gençer e Mert 2019).

Arrobas et al., (2018), mostram que os agricultores em Portugal, estimulados pelo rendimento econômico da castanha, estão implantando e renovando pomares com até mesmo sistemas intensivos de produção em compasso de 8 m x 8 m ou menores, tomando cada vez mais atenção na poda e fertilização, além da adoção da colheita mecanizada.

Considerando que o castanheiro sempre foi uma cultura marginal e com isso pouco fertilizada, nos últimos tempos passaram a ter mais atenção e receber aplicações de fertilizantes de síntese industrial mais elaborados (Arrobas et al., 2017). Nessa abordagem podemos inserir o uso de fertilizantes de liberação gradual de nutrientes que podem aumentar a oportunidade de absorção nutrientes pelas plantas e até mesmo reduzir as perdas para o meio ambiente que os adubos convencionais propiciam. Os fertilizantes que retardam o tempo de disponibilidade de nutrientes podem reduzir o risco de serem perdidos por lixiviação e volatilização.

Neste contexto o presente estudo visa avaliar os efeitos da aplicação de fertilizantes de liberação lenta e gradual de nutriente no solo em comparativo com um fertilizante orgânico.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Agricultura sustentável

O termo Agricultura Sustentável é amplamente discutido e abordado em diversos momentos como uma perspectiva comum para o futuro seguro da humanidade. Edwards et al. (1990) já apresentam em seu livro dois pontos de referência conceituais para a definição deste tipo de agricultura, mostrando suas tendências evolutivas e representando diferentes espectros de pensamento.

O primeiro ponto é colocado em 1980, onde surgiram conceitos de agricultura regenerativa e a articulação de uma agricultura sustentável (Edward set al., 1990). O conceito inicial era relacionado com uma agricultura baseada em princípios de interação ecológica, podendo também ser referido a uma definição ecológica de sustentabilidade. Conceito o qual forma a base filosófica até a atualidade para a maioria das vertentes agrícolas. O segundo ponto de referência é ascensão na utilização do termo sustentável, iniciando em 1987, para referir-se a uma agricultura estável, não deixando de lado a interação com a sociedade (Edwards et al., 1990).

É importante citar também uma definição consensual de agricultura sustentável, dada por Francis e Youngberg (1994), que consideram a agricultura sustentável baseada em três funções: produzir bens e serviços; gerir o território; e desempenhar um papel no mundo rural. Zahm et al. (2020) propõem a concepção de uma exploração agrícola sustentável abordada por Landais (1998), onde a exploração agrícola deve ser viável, habitável, transferível e reproduzível.

A viabilidade é vista como a eficiência do sistema de produção agrícola em garantir fontes de rendimento, considerando as oscilações do mercado. A habitabilidade envolve a análise da atividade desenvolvida, tendo ou não potencial para fornecer uma vida digna ao proprietário. A transferibilidade e reprodutibilidade são entendidos como a avaliação dos indicadores de riscos para o ambiente associado à prática agrícola (Zahm et al., 2020; Landais, 1998).

Gras et al. (1989) estabeleceram que os indicadores estão combinados em três dimensões. A primeira é uma abordagem sistêmica de forma única aos aspectos

econômicos, ambientais e sociais da agricultura. A segunda é visualizada na forma temporal e espacial, avaliando os efeitos que podem ocorrer no decorrer da atividade a curto, médio e longo prazo. E, por último, a questão ética, onde a sustentabilidade se baseia em um sistema de valores de conservação dos recursos naturais.

O desenvolvimento sustentável foi definido no *Relatório de Brundtland*, (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas, 1988) como modo de desenvolvimento que atenda às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades, comprometendo diretamente as questões agrícolas.

2.2.Fertilização e poluição ambiental

O desenvolvimento da agricultura no século passado, além das novas tecnologias, contou com uma maior entrada de fertilizantes, água e pesticidas. A produção agrícola por unidade de área aumentou muito, permitindo o aumento das populações e promovendo o desenvolvimento econômico (Zhang et al., 2015). Os custos associados ao desenvolvimento agrícola resultaram na aplicação excessiva de fertilizantes e pesticidas, que levaram a eutrofização das águas subterrâneas, poluição do ar, degradação da qualidade do solo e até mesmo mudanças nos ecossistemas, levantando questões sobre a sustentabilidade da agricultura moderna (Tilman et al., 2002; Khan et al., 2008; Wen et al., 2016).

Os solos fornecem uma ampla gama de serviços ecossistêmicos que atendem as necessidades humanas. A principal demanda que tem sobre os solos é para os serviços de abastecimento, onde se encontra a questão da produção de alimentos. Com o crescimento populacional, a produção de alimentos deve aumentar, exercendo uma pressão maior sobre os solos (Kopettik, 2019).

O valor dos serviços ecossistêmicos fornecidos pelos solos é estimado em US\$ 11,4 trilhões (McBratney et al., 2017). É fundamental reconhecer a grande diversidade na natureza desses serviços ecossistêmicos. Há serviços que fornecem benefícios facilmente mensuráveis e imediatos para os seres humanos, como exemplo o fornecimento de alimentos que podem ser conhecidos como serviços de provisionamento. Já outros

fornecem serviços menos tangíveis, com benefícios de longo prazo, como por exemplo a regulamentação de dióxido de carbono como gás de efeito estufa através da estabilização do carbono nos solos como matéria orgânica (Kopettik, 2019).

Os agroquímicos, que correspondem aos fertilizantes e pesticidas, tornaram-se parte integrante da agricultura moderna, sendo indispensáveis para incrementar a produtividade das culturas (Alix e Capri, 2018). Khan et al. (2018) consideram que foi o crescimento exponencial da população que induziu o uso de produtos químicos para produzir mais alimentos para as pessoas. Contudo, a aplicação prolongada de fertilizantes químicos acarreta na deterioração da saúde do solo juntamente com a poluição ambiental (Patnaik, 2010).

O solo contém matéria orgânica, a qual é determinante para a manutenção da fertilidade química, física e biológica. A matéria orgânica contribui para o aumento da capacidade de retenção de água no solo, reserva de nutrientes, capacidade de troca catiónica, entre outras funções importantes do solo. No entanto, de um modo geral, os processos de cultivo resultam na perda da matéria orgânica do solo. Koppitke et al. (2017) apontam que o uso dos solos para cultivo agrícola a longo prazo reduz os estoques de carbono orgânico do solo em 30% a 60%, diminuindo a sua fertilidade e tornando-os cada vez mais dependentes da aplicação de fertilizantes.

Na atualidade, pode dizer-se que a produção mundial de alimentos é alcançada devido a aplicação de fertilizantes contendo nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio. Estima-se que só os fertilizantes nitrogenados terão contribuído em 30 a 50% para o aumento da produção agrícola à escala mundial (Stewart et al., 2005).

O Regulamento (UE) 2019/1009 do parlamento europeu, define um produto fertilizante como uma substância, mistura, microrganismo ou qualquer outro material, aplicado ou destinado a ser aplicado em plantas ou na sua rizosfera ou em cogumelos ou na sua micosfera, ou destinado a constituir a rizosfera ou micosfera, isoladamente ou misturado com outro material, com o objetivo de fornecer nutrientes às plantas ou aos cogumelos ou melhorar a sua eficiência nutricional.

Os fertilizantes são considerados por Xiang et al. (2008) como insumos vitais para a sustentabilidade e desenvolvimento da produção agrícola e desempenham um importante papel na segurança alimentar. A suplementação de nutrientes para as plantas a partir dos fertilizantes químicos é a chave para aumentar a produção agrícola.

2.2.1 Fertilizantes como fontes poluidoras

Na agricultura, os fertilizantes de ureia são utilizados como suplementos de nitrogênio para o crescimento das plantas (Beig et al., 2020). O uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados pode levar a emissões de amônia e óxido de nitrogênio para a atmosfera, o que causa danos à camada de ozônio (Zhang, 2017). Os fertilizantes nitrogenados contribuem também para o acúmulo de nitratos no solo, resultando na salinização e acidificação da terra (Wang, 2002). A acidificação acelera a lixiviação de cálcio e magnésio e diminui a saturação por bases, bem como a fertilidade geral do solo (Jin, 2018).

De acordo com Elhanafi et al. (2019), a adubação com quantidades elevadas de nitrogênio tem consequências ecológicas, pois o excesso de nitratos liberados no meio ambiente pode causar poluição das águas superficiais e subterrâneas, eutrofização, acidificação do solo, poluição do ar, mudanças climáticas, entre outros. As plantas não conseguem absorver todo o nitrogênio quando aplicado em excesso, aumentando a suscetibilidade de perdas devido aos processos referidos (Sapkota et al., 2020).

As formas de nitrogênio presente no solo disponíveis para as plantas são NO_3^- (nitrato) e NH_4^+ (amônio) (Hester et al., 1996). O nitrato é completamente solúvel em água e é propenso a ser lixiviado, com carga negativa é repelido por superfícies também de cargas negativas, como a matéria orgânica do solo e os minerais argilosos. Assim, o nitrato é dissolvido na solução do solo e se move livremente pelo perfil do solo com ação da chuva ou irrigação (Gianquinto et al., 2013).

Fageria et al. (2011) expõem que a lixiviação de nitratos ocorre quando o nitrogênio nítrico não é absorvido pelas plantas ou imobilizado pelos microrganismos, podendo ficar livre na solução do solo. Associam-se as perdas diretamente com a quantidade de água que percola no perfil do solo, doses de fertilizantes aplicados, frequência de chuvas e irrigação, demanda e absorção de nitrogênio pelas plantas, textura do solo (solos arenosos e rasos são mais propícios). Embora o nitrato em si não seja tóxico, a sua presença nas águas subterrâneas pode afetar a população humana, sendo um ânion que pode ser microbiologicamente reduzido no trato gastrointestinal para nitrito que é tóxico (Vieira, 2017).

A volatilização de amônia é a perda de nitrogênio na forma de NH_3 , que envolve reações químicas, biológicas e processos físicos que transportam o NH_3 do solo para a atmosfera (Tisdale et al., 1985). A amônia perdida por volatilização pode ser proveniente tanto do fertilizante aplicado quanto da mineralização da matéria orgânica (Vieira, 2017). Os fatores que potencializam a emissão de NH_3 para atmosfera são: quando os fertilizantes são constituídos principalmente de ureia e outras fontes amoniacais; quando aplicados em superfície, sem que haja incorporação; solos alcalinos; presença de resíduos orgânicos em decomposição na superfície; solos encharcados ou muito secos; e temperaturas elevadas (Vieira, 2017).

Também o óxido nitroso (N_2O) desempenha um papel importante na química da estratosfera e nas mudanças climáticas regionais e globais (IPCC 2013). O N_2O é uma ameaça ao aquecimento global, tendo um potencial de efeito de estufa maior que o do dióxido de carbono (CO_2) (Myhre et al., 2013), sendo responsável também pela destruição do ozônio estratosférico (Ravishankara et al., 2009). A emissão de N_2O pelos solos é dada pelos processos microbianos de nitrificação e desnitrificação.

A nitrificação é a oxidação das formas amoniacais de nitrogênio (amônia e amônio - NH_3 e NH_4^+) para nitrito e nitrato (NO_2^- e NO_3^-), realizada por microrganismos autotróficos (Vieira, 2017). A desnitrificação é a redução do NO_3^- do solo aos gases N_2 e N_2O . Uma variedade de bactérias em especial heterotróficas pode desnitrificar, utilizando o NO_3^- em vez de oxigênio como um acceptor terminal de elétrons durante a respiração. Como o NO_3^- é um acceptor de elétrons menos eficiente que o oxigênio, a maioria dos desnitrificadores realiza a desnitrificação somente quando o oxigênio não está disponível (Robertson e Groffman, 2015).

2.3. Fertilizantes de liberação gradual de nutrientes

2.3.1. Fertilizantes de eficiência aprimorada

Fertilizantes de eficiência aprimorada (*enhanced efficiency fertilizers* – EEF) é um termo utilizado para formulações que controlam a liberação de nutrientes ou afetam reações que reduzem a perda de nutrientes. Os mecanismos ou produtos incluem aditivos de fertilizantes, barreiras físicas ou diferentes formulações químicas. Os aditivos de fertilizantes podem melhorar a disponibilidade de nutrientes, reduzindo as perdas de nitrogênio por volatilização, desnitrificação e lixiviação. Eles podem bloquear temporariamente os processos bacterianos ou enzimáticos na conversão de ureia em amônio ou amônio em nitrato (Hergert et al., 2011).

Os EEFs oferecem uma maneira eficaz de melhorar a eficiência de nutrientes, minimizar as perdas de fertilizantes por processos físicos, químicos e biológicos e reduzir o impacto ambiental. Os principais EEFs são: fertilizantes de liberação lenta, que liberam os nutrientes mais lentamente do que um fertilizante comum; e fertilizantes de liberação controlada, quando fatores como taxa de liberação, padrão e período de liberação podem ser controlados revestindo os grânulos dos fertilizantes por materiais diversos. O ideal é que a liberação seja mais rápida no início e mais lenta durante o cultivo, para atender às necessidades nutricionais das plantas, que muda ao longo do período de crescimento (França et al., 2019).

2.3.2. Fertilizantes de liberação controlada de nutrientes

Os fertilizantes de liberação controlada (*controlled release fertilizer* – CRF), são fertilizantes que contêm os nutrientes sem que a planta os consiga absorver imediatamente, sendo a absorção retardada após sua aplicação, de modo a fornecerem às plantas os nutrientes por mais tempo, em comparação a fertilizantes convencionais de liberação rápida por serem solúveis em água (Liu et al., 2014). Os fertilizantes convencionais não revestidos ou os fertilizantes sólidos comuns têm a limitação de que a liberação de nutrientes dos grânulos é relativamente rápida e, portanto, tornam-se vulneráveis a perdas por volatilização, lixiviação e escoamento superficial (Bhat et al.,

2011). Além disso, as plantas nas fases iniciais não podem absorver a totalidade dos nutrientes fornecidos pelo fertilizante, de modo que os nutrientes não absorvidos tendem a ser lixiviados para o lençol freático, causando eutrofização dos cursos de água e oceanos, e resultando em perdas econômicas para o produtor (Vashishtha et al., 2010).

Normalmente os CRFs são revestidos ou encapsulados com materiais inorgânicos ou orgânicos que controlam a taxa, padrão e a duração da liberação de nutrientes para as plantas. Os revestimentos são normalmente materiais semipermeáveis, materiais proteicos ou formas químicas, obtidos por hidrólise lenta de compostos solúveis de baixa massa molecular (Trenkel, 2010). A taxa de liberação dos nutrientes é geralmente condicionada e projetada ao padrão nutricional demandado pela cultura que se deseja atender.

Os CRFs apresentam um perfil de liberação de nutrientes projetados para que haja uma liberação ideal de nutrientes, ou seja, a taxa de liberação de nutrientes dos CRFs corresponde a taxa de absorção máxima de nutrientes pelas plantas, que se pode alterar dinamicamente ao longo dos estágios de desenvolvimento da planta ao longo de seu ciclo de crescimento (Irfan et al., 2018). Consequentemente, seu uso aumenta a rentabilidade da cultura enquanto a poluição ambiental é contida pela redução ou eliminação da quantidade de nutrientes aplicados de forma excessiva ao que as plantas podem absorver (Shaviv, 2001).

Por exemplo, o nitrogênio em CRF pode ser liberado com base em processos físicos. A ureia revestida com polímero é liberada à medida que os poros do revestimento são dilatados devido ao inchaço hidrofílico e à degradação do revestimento através do aumento da temperatura e entrada da solução aquosa dentro do grânulo. Os fertilizantes revestidos com polímero têm uma taxa de liberação mais controlada por meio da engenharia do tipo de espessura do revestimento e por isso são classificados como CRF (Ransom et al., 2020).

Na ureia revestida, as taxas de liberação de nitrogênio são reguladas por restrições físicas do tipo de polímero, espessura do revestimento, umidade e temperatura do solo (Halvorson et al., 2014). A temperatura é o fator que mais interfere na liberação de nitrogênio, podendo dobrar a taxa de difusão a cada 10 °C de aumento (Adams et al., 2013). Ransom et al. (2020), mostraram em seu estudo que para atender o tempo de liberação projetados, o fertilizante precisaria ser incorporado ao solo. Quando

incorporados no solo, as taxas de liberação estenderam-se por um período maior em comparação com fertilizantes aplicados na superfície, sendo compatíveis com a taxa de liberação prevista, sendo que estão protegidos da exposição a altas temperaturas do solo nu ou com camadas de palha. No entanto, nem sempre isso é possível, principalmente para culturas perenes.

2.3.3. Fertilizantes de liberação lenta de nutrientes

Os fertilizantes de liberação lenta (*slow release fertilizer* – SRF) estão associados a liberação do nutriente em uma taxa mais lenta do que o normal, mas em que a taxa, o padrão e a duração da liberação não são exatamente controlados. A taxa de liberação de um nutriente do fertilizante deve ser mais lenta do que a de um fertilizante em que o nutriente está prontamente disponível para absorção pela planta (Trenkel, 1997; Trenkel, 2010).

Em uma proposta de Trenkel (2010), aceite pelo Comitê Europeu de Normalização, para um fertilizante ser considerado de liberação lenta, a uma temperatura de 25 °C ele deve cumprir três critérios: (1) não mais de 15% do fertilizante deve ser liberado em 34 horas; (2) não mais de 75% do fertilizante deve ser liberado em 28 dias; e (3) pelo menos 75% do fertilizante deve ser liberado no tempo declarado de liberação pelo fabricante.

Os SRFs são fertilizantes em uma forma que libera, ou converte em uma forma disponível para as plantas, nutrientes em uma taxa mais lenta em relação a um produto solúvel de referência apropriado. Com relação aos CRFs, eles são projetados para fornecer nutrientes ao longo do tempo em uma taxa previsível sob condições específicas (Fertahi et al., 2020).

Liu et al. (2014) apontam como exemplo de SRFs, produtos de nitrogênio decompostos por micróbios, onde o padrão de liberação estará dependente do solo e das condições climáticas, citando ainda que podem ser naturais ou artificiais. Os SRFs naturais incluem adubos verdes, plantas de cobertura e dejetos de animais, os quais devem ser decompostos pela atividade microbiana antes que possam ser disponibilizados para a planta, ressaltando assim que quando de natureza orgânica, podem levar muito tempo até sua liberação para as plantas. Para os SRFs sintéticos, a sua disponibilidade dependerá da

umidade e temperatura do solo, apresentado normalmente concentrações de nutrientes maiores que os SRFs orgânicos.

Trenkel (2010), ressaltou como principais vantagens do uso de CRFs e SRFs, a diminuição das perdas e maior eficiência no uso de nutrientes, podendo reduzir o uso de fertilizantes em 20 a 30% da taxa recomendada de um fertilizante convencional, obtendo o mesmo rendimento. Como desvantagem pode apontar-se que, quando revestidos ou encapsulados, têm um custo consideravelmente mais elevado, devido ao processo de fabricação, do que os fertilizantes convencionais.

2.3.4. Estudos sobre fertilizantes de eficiência aprimorada

Estudos como o de Chen et al. (2018) apontam que os EFFs fornecem uma maneira eficaz de melhorar a eficiência do uso de nutrientes, minimizando as perdas por lixiviação e volatilização de fertilizantes, retardando ou mesmo controlando a liberação de nutrientes do solo. Ainda ressaltam os desafios que precisam ser considerados: a) os materiais de revestimento devem ser degradáveis e de baixo custo, tendo um processo de fabricação simplificado e econômico, afim de estimular a produção em larga escala; e b) os EFFs ideais devem atender as demandas de nutrientes das culturas durante toda a temporada por meio de uma única aplicação.

Silva et al. (2021) estudaram o uso de CRF em um olival tradicional de sequeiro em um clima mediterrâneo, avaliando qual seria a melhoria no desempenho da oliveira em comparação com um fertilizante convencional de N. Os autores não encontraram diferenças significativas entre os fertilizantes na produção do olival, contudo observaram que o CRF aumentou consistentemente o carbono orgânico do solo, acreditando que houve estímulo ao desenvolvimento da vegetação herbácea e na atividade das raízes das árvores devido a maior disponibilidade de N inorgânico.

Rodrigues et al. (2019a) avaliaram em seu estudo a fertilização do castanheiro com diferentes tipos de fertilizantes com mecanismos de proteção de nutrientes, apontando que a fertilização aumentou a matéria orgânica do solo, principalmente na camada superficial, sugerindo a realização de mais estudos de longo prazo para esclarecer

os benefícios do uso de fertilizantes de liberação lenta em árvores de grande porte como o castanheiro.

Li et al. (2017) analisaram resultados de 203 estudos publicados em diversos países até o ano de 2016 sobre os principais tipos de EEFs, designadamente: a) fertilizantes revestidos com polímero (polymer-coated fertilizer – PCF); b) inibidores da nitrificação (nitrification inhibitors - NI); c) inibidores da urease (urease inhibitors - UI); e d) inibidores duplos (urease and nitrification inhibitors combined). Os autores concluíram que os EEFs podem desempenhar um papel significativo na produção agrícola sustentável, mas seu uso prudente requer, em primeiro lugar, a eliminação de qualquer má gestão de fertilizantes, além da implementação de práticas de manejo de N baseadas no conhecimento.

Monsalve et al. (2021) realizaram um estudo com inibidores de urease e nitrificação (inibidores duplos), buscando fechar todas as possíveis rotas de escape de N. Os tratamentos que não receberam ureia com inibidores chegaram a perder mais de 57 kg ha⁻¹ de N, sendo que os tratamentos com aplicação do inibidor duplo as perdas foram significativamente menores, com um mínimo de 18,8 kg ha⁻¹ de N. Expondo assim que os inibidores duplos possuem um menor potencial de perdas e menores consequências no aquecimento global.

2.4.A cultura do castanheiro

O castanheiro europeu (*Castanea sativa* Mill.) foi incluído ao género *Castanea* em 1768, pelo botânico inglês Phillip Miller. A espécie *Castanea sativa* pertence à família Fagaceae e ao género *Castanea*. A família Fagaceae constitui-se por oito géneros e abrange em torno de mil espécies, destacando-se os géneros *Fagus*, *Quercus* e *Castanea* (Laranjo et al., 2009). Dentro do género *Castanea* destacam-se as espécies *Castanea sativa* Miller, *Castanea crenata* Siebold & Zucc, *Castanea molíssima* Blume e *Castanea dentata* (Marsh.) Borkh, sendo denominadas e conhecidas de acordo com o local de origem, como *Castanea sativa* Miller por castanha-portuguesa, *Castanea crenata* Siebold & Zucc por castanha-japonesa, *Castanea molíssima* Blume por castanha-chinesa e *Castanea dentata* (Marsh.) Borkh por castanha-americana.

A espécie *Castanea sativa* é uma árvore cuja ocorrência está intimamente ligada à atividade humana. Como para a maioria das plantas afetadas por atividades humanas, os dados de pólen por si só muitas vezes não são suficientes para avaliar o tempo, os meios e a motivação para sua disseminação (Conedera et al., 2004). Contudo, é provável que o castanheiro seja originário do continente asiático, tendo a China como centro de dispersão geográfica, onde se encontra a maior diversidade genética do castanheiro (Abreu, 2007), migrando e adaptando-se para diferentes regiões do globo, resultando em 13 espécies distintas dentro do género *Castanea* (Laranjo et al., 2009).

O castanheiro europeu tem sua origem na Grécia e Sul de Itália (Agustí, 2010) que, através da expansão dos romanos, se estendeu a Espanha, França e Portugal. Cultiva-se em Portugal a *Castanea sativa*, a qual está vastamente distribuída na Terra Fria Transmontana e nas Beiras (Cardoso e Pereira, 2007). Durante determinados períodos históricos, em várias regiões da Europa o cultivo da castanha tornou-se tão dominante e indispensável à sobrevivência das populações das regiões montanhosas que alguns autores identificam essas culturas como civilizações do castanheiro (Gabielli, 1994). É uma árvore angiospérmica, dicotiledónea, monóica, que pode atingir até 30 metros de altura, com uma copa semiesférica com amplas ramificações. A frutificação do castanheiro inicia-se aos 6 anos, atinge produção plena aos 10 anos e mantém a produção até 70 anos. A partir dessa idade tende a decrescer com o passar dos anos (Paiva, 2007).

Historicamente, durante os anos de 1961 a 2020, a maior produção mundial de castanha foi registada no continente Asiático, concentrando este 76,7% da produção mundial, seguido da Europa com 19,8% e das Américas com 3,5%. Portugal está dentre os dez maiores produtores mundiais, ocupando a oitava posição, sendo os países ocupantes das primeiras posições China, Itália, Turquia, Coreia do Sul, Bolívia, Espanha e Japão, seguido de Portugal, França e Grécia. Considerando apenas o ano de 2020, a posição dos países segue a ordem China (1.743.354 t), Espanha (188.690 t), Bolívia (80.882 t), Turquia (76.045 t), Coreia do Sul (54.352 t), Itália (49.750 t), Portugal (42.180 t), Grécia (34.080 t), Japão (16.900 t) e Coreia do Norte (12.363 t) (FAOSTAT, 2021).

De acordo com o Instituto Nacional de Estatísticas (INE, 2021), a área cultivada com castanheiros no ano de 2020 totalizou 51.699 ha, com uma produção de 42.183 t. Desses, cerca de 45.348 ha, com produção de 33.423 t (aproximadamente 87,7% e 73,7%, respectivamente) encontram-se na região Norte do país. A maior produção concentrada

ao norte é devida às condições edafoclimáticas favoráveis ao desenvolvimento do castanheiro.

Em Portugal existem áreas com Denominação de Origem Protegida (DOP) que visam estabelecer a qualidade de um produto e preservá-lo. Em sentido amplo, DOP atribui-se a um produto agrícola ou a um género alimentício originário de uma dada região à qual a qualidade e suas características estarão ligadas, tendo em conta sobretudo o meio geográfico em que elas se encontram. Para as castanhas portuguesas há quatro DOP, sendo elas: Padrela; Terra Fria; Soutos da Lapa; e Marvão-Portalegre (Couto, 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do local

O ensaio de campo decorreu durante três anos, entre 2018 e 2021. O campo experimental foi instalado em Carragosa (41°52'31.3"N 6°47'34.4"W, 800 m de altitude), no concelho de Bragança, Nordeste de Portugal, num soto da cultivar Longal, de 40 anos de idade e instalado num compasso 10 m × 10 m. De acordo com a classificação Köppen-Geiger, o clima é do tipo Csb, de características mediterrânicas com verão quente. A temperatura média anual é de 12.3 °C e a precipitação anual de 758.3 mm. Os registos meteorológicos durante o período experimental e os dados da normal climatológica são apresentados na Figura 1.

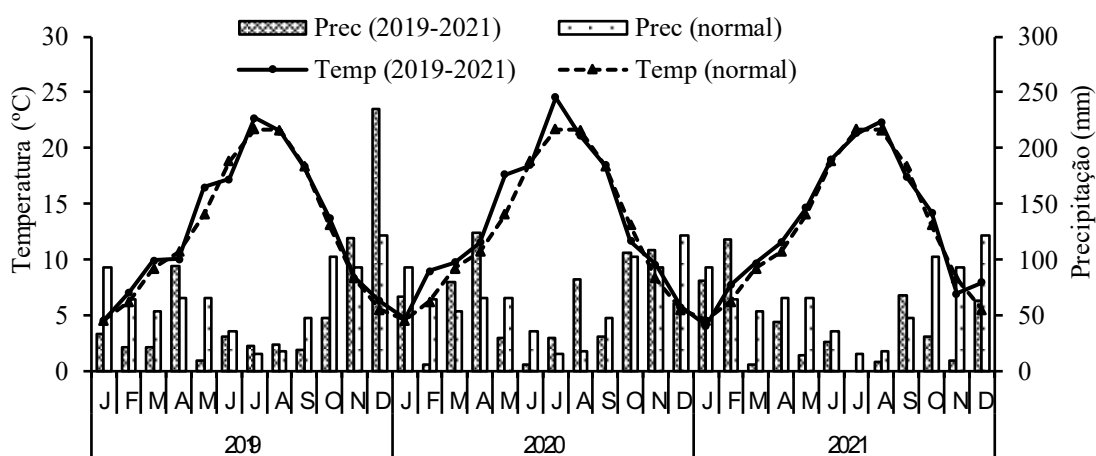


Figura 1. Normal climatológica da região e registos meteorológicos durante o período experimental.

O solo onde o pomar se encontra instalado é um Cambissolo dístico. A parcela apresenta um declive inferior a 3%. Entre as propriedades do solo determinadas a partir de amostras compósitas colhidas na profundidade 0-0.2 m no início da experiência destacam-se teores de matéria orgânica baixos (19,1 g kg⁻¹), pH ácido (pH_{H2O} = 5,2), teores de fósforo baixos (46,1 mg kg⁻¹, Egner-Riehm) e teores de potássio muito altos (220,7 mg kg⁻¹, Egner-Riehm).

3.2. Delineamento experimental

Foram selecionadas 20 árvores com tamanho de copa equivalente, separadas umas das outras por uma árvore não marcada, e sorteadas em cinco grupos (tratamentos), com quatro árvores individuais (repetições) por grupo, em delineamento experimental inteiramente casualizado.

Os cinco tratamentos, conforme usados neste documento, foram os seguintes: BoskGrow 20:05:20; Humix 12:03:05; Exactyon 18:05:13_3m; Exactyon 18:05:12_6m; e Testemunha.

BoskGrow 20:05:20® é um fertilizante composto NPK (20% N, 5% P₂O₅ e 20% K₂O). O N é encontrado nas formas nítrica (1,2%), amoniacal (3,2%) e ureia (15,6%). O fertilizante é uma mistura de grânulos cuja liberação de N dura três meses, sendo parcialmente controlada por uma fina camada biodegradável de poliuretano (27,6% N) e ureia revestida por nitrato de amônio (50% N). Além de N, P e K, o fertilizante também contém quantidades relevantes de enxofre (6,2% SO₃), cálcio (4,5% CaCO₃), magnésio (0,4% MgO) e boro (0,16% B₂O₃).

Humix 12:03:05® é um fertilizante orgânico obtido a partir de melaço líquido condensado de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) e cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), contendo 12% N (10% N orgânico), 3% P₂O₅ e 5% K₂O. O fertilizante contém 74% de matéria orgânica, 16% de aminoácidos, 8,9% de ácidos húmicos e 32,8% de ácidos fúlvicos. Outros minerais importantes no fertilizante são Ca (2,5% CaO), Mg (0,4% MgO) e enxofre (3,1% SO₃).

Exactyon AG 18:05:13® é um fertilizante de liberação controlada, com duração também de 3 meses (47% N encapsulado por um polímero e 28,8% N presente como ureia revestida por sulfato de amônio). Contém 18% de N (0,5% N amoniacal e 17,5% N

ureico), 5% P_2O_5 e 13% K_2O . O fertilizante contém também quantidades relevantes de Ca (14,9% $CaCO_3$), Mg (1,4% MgO), S (2,4% SO_3) e B (0,64% B_2O_3).

Exactyon AG 18:05:12® é um fertilizante de liberação controlada, com duração de 6 meses. Contém 18% N (0,6% N nítrico, 1,7% N amoniacal e 15,7% N ureico), 5% P_2O_5 e 12% K_2O . O mecanismo de liberação controlada (94,9% de N) é baseado em ureia revestida com enxofre e revestimento de poliuretano. Outros nutrientes importantes no fertilizante são Ca (8,3% $CaCO_3$), Mg (1,4% MgO), S (13,6% SO_3) e B (0,64% B_2O_3).

Os fertilizantes foram selecionados com base no teor de macronutrientes NPK e no tempo de duração da liberação de N, nutriente mais vulnerável a ser perdido do solo. Os fertilizantes foram aplicados manualmente e distribuídos homogeneamente sob o dossel na proporção de 4 kg de fertilizante por árvore (~ 400 kg de fertilizante por ha). Assim, no tratamento BoskGrow 20:05:20® foram aplicados 80, 20 e 80 $kg\ ha^{-1}$ de N, P_2O_5 e K_2O , respectivamente. No tratamento Humix 12:03:05® os valores para os respectivos nutrientes foram 48, 12 e 20, no Exactyon AG 18:05:13® foram 72, 20 e 52 e no Exactyon AG 18:05:12® foram 72, 20 e 48.

Os fertilizantes foram aplicados anualmente na segunda quinzena de março e incorporados ao solo com um escarificador. O solo foi novamente arado no final de maio como complemento do controlo das infestantes. Durante o período experimental, as árvores não foram podadas nem receberam qualquer outra prática de cultivo. Na colheita, o fruto maduro cai no chão, geralmente do final de outubro ao final de novembro, sendo colhido à mão geralmente em três passagens sucessivas. Os frutos de cada passe foram pesados e ao final do período de colheita os resultados foram reportados por árvore individual.

3.3. Coleta de amostras

Além de três amostras de solo retiradas no início do experimento para caracterização da parcela, o solo foi novamente amostrado em outubro de 2021 para avaliar o efeito dos tratamentos na fertilidade do solo. Foram coletadas amostras compostas, uma por repetição, como resultado da coleta de solo em 10 pontos de amostragem diferentes. A amostragem foi realizada a 0,0 - 0,20 m de profundidade do solo.

No final de julho, em cada um dos três anos, foram retiradas amostras de folhas jovens totalmente desenvolvidas dos brotos do ano, seguindo o procedimento de amostragem padrão para análise elementar e monitoramento do estado nutricional das árvores. Após a colheita, amostras de 50 castanhas por repetição foram retiradas aleatoriamente para avaliar seu tamanho e também para análise elementar. Após contagem e pesagem, o miolo foi separado de casca e película e as duas partes analisadas separadamente.

3.3.1. Valores de clorofila-SPAD

A intensidade da cor verde das folhas foi determinada com um aparelho portátil SPAD (Soil and Plant Analysis Development) - 502 (Figura 2). O SPAD-502 é um medidor portátil que 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) a 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).

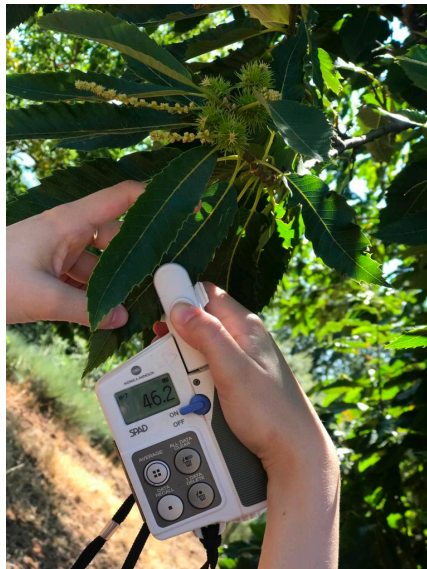


Figura 2. Aparelho SPAD-502 no momento em que se realizava uma leitura na folha do castanheiro.

3.3.2. Análises de solos

3.3.2.1. Determinação da matéria orgânica

A matéria orgânica foi determinada pelo método Walkley-Black. Brevemente, o método consiste na digestão húmida da matéria orgânica da amostra de solo, com uma mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico, durante 30 minutos. Neste período mineralizam-se formas de carbono orgânico facilmente oxidáveis. Para a determinação do carbono facilmente oxidável, o dicromato residual foi titulado com sulfato de ferro e o teor de matéria orgânica foi estimado através da multiplicação da percentagem de carbono pelo fator 1,72, tendo em conta a suposição de que a matéria orgânica da amostra de solo contém cerca de 58% de carbono (Van Reeuwijk, 2002).

3.3.2.2. 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 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 NH_4^+ no extrato frio. O potencial de NH_4^+ liberado por mineralização, ou a quantidade de nitrogênio amoniacal hidrolisável, encontrou-se pela diferença entre NH_4^+ extraído a quente e o extraído a frio (Rodrigues, 2000). A concentração de íons 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).

3.3.2.3. 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).

3.3.2.4. Determinação do pH

O pH foi determinado em água e numa solução de KCl 1M. Foi usada a proporção entre solo e solução de 1 para 1,25 (p/v), e após agitação ocasional no período de 2 horas. A leitura foi feita por potenciometria (Van Reeuwijk, 2002).

3.3.2.5. Determinação de capacidade de troca catiónica

Foram pesados 2,5 gramas de solo e adicionados 50 ml de uma solução de acetato de amónio tamponizada a pH 7. Após 30 minutos de contato e agitação, os catiões Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ foram determinados no extrato filtrado, por espectrofotometria de absorção atômica (Van Reeuwijk, 2002) no equipamento PYE Unicam PU 9100X.

3.3.2.6. Determinação da acidez de troca

Foram colocadas 10 gramas de amostra de solo em contacto com 100 ml de uma solução de KCl 1M e agitada durante 30 minutos. Depois de filtrada a suspensão fez-se uma titulação com NaOH 0,1 M usando a fenolftaleína como indicador (Sims, 1996).

3.3.2.7. Determinação do fósforo e potássio extraíveis

Foram determinados de acordo com o método de Egner-Riehm. O método consiste numa mistura com a proporção de 1:20 (p/v), de uma amostra de solo e uma solução de lactato de amónio e ácido acético, tamponizada a pH 3,5, agitando-se durante duas horas (MAP, 1977). Após filtração, o fósforo (P_2O_5) foi determinado por espectrofotometria UV/VIS no comprimento de onda 882 nm, após o desenvolvimento de cor pelo método do ácido ascórbico. Este método de desenvolvimento de cor consiste na formação de um complexo ácido fosfomolibdénico que foi reduzido a azul-fosfo-molibdénico na presença de ácido ascórbico (Van Reeuwijk, 2002). O equipamento utilizado foi um espectrofotómetro UV/VIS T80 PG Instrument Lda. A quantificação do potássio (K_2O) realizou-se por fotometria de chama (MAP, 1977) no equipamento fotómetro de chama da marca Jenway.

3.3.2.8. Determinação de cobre, ferro, zinco e manganês

Os elementos: cobre, ferro, zinco e manganês, foram extraídos com uma solução de acetato de amónio, ácido acético e ácido etileno diaminotetracético e medidos por espectrometria de absorção atómica (Lakanen & Ervio, 1971) no equipamento PYE Unicam PU 9100X.

3.3.2.9. Determinação de boro

O boro foi extraído pelo método de água fervente na presença de $CaCl_2$ 0,1M. A quantificação do boro extraído foi feita pelo método colorimétrico que usa a azometina-H como reagente de desenvolvimento de cor (Keren, 1996) e é depois determinado num espectrofotómetro UV/VIS a 430 nm.

3.3.3. Análises de tecidos vegetais

Os tecidos vegetais sujeitos a determinação da sua composição foram: folhas, castanha miolo e castanha casca.

3.3.3.1. Determinação de nitrogênio

Pesou-se 1 grama de amostras de tecidos vegetais que foi transferido para tubos de digestão para equipamento Kjeldahl e colocados em um suporte de alumínio com capacidade para 20 frascos. Adicionaram-se duas pastilhas de um catalisador (selênio) e 15 ml de ácido sulfúrico concentrado (95-97%). Em seguida, as amostras foram aquecidas a 400 °C durante 40 minutos. Terminado o período de digestão, deixou-se arrefecer e colocou-se o tubo de digestão num equipamento automático Kjeltex TM 8400 Analyser unit FOSS, ao qual foi adicionada uma quantidade de hidróxido de sódio. A amónia formada é arrastada na corrente de vapor e titulada com ácido clorídrico num vaso com uma solução recetora de ácido bórico e indicadores (Bremner, 1996).

3.3.3.2. Determinação de boro

Pesou-se 1 g das amostras para cadinhos onde se adicionou 0,10 g de óxido de cálcio e se misturou até se obter uma amostra homogénea. De seguida, os cadinhos foram 90 minutos para uma mufla onde se realizou a queima das amostras à temperatura de 500 °C. Após a queima, as cinzas foram diluídas com 10 ml de ácido sulfúrico 0,5 M e, após 30 minutos, foram filtradas. Posteriormente, transferiu-se 1 ml das amostras para tubos de 10 ml de polipropileno e foram adicionados 2,0 ml de azometina-H. Trinta minutos depois associados ao desenvolvimento de cor realizaram-se as leituras de absorbância das amostras em espectrofotómetro com comprimento de onda 420 nm (Temminghoff e Houba, 2004).

3.3.3.3. Determinação de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, zinco e manganês

Foram pesados 0,25 g das amostras para tubos de digestão em teflon, aos quais se adicionaram 10 ml de ácido nítrico. Os tubos foram fechados e levados para digestão em micro-ondas MARSXpress. Após a digestão, o líquido foi transferido para tubos de Nessler de 50 ml e o volume foi completado com água desionizada. Foram quantificados os teores de potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, zinco e manganês em espectrofotômetro de absorção atômica num equipamento PYE Unicam PU 9100X. Para a determinação do fósforo, após a diluição adicionou-se 4,0 ml da solução molibdato de amônio azul com ácido ascórbico. Após 35 minutos foram realizadas as leituras de absorbância em espectrofotômetro a um comprimento de onda 882 nm (Temminghoff e Houba, 2004).

3.3.4. 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, 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

4.1. Concentração de nutrientes nas folhas

Na figura 3 apresenta-se a concentração de nitrogênio nas folhas em função dos fertilizantes aplicados durante os três anos de estudo. Houve diferenças significativas entre tratamentos na concentração de nitrogênio nas folhas nas três datas de amostragem. O tratamento com BoskGrow 20:05:20 apresentou as maiores concentrações médias em todos os anos de estudo, com valores de 23,7, 22,9 e 22,2 g kg⁻¹ em 2019, 2020 e 2021, respectivamente.

Os resultados do fertilizante Exactyon 18:05:13_3m posicionaram-se também na parte alta da figura, embora menos destacados que os do tratamento BoskGrow 20:05:20. Os valores médios foram de 20,9, 21,3 e 20,8 g kg⁻¹, respectivamente em 2019, 2020 e 2021. Os resultados do fertilizante Humix 12:03:05 iniciaram em 2019 ligeiramente acima dos do fertilizante Exactyon 18:05:13_3m, tendo-se registado os valores de 21,3 g kg⁻¹, decaindo depois para 19,2 g kg⁻¹ quer em 2020 quer em 2021. Os valores médios de 2020 foram mesmo mais baixos que os da testemunha. A concentração de nitrogênio nas folhas das plantas tratadas com Exactyon 18:05:12_6m registaram valores crescentes ao longo dos anos. Em 2019 a concentração média de nitrogênio nas folhas foi de 17,4 g kg⁻¹, um valor equivalente ao da modalidade testemunha, mas em 2020 os valores subiram para 20,6 g kg⁻¹ e em 2021 foram de 20,9 g kg⁻¹, valor este só inferior ao do tratamento BoskGrow 20:05:20. A testemunha, não fertilizada, mostrou valores médios sempre na parte baixa da figura e com diferenças significativas para pelo menos o tratamento BoskGrow 20:05:20, que registou os valores mais elevados, como se referiu anteriormente.

Os tratamentos fertilizantes influenciaram de forma significativa a concentração de fósforo nas folhas apenas no primeiro ano (2019) dos três anos de estudo (Figura 4). As maiores concentrações foram observadas para o fertilizante Exactyon 18:05:13_3m (1,3 g kg⁻¹), embora com diferenças significativas apenas para a modalidade testemunha (0,9 g kg⁻¹). Em 2020 e 2021 não se registaram diferenças significativas entre tratamentos e os valores médios variaram respectivamente entre 0,9 e 1,1 g kg⁻¹ e 1,1 e 1,4 g kg⁻¹.

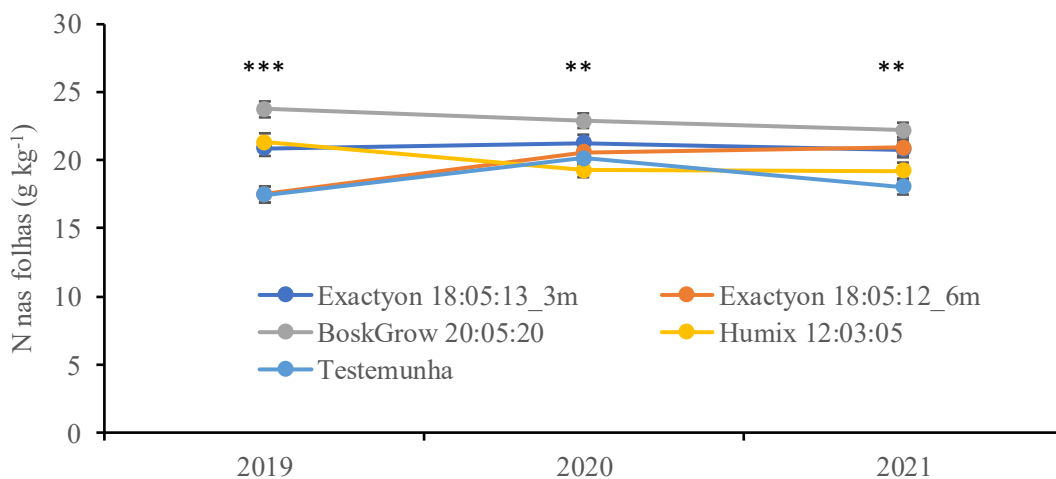


Figura 3. Concentração de nitrogênio (N) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos fertilizantes. **, ***diferenças significativas para $P < 0,01$ e $P < 0,001$, respectivamente. As barras verticais são o erro padrão das médias.

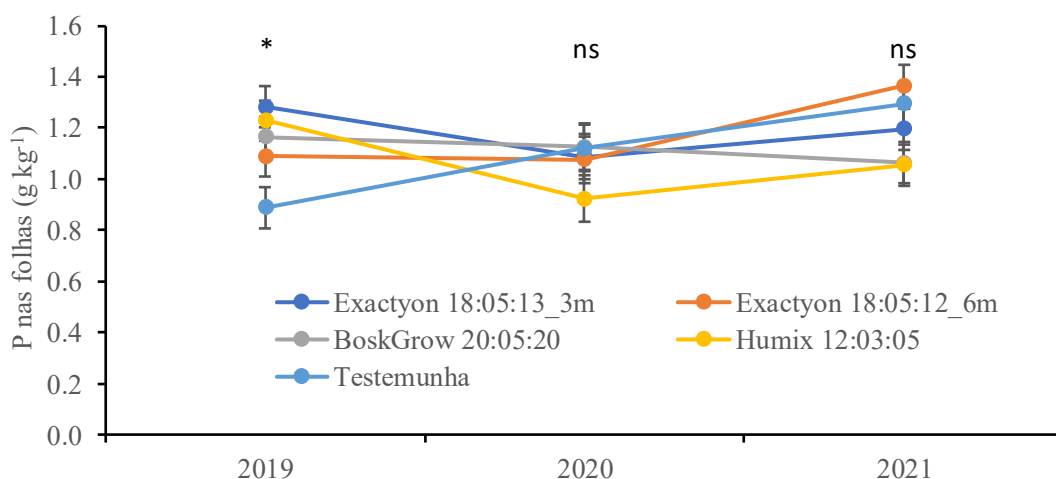


Figura 4. Concentração de fósforo (P) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. * diferenças significativas para $P < 0,05$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.

A concentração de potássio nas folhas em função dos tratamentos fertilizantes nas amostragens dos três anos de estudo é apresentada na Figura 5. Os fertilizantes influenciaram significativamente a concentração de potássio nas folhas em dois dos três anos de estudo. Apenas em 2019 não houve diferenças significativas entre tratamentos. Em 2019 os valores médios de potássio nas folhas variaram entre 4,6 e 7,3 g kg^{-1} . Ainda assim, os valores médios mais elevados foram registados no tratamento BoskGrow 20:05:20, tal como se verificou nos anos seguintes, embora nestes com diferenças

significativas. Os valores de potássio nas folhas mostraram grande oscilação ao longo dos anos, sendo difícil detetar um padrão claro para os resultados de cada um dos fertilizantes. Contudo, Exactyon 18:05:12_6m apresentou valores muito baixos, inferiores aos da testemunha, nos dois primeiros anos, mas depois aumentaram de forma evidente em 2021. Os valores da testemunha permaneceram na parte baixa da figura nas três amostragens.

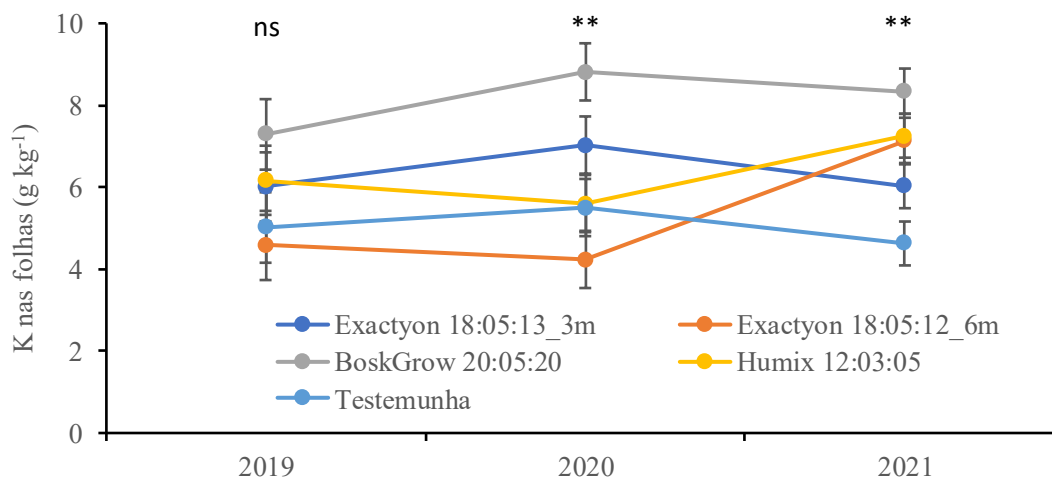


Figura 5. Concentração de potássio (K) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. ** diferenças significativas para $P < 0,01$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.

A concentração de cálcio nas folhas em função dos tratamentos apresenta-se na figura 6. Os tratamentos com fertilizantes influenciaram de forma significativa a concentração de cálcio nas folhas no segundo e terceiro anos do estudo (2020 e 2021). No primeiro ano, em 2019, não houve diferenças significativas na concentração de cálcio entre tratamentos, embora possa-se observar que a menor concentração de cálcio encontra-se na testemunha (2.1 g kg^{-1}).

No ano de 2020, as maiores concentrações de cálcio foram observadas nos tratamentos Exactyon 18:05:13_3m ($3,0 \text{ g kg}^{-1}$) e BoskGrow 20:05:20 ($2,6 \text{ g kg}^{-1}$) e as mais baixas nos tratamentos testemunha ($1,7 \text{ g kg}^{-1}$) e Exactyon 18:05:12_6m ($1,4 \text{ g kg}^{-1}$).

Em 2021, a concentração média mais elevada de cálcio foi observada no tratamento com o fertilizante Exactyon 18:05:12_3m ($3,0 \text{ g kg}^{-1}$), que se demarcou dos demais tratamentos fertilizados e da Testemunha. O tratamento com o fertilizante BoskGrow 20:05:20 apresentou a concentração de cálcio imediatamente a seguir ($2,2 \text{ g kg}^{-1}$).

kg⁻¹) e a testemunha (1,6 g kg⁻¹) e o fertilizante Exactyon 18:05:12_6m (1,5 g kg⁻¹) os valores mais baixos.

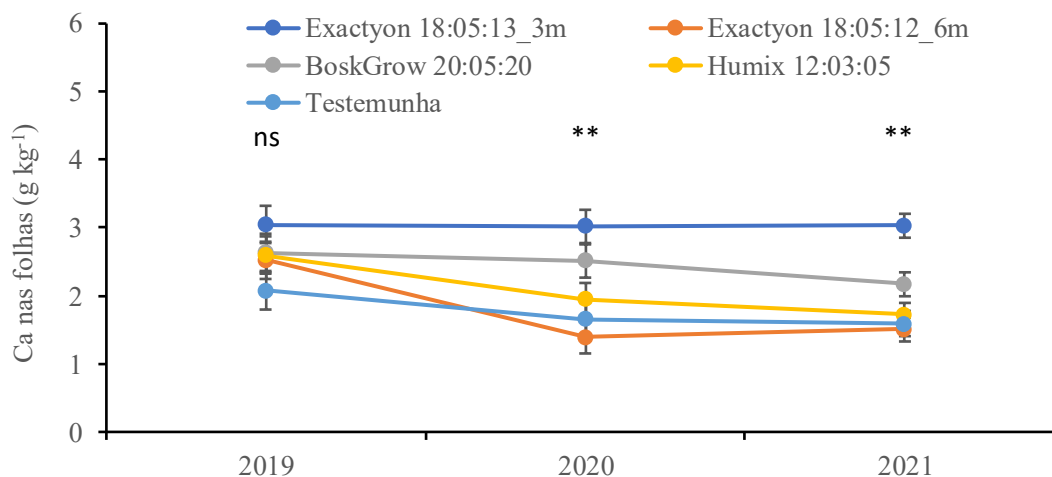


Figura 6. Concentração de cálcio (Ca) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. ** diferenças significativas para $P < 0,01$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.

Na figura 7 apresenta-se a concentração de magnésio nas folhas, para a qual não se observaram diferenças estatística entre tratamentos fertilizantes nas amostragens dos três anos do estudo. Em 2019 os valores médios variaram entre 1,1 e 1,6 g kg⁻¹, em 2020 entre 1,0 e 1,4 g kg⁻¹ e em 2021 entre 0,9 e 1,5 g kg⁻¹.

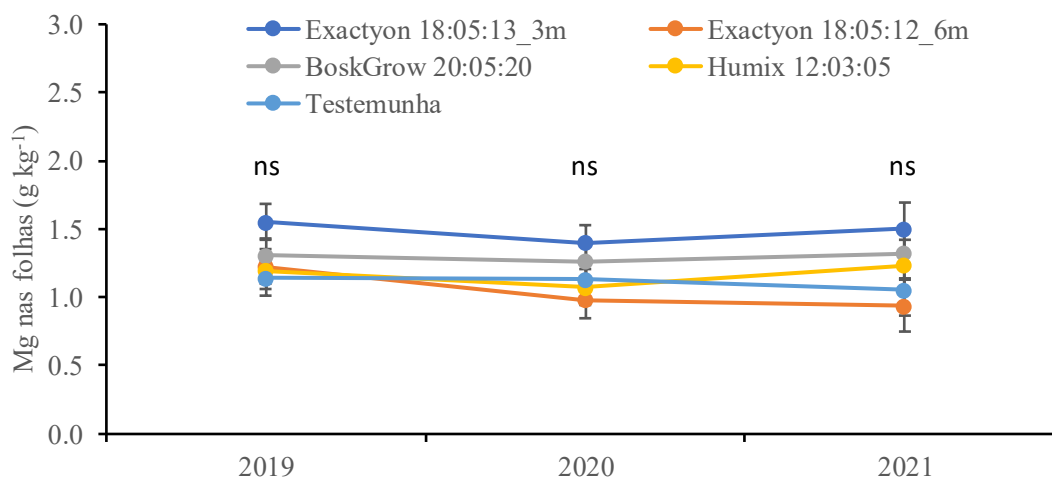


Figura 7. Concentração de magnésio (Mg) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.

A concentração de boro nas folhas, em função dos tratamentos fertilizantes durante os três anos de estudo, é apresentada na figura 8, na qual se pode verificar que ocorreram diferenças significativas entre tratamentos fertilizantes nas três datas de amostragem.

No ano de 2019 observa-se a maior concentração de boro nos tratamentos com os fertilizantes Exactyon 18:05:13_3m (25,4 mg kg⁻¹) e Exactyon 18:05:12_6m (24,8 mg kg⁻¹) e os mais baixos nos tratamentos Humix 12:03:05 (15,0 mg kg⁻¹) e Testemunha (14,2 mg kg⁻¹).

Em 2020 os tratamentos fertilizantes Exactyon 18:05:13_3m (43,2 mg kg⁻¹) e Exactyon 18:05:12_6m (33,8 mg kg⁻¹) mantiveram-se como os que registaram valores mais elevados e Humix 12:03:05 (14,0 mg kg⁻¹) e Testemunha (17,2 mg kg⁻¹) como os que registaram valores mais baixos. Com os fertilizantes Exactyon 18:05:13_3m e Exactyon 18:05:12_6m registou-se um grande aumento nos valores relativamente ao ano anterior enquanto nos tratamentos Humix 12:03:05 e Testemunha os valores permaneceram da mesma ordem de grandeza relativamente ao ano anterior.

As concentrações de boro no ano de 2021 mantiveram a mesma ordem entre tratamentos, com Exactyon 18:05:13_3m (79,0 mg kg⁻¹) e Exactyon 18:05:12_6m (86,3 mg kg⁻¹) a apresentarem os valores mais elevados e os tratamentos Humix 12:03:05 (18,0 mg kg⁻¹) e Testemunha (16,3 mg kg⁻¹) os valores mais baixos. Nos tratamentos Exactyon 18:05:13_3m e Exactyon 18:05:12_6m continuou a registar-se um forte acréscimo nos teores de boro nas folhas relativamente aos anos anteriores enquanto nos tratamentos Humix 12:03:05 e Testemunha os valores mantiveram-se em níveis próximos dos que foram observados no primeiro e segundo anos.

A concentração de ferro nas folhas mostrou tendência crescente ao longo dos anos e variou de forma significativa entre tratamentos nas amostragens de 2020 e 2021 (Figura 9). Em 2020 os valores mais elevados foram registados no tratamento BoskGrow 20:05:20 e em 2021 no tratamento Exactyon 18:05:12_6m. Contudo, as variações observadas nas concentrações de ferro nas folhas pareceram variar de forma independente dos tratamentos fertilizantes, uma vez que os valores mais elevados em uma data de amostragem e associados a um dado fertilizante não mantiveram a coerência na data seguinte. Ao longo dos anos, os valores médios variaram entre 54,9 e 62,8 mg kg⁻¹ em 2019, entre 68,3 e 97,7 mg kg⁻¹ em 2020 e entre 86,4 e 106,9 mg kg⁻¹ em 2021.

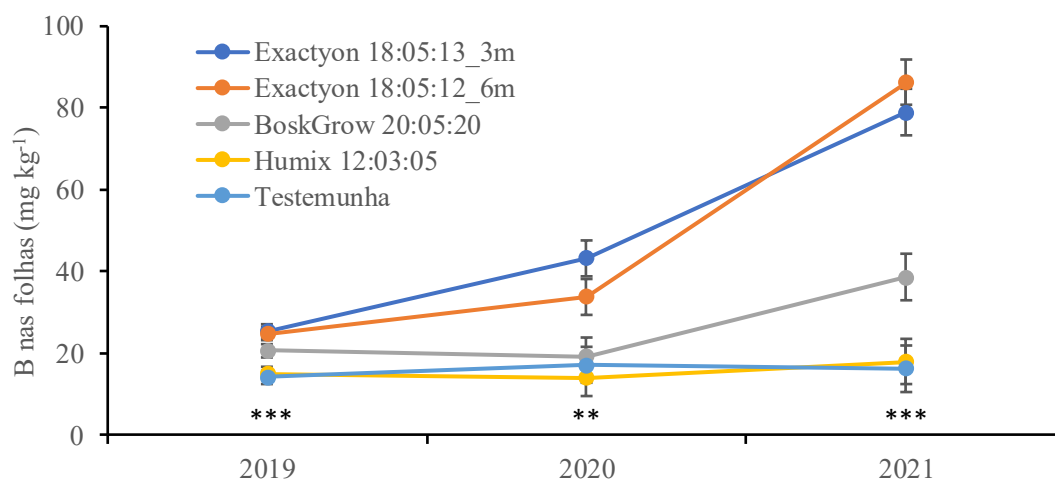


Figura 8. Concentração de boro (B) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. **, *** diferenças significativas para $P < 0,01$ e $P < 0,001$. As barras verticais são o erro padrão das médias.

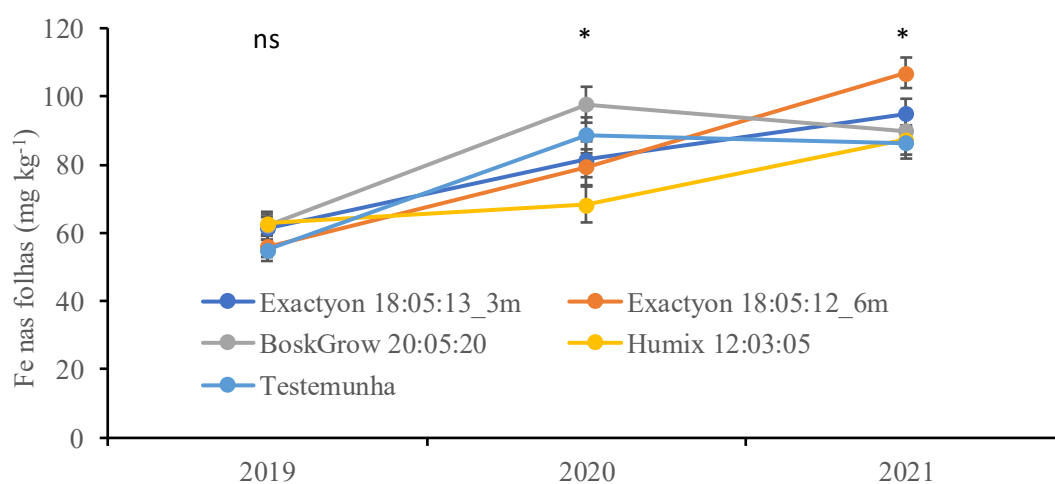


Figura 9. Concentração de ferro (Fe) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. * diferenças significativas para $P < 0,05$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.

A concentração de manganês nas folhas em função dos fertilizantes e para os três anos de estudo é apresentada na figura 10. Observa-se que houve diferenças significativas entre tratamentos na concentração de manganês em todas as datas de amostragem. O resultado mais relevante parece ser os valores da testemunha marcadamente abaixo dos das modalidades fertilizadas. As árvores tratadas com Humix 12:03:05 surgem com valores tendencialmente elevados e as árvores tratadas com Exactyon 18:05:12_6m surgem com valores tendencialmente mais baixos. Na testemunha os teores de manganês

nas folhas foram de 1363,3, 1042,2 e 873,0 mg kg⁻¹, respectivamente em 2019, 2020 e 2021. Nas modalidades fertilizadas os valores médios variaram nos intervalos 1946,7 - 2279,0 mg kg⁻¹ em 2019, 1738,5 - 2532,9 mg kg⁻¹ em 2020 e 1979,9 - 2409,0 mg kg⁻¹ em 2021.

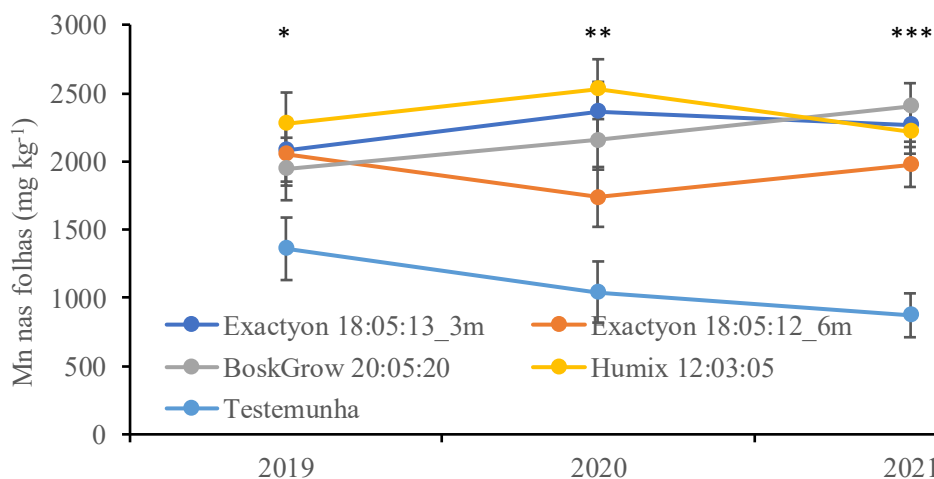


Figura 10. Concentração de manganês (Mn) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. *, **, ***diferenças significativas para $P < 0,05$, $P < 0,01$ e $P < 0,001$. As barras verticais são o erro padrão das médias.

Na figura 11 apresentam-se as concentrações de zinco nas folhas em função dos tratamentos fertilizantes durante os três anos de estudo. Diferenças significativas entre tratamentos para a concentração de zinco nas folhas foi observada apenas no primeiro ano do estudo, em 2019. Nos anos de 2020 e 2021 observou-se que as concentrações de zinco diminuíram em relação aos valores de 2019. Também para a concentração de zinco nas folhas, os resultados mostraram-se pouco sensíveis ao efeito dos tratamentos fertilizantes. Talvez o resultado mais consistente sejam os valores tendencialmente baixos registados na modalidade testemunha. Considerando o conjunto de todos os tratamentos, os teores de zinco nas folhas variaram entre 28,4 e 49,9 mg kg⁻¹ em 2019, 16,6 e 21,4 mg kg⁻¹ em 2020 e 14,3 e 19,0 mg kg⁻¹ em 2021.

Na figura 12 é mostrada a concentração de cobre nas folhas em função dos tratamentos fertilizantes nas amostragens dos três anos de estudo. No ano de 2019 não se observaram diferenças significativas entre tratamentos na concentração de cobre nas folhas, ao contrário do que se observou em 2020 e 2021. Também não se consegue observar um padrão claro na concentração de cobre nas folhas em função dos tratamentos

fertilizantes. As árvores tratadas com o fertilizante BoskGrow 20:05:20 mostraram os valores mais elevados em 2019 e 2020, enquanto o fertilizante Exactyon 18:05:12_6m originou valores baixos em 2019 e 2020 e os mais elevados em 2021. A modalidade testemunha mostrou resultados intermédios aos das modalidades fertilizadas. Considerando todos os tratamentos, os valores de cobre nas folhas variaram entre 6,4 e 8,0 mg kg⁻¹ em 2019, 6,8 e 9,5 mg kg⁻¹ em 2020 e 8,1 e 9,8 mg kg⁻¹ em 2021.

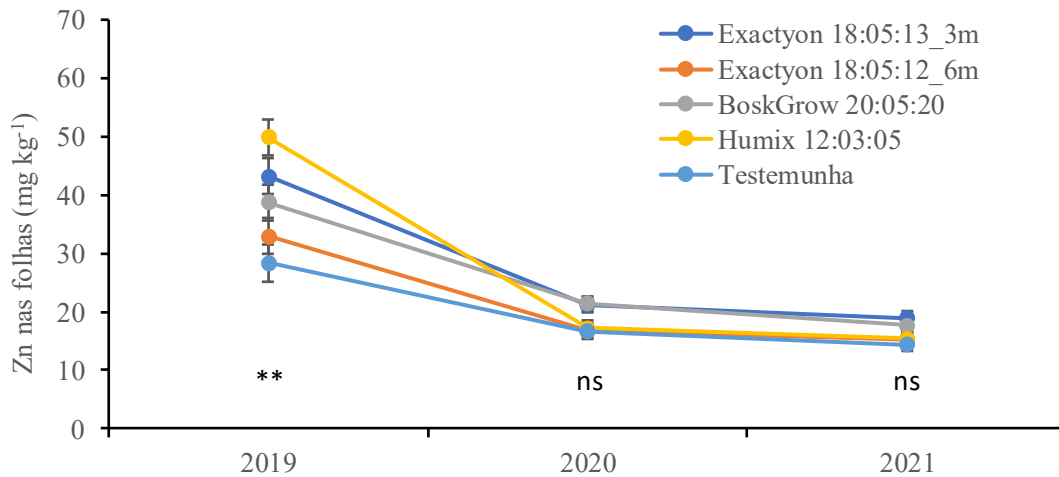


Figura 11. Concentração de zinco (Zn) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. ** diferenças significativas para $P < 0,01$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.

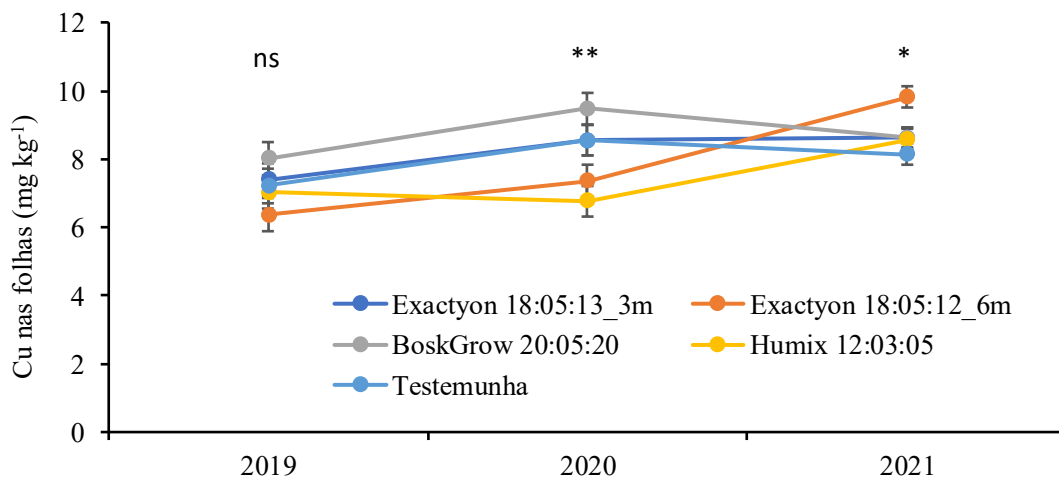


Figura 12. Concentração de cobre (Cu) nas folhas em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes. ** diferenças significativas para $P < 0,01$; ns, diferenças não significativas. As barras verticais são o erro padrão das médias.

4.2. Avaliação da intensidade da cor verde das folhas

Na tabela 1 apresentam-se os valores das leituras nas folhas dos castanheiros com o aparelho SPAD 502, que avalia a intensidade da cor verde gerando uma estimativa adimensional do teor de clorofila.

Em 2019 e 2021 observaram-se diferenças significativas entre tratamentos. Os valores registados nas folhas das árvores tratadas com Exactyon 18:05:13_3m (45,0) e BoskGrow 20:05:20 (44,9) foram estatisticamente mais elevados que nos tratamentos Testemunha (42,5) e Exactyon 18:05:12_6m (42,4). O fertilizante orgânico Humix 12:03:05 deu origem a valores médios de 43,8, não apresentando diferença significativa para os demais tratamentos.

Em 2020 não se observaram diferenças significativas entre tratamentos nos valores SPAD, encontrando-se os valores médios entre 40,4 e 42,3.

Em 2021 observaram-se diferenças significativas entre os valores do tratamento fertilizante Exactyon 18:05:13_3m (49,2) e a Testemunha (45,9). Os resultados dos demais tratamentos não diferiram significativamente entre si nem entre os tratamentos referidos anteriormente.

Tabela 1. Valores SPAD nas folhas do castanheiro em função dos tratamentos fertilizantes nos três anos de estudo.

Tratamentos	2019	2020	2021
Exactyon 18:05:13_3m	45,0 a*	42,1 a	49,2 a
Exactyon 18:05:12_6m	42,4 b	40,4 a	47,3 ab
BoskGrow 20:05:20	44,9 a	42,3 a	48,7 ab
Humix 12:03:05	43,8 ab	41,8 a	46,9 ab
Testemunha	42,5 b	41,4 a	45,9 b
Probabilidade	0,0350	0,8880	0,0208
Erro padrão	0,67	1,40	0,68

* Nas colunas, valores com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey HSD a 5% de probabilidade.

4.3. Concentração de nutrientes nos frutos

4.3.1. Concentração de nutrientes no miolo

Em 2019 a concentração de nitrogênio no miolo não diferiu significativamente entre tratamentos (Tabela 2). Em 2021 registaram-se diferenças significativas entre tratamentos na concentração de nitrogênio no miolo. Humix 12:03:05 (8,52 g kg⁻¹) e Testemunha (9,02 g kg⁻¹) apresentaram concentrações de nitrogênio no miolo inferiores às que foram observadas nos tratamentos Exactyon 18:05:12_6m (12,20 g kg⁻¹) e BoskGrow 20:05:20 (12,73 g kg⁻¹). No conjunto dos dois anos parece apenas consistente uma pequena quebra nos valores da testemunha em comparação com os dos talhões fertilizados.

Para as concentrações de fósforo e magnésio no miolo não se observaram diferenças significativas entre tratamentos em qualquer um dos dois anos em que estas variáveis foram determinadas. Em 2019 os valores médios de fósforo variaram entre 0,89 e 1,04 g kg⁻¹ e em 2021 entre 1,06 e 1,21 g kg⁻¹. Para os mesmos anos, os valores de magnésio variaram entre 0,44 e 0,57 g kg⁻¹ e 0,42 e 1,10 g kg⁻¹.

Em relação às concentrações de potássio no ano de 2019 não houve diferenças significativas entre tratamentos, variando a concentração média de potássio de 3,92 a 4,64 g kg⁻¹. Contudo, no ano de 2021 observaram-se diferenças significativas na concentração de potássio no miolo, sendo o tratamento com o fertilizante orgânico Humix 12:03:05 (7,70 g kg⁻¹) o que apresentou a maior concentração, valor significativamente mais elevado que os dos fertilizantes Exactyon 18:05:12_6m e BoskGrow 20:05:20, que apresentaram 5,87 e 5,91 g kg⁻¹, respectivamente. Analisando os dois anos em conjunto também não se nota uma tendência clara na comparação do efeito dos tratamentos.

No caso da concentração do cálcio no miolo ocorreu o oposto. Apenas no ano 2019 surgiram diferenças significativas entre tratamentos. A concentração mais elevada correspondeu ao tratamento com o fertilizante BoskGrow 20:05:20 com 0,58 g kg⁻¹, sendo este valor estatisticamente mais elevado que o do fertilizante Exactyon 18:05:12_6m, que teve 0,39 g kg⁻¹. No combinado dos dois anos também não parece haver um efeito claro na comparação entre tratamentos.

Tabela 2. Concentração de macronutrientes no miolo da castanha em função dos tratamentos fertilizantes nos anos de estudo 2019 e 2021.

Tratamentos	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio
	----- g kg ⁻¹ -----				
2019					
Exactyon 18:05:13_3m	10,16 a*	1,00 a	4,31 a	0,48 ab	0,50 a
Exactyon 18:05:12_6m	9,56 a	1,02 a	3,92 a	0,39 b	0,44 a
BoskGrow 20:05:20	10,33 a	0,89 a	4,40 a	0,58 a	0,57 a
Humix 12:03:05	9,94 a	1,04 a	3,96 a	0,47 ab	0,51 a
Testemunha	9,29 a	1,01 a	4,64 a	0,48 ab	0,51 a
Probabilidade	0,4689	0,3460	0,4929	0,0375	0,3473
Erro padrão	0,44	0,05	0,32	0,04	0,04
2021					
Exactyon 18:05:13_3m	10,07 ab	1,10 a	7,16 ab	0,43 a	1,10 a
Exactyon 18:05:12_6m	12,20 a	1,21 a	5,87 b	0,43 a	0,82 a
BoskGrow 20:05:20	12,73 a	1,06 a	5,91 b	0,40 a	0,85 a
Humix 12:03:05	8,53 b	1,14 a	7,70 a	0,49 a	0,90 a
Testemunha	9,02 b	1,08 a	6,27 ab	0,40 a	0,42 a
Probabilidade	0,0048	0,7401	0,0284	0,6146	0,2731
Erro padrão	0,47	0,08	0,31	0,04	0,19

* Nas colunas e separados por ano, valores com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey HSD a 5% de probabilidade.

No ano de 2019 os tratamentos fertilizantes influenciaram de forma significativa a concentração de boro no miolo (Tabela 3). Os valores mais elevados foram obtidos com o fertilizante Exactyon 18:05:12_6m, com 16,3 mg kg⁻¹, sendo este valor estatisticamente mais elevado que todos os dos demais tratamentos. A Testemunha apresentou a mais baixa concentração de boro, com 10,7 mg kg⁻¹. No ano de 2021 não se observaram diferenças significativas entre tratamentos. Contudo, combinando os resultados dos dois anos, o fertilizante orgânico Humix 12:03:05 e a testemunha apresentaram resultados tendencialmente mais baixos.

Quanto ao ferro, a sua concentração no miolo variou de forma significativa entre tratamentos no ano de 2019, tendo o tratamento com o fertilizante BoskGrow 20:05:20 apresentando a maior concentração (148,8 mg kg⁻¹) e a Testemunha a mais baixa (93,6 mg kg⁻¹) (Tabela 3). Os valores dos demais tratamentos fertilizantes não diferiram entre si nem de BoskGrow 20:05:20 e Testemunha. No ano de 2021 não se observaram diferenças significativas entre tratamentos na concentração de ferro, tendo os valores médios variado de 150,8 a 198,1 mg kg⁻¹. Na combinação dos dois anos não ficou claro o efeito dos tratamentos na concentração de ferro no miolo da castanha.

Para os teores de manganês observaram-se diferenças significativas entre tratamentos nos dois anos de estudo (Tabela 3). Em 2019 a maior concentração obteve-se no tratamento com o fertilizante orgânico Humix 12:03:05, com 204,4 mg kg⁻¹, e a menor concentração na Testemunha, com 102,6 mg kg⁻¹. O tratamento com o fertilizante BoskGrow 20:05:20 apresentou concentração de 140,3 mg kg⁻¹, a qual não apresenta diferença significativa para a Testemunha e também para os tratamentos com os fertilizantes Exactyon 18:05:12_6m e Exactyon 18:05:13_3m que registaram 166,9 mg kg⁻¹ e 183,9 mg kg⁻¹, respectivamente. Os tratamentos com os fertilizantes Exactyon 18:05:12_6m e Exactyon 18:05:13_3m, não diferiram significativamente da maior concentração média encontrada com o fertilizante orgânico Humix 12:03:05. No ano 2021, os tratamentos com fertilizantes diferiram significativamente da Testemunha, apresentando concentração de manganês a variar entre 162,2 e 209,6 mg kg⁻¹, enquanto na Testemunha se registou concentração média de manganês de 94,6 mg kg⁻¹. No balanço dos dois anos parecem claros os valores mais baixos da Testemunha em comparação com as modalidades fertilizadas.

Tabela 3. Concentração de micronutrientes no miolo da castanha em função dos tratamentos com fertilizantes nos anos de estudo 2019 e 2021.

Tratamentos	Boro	Ferro	Manganês	Zinco	Cobre
	----- mg kg ⁻¹ -----				
2019					
Exactyon 18:05:13_3m	13,4 b*	125,6 ab	183,0 ab	15,5 a	8,6 a
Exactyon 18:05:12_6m	16,3 a	109,9 ab	166,9 ab	15,3 a	9,1 a
BoskGrow 20:05:20	13,1 bc	148,8 a	140,3 bc	15,9 a	8,9 a
Humix 12:03:05	11,4 bc	112,2 ab	204,4 a	17,0 a	8,9 a
Testemunha	10,7 c	93,6 b	102,6 c	15,7 a	8,5 a
Probabilidade	<0,0001	0,0114	0,0006	0,8209	0,9231
Erro padrão	0,60	9,48	12,97	1,07	0,55
2021					
Exactyon 18:05:13_3m	23,1 a	197,7 a	178,1 a	17,7 a	8,5 a
Exactyon 18:05:12_6m	25,5 a	194,9 a	162,2 a	18,9 a	9,2 a
BoskGrow 20:05:20	26,2 a	150,8 a	187,1 a	17,3 a	8,5 a
Humix 12:03:05	13,5 a	183,2 a	209,6 a	17,5 a	8,5 a
Testemunha	16,7 a	198,1 a	94,6 b	18,6 a	9,8 a
Probabilidade	0,0928	0,3138	0,0030	0,5420	0,5831
Erro padrão	2,93	16,01	9,89	0,74	0,65

* Nas colunas e separados por ano, valores com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey HSD a 5% de probabilidade.

Quanto ao zinco e cobre, não foram observadas diferenças significativas na sua concentração entre tratamentos fertilizantes em qualquer dos dois anos de estudo (Tabela

3). As concentrações médias de zinco variaram em torno de 13,3 e 17,0 mg kg⁻¹ em 2019 e 17,3 e 18,9 mg kg⁻¹ em 2021. Nos mesmos anos, os teores médios de zinco no miolo variaram entre 8,5 e 9,1 mg kg⁻¹ e 8,5 e 9,8 mg kg⁻¹.

4.3.2. Concentração de nutrientes na casca

As concentrações médias dos macronutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio na casta da castanha nos diferentes tratamentos fertilizantes e anos está apresentada na tabela 4. Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos para qualquer dos nutrientes ou anos.

Em 2019 a concentração de nitrogênio apresentou valores médios entre 1,40 e 1,86 g kg⁻¹, a de fósforo entre 0,11 a 0,19 g kg⁻¹, a de potássio entre 1,20 e 1,67 g kg⁻¹, a de cálcio entre 1,70 e 1,83 g kg⁻¹ e a de magnésio entre 1,18 e 1,54 g kg⁻¹ (Tabela 4). No ano de 2021 as concentrações médias de nitrogênio variaram entre 1,05 e 2,28 g kg⁻¹, de fósforo entre 0,02 e 0,05 g kg⁻¹, de potássio entre 0,90 e 1,71 g kg⁻¹, de cálcio entre 1,41 e 1,74 g kg⁻¹ e de magnésio entre 0,66 e 0,88 g kg⁻¹.

Tabela 4. Concentração de macronutrientes na casca da castanha em função dos tratamentos fertilizantes nos anos de estudo 2019 e 2021.

Tratamentos	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio
	----- g kg ⁻¹ -----				
2019					
Exactyon 18:05:13_3m	1,65 a	0,19 a	1,67 a	1,72 a	1,18 a
Exactyon 18:05:12_6m	1,66 a	0,14 a	1,37 a	1,73 a	1,21 a
BoskGrow 20:05:20	1,64 a	0,15 a	1,61 a	1,75 a	1,18 a
Humix 12:03:05	1,86 a	0,11 a	1,55 a	1,70 a	1,22 a
Testemunha	1,40 a	0,12 a	1,20 a	1,83 a	1,54 a
Probabilidade	0,5495	0,3601	0,3829	0,9525	0,7346
Erro padrão	0,11	0,03	0,16	0,13	0,22
2021					
Exactyon 18:05:13_3m	2,28 a	0,05 a	1,50 a	1,74 a	0,88 a
Exactyon 18:05:12_6m	1,80 a	0,05 a	0,96 a	1,41 a	0,66 a
BoskGrow 20:05:20	1,26 a	0,03 a	1,71 a	1,41 a	0,87 a
Humix 12:03:05	1,40 a	0,02 a	1,70 a	1,69 a	0,86 a
Testemunha	1,05 a	0,03 a	0,90 a	1,63 a	0,67 a
Probabilidade	0,7463	0,6463	0,1070	0,3595	0,3733
Erro padrão	0,66	0,01	0,22	0,14	0,12

* Nas colunas e separados por ano, valores com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey HSD a 5% de probabilidade.

Em 2019 não se observaram diferenças significativas entre tratamentos na concentração dos micronutrientes na casca da castanha (Tabela 5). Para boro as concentrações apresentaram-se entre 18,8 a 22,4 mg kg⁻¹, as de ferro entre 301,5 a 645,3 mg kg⁻¹, as de manganês entre 471,2 a 626,1 mg kg⁻¹, as de zinco entre 18,6 a 24,0 mg kg⁻¹ e as de cobre entre 6,7 a 7,3 mg kg⁻¹.

No ano de 2021 observaram-se diferenças significativas entre tratamentos na concentração do boro nas cascas, sendo as maiores concentrações obtidas com os fertilizantes Exactyon 18:05:13_3m e Exactyon 18:05:12_6m, com 35,3 e 34,1 mg kg⁻¹, respectivamente, que diferiram do fertilizante orgânico Humix 12:03:05 e da Testemunha, que apresentam concentrações de 20,8 e 22,6 mg kg⁻¹, respectivamente. O fertilizante BoskGrow 20:05:20 apresenta uma concentração média de boro que não difere estatisticamente de todos os demais tratamentos, com 28,6 mg kg⁻¹. Para os demais micronutrientes não ocorreram diferenças significativas entre tratamentos. Considerando todos os tratamentos, a concentração de ferro variou entre 95,8 e 462,8 mg kg⁻¹, a de manganês entre 490,8 e 600,8 mg kg⁻¹, a de zinco entre 18,9 e 22,6 mg kg⁻¹ e a de cobre entre 5,4 e 7,1 mg kg⁻¹.

Tabela 5. Concentração de micronutrientes na casca da castanha em função dos tratamentos com fertilizantes nos anos de estudo 2019 e 2021.

Tratamentos	Boro	Ferro	Manganês	Zinco	Cobre
	----- mg kg ⁻¹ -----				
2019					
Exactyon 18:05:13_3m	22,0 a	401,7 a	471,2 a	22,6 a	6,7 a
Exactyon 18:05:12_6m	20,3 a	527,3 a	561,5 a	20,4 a	6,7 a
BoskGrow 20:05:20	22,4 a	301,5 a	626,1 a	20,6 a	7,3 a
Humix 12:03:05	21,9 a	451,4 a	591,1 a	24,0 a	7,3 a
Testemunha	18,8 a	645,3 a	576,1 a	18,6 a	7,3 a
Probabilidade	0,4728	0,0670	0,2033	0,4104	0,5983
Erro padrão	1,34	61,64	38,83	1,91	0,40
2021					
Exactyon 18:05:13_3m	35,3 a	100,6 a	635,3 a	21,9 a	6,7 a
Exactyon 18:05:12_6m	34,1 a	106,1 a	490,8 a	19,0 a	5,4 a
BoskGrow 20:05:20	28,6 ab	462,8 a	600,8 a	19,9 a	6,7 a
Humix 12:03:05	20,8 b	123,4 a	600,7 a	22,6 a	6,1 a
Testemunha	22,6 b	95,8 a	597,0 a	18,9 a	7,1 a
Probabilidade	0,0050	0,4244	0,0386	0,2195	0,2953
Erro padrão	1,67	147,80	40,34	1,16	0,50

* Nas colunas e separados por ano, valores com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey HSD a 5% de probabilidade.

4.4. Produtividade das árvores e calibre da castanha

Na figura 13 integram-se os resultados obtidos para a produtividade das árvores nos anos de 2019 e 2021 em função dos tratamentos fertilizantes utilizados. Em 2019 registaram-se diferenças significativas entre tratamentos, tendo-se obtido a maior produtividade com o fertilizante Exactyon 18:05:13_3m (49,9 kg árvore⁻¹) e os valores mais baixos com o fertilizante Exactyon 18:05:12_6m (28,3 kg árvore⁻¹) e na Testemunha (32,5 kg árvore⁻¹). Os fertilizantes BoskGrow (40,5 kg árvore⁻¹) e Humix 12:03:05 (43,4 kg árvore⁻¹) originaram resultados sem diferenças significativas para os restantes. Em 2021 não ocorreram diferenças significativas entre tratamentos, tendo os valores médios variado entre 37,0 e 53,5 kg árvore⁻¹. No total acumulado dos dois anos registaram-se de novo diferenças significativas entre tratamentos. Criaram-se dois grupos distintos, Exactyon 18:05:12_6m (66,3 kg árvore⁻¹) e Testemunha (69,5 kg árvore⁻¹), com valores significativamente mais baixos que os registados nos tratamentos Humix 12:03:05 (97,0 kg árvore⁻¹), BoskGrow 20:05:20 (92,2 kg árvore⁻¹) e Exactyon 18:05:13_3m (90,6 kg árvore⁻¹).

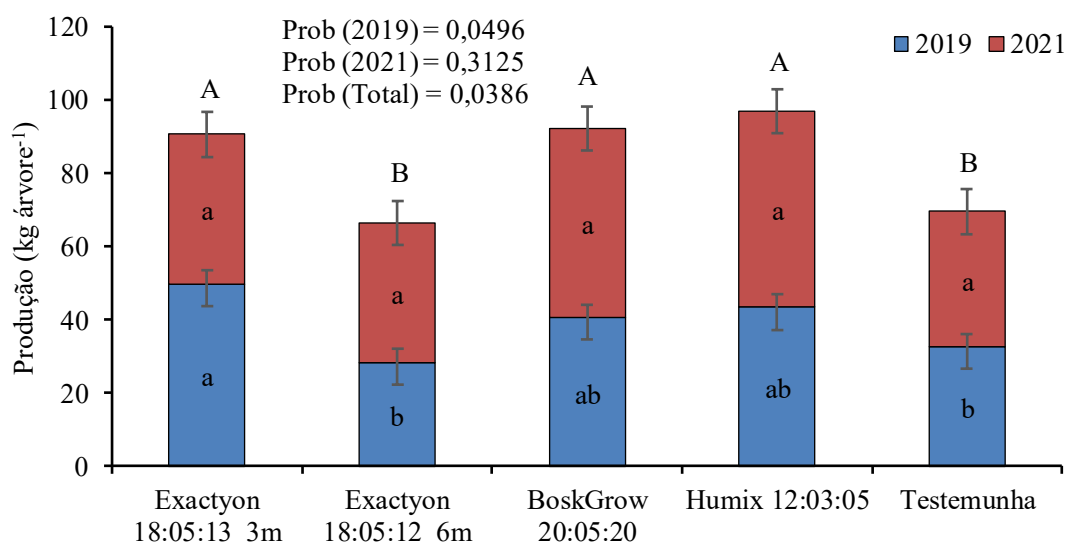


Figura 13. Produtividade da castanha em função do ano de amostragem e dos tratamentos com fertilizantes (Exactyon 18:05:13_3m, Exactyon 18:05:12_6m, BoskGrow 20:05:20, Humix 12:03:05, e Testemunha (não fertilizada)). As diferenças significativas são apresentadas para * $\alpha < 0,05$, ** $\alpha < 0,01$ e *** $\alpha < 0,001$, e ns, para as diferenças não significativas. As barras de erro são o desvio padrão das médias.

O calibre dos frutos não variou de forma significativa com os tratamentos fertilizantes (Figura 14). Os valores médios foram também da mesma ordem de grandeza em 2019 e 2020. Considerando o conjunto dos dois anos, os valores médios variaram de 10,6 a 12,4 g fruto⁻¹.

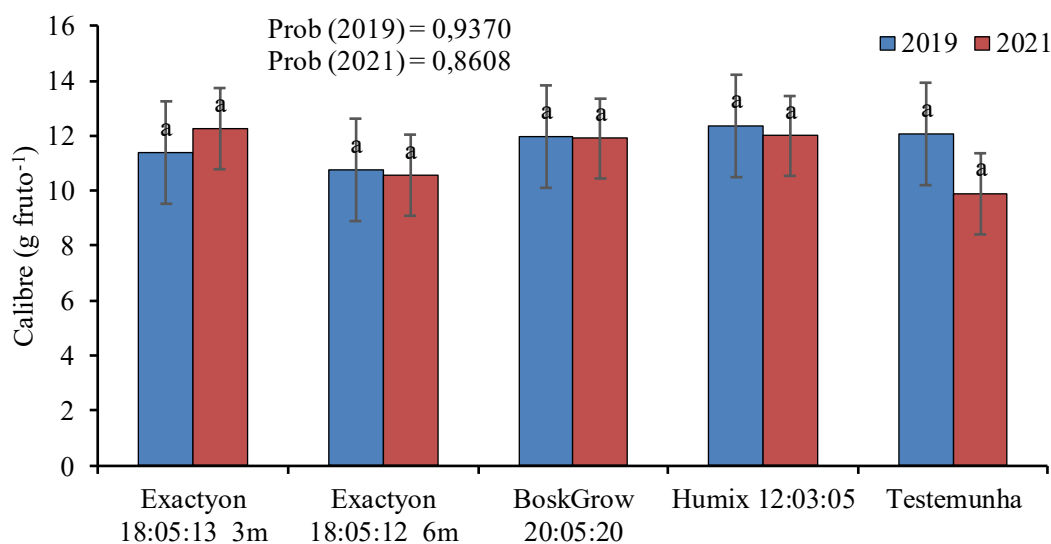


Figura 14. Calibre dos frutos da castanha em função do ano de amostragem e dos tratamentos fertilizantes. Para cada um dos anos, a mesma letra sobre as colunas indica que não se registaram diferenças significativas para $P < 0,05$. As barras verticais são o erro padrão das médias.

4.5. Propriedades do solo

Os teores de carbono orgânico no solo não variaram de forma significativa com os tratamentos fertilizantes (Tabela 6). Os valores médios variam entre 18,6 e 21,1 g kg⁻¹.

O pH, tanto determinado em água como em KCl, não apresentou variação significativa com os tratamentos fertilizantes (Tabela 6). Os valores médios de pH em água variaram entre 4,93 e 5,29 e os valores médios de pH em KCl entre 4,19 e 4,33.

Os tratamentos fertilizantes apresentaram diferenças significativas para os teores de fósforo extraíveis (Tabela 6). Os tratamentos com o fertilizante Exactyon 18:05:13_6m e BoskGrow 20:05:20, com 63,9 mg P₂O₅ kg⁻¹ e 65,3 mg P₂O₅ kg⁻¹, respectivamente, diferiram significativamente do fertilizante orgânico Humix 12:03:05 e da Testemunha,

que apresentaram 44,1 mg P₂O₅ kg⁻¹ e 46,1 mg P₂O₅ kg⁻¹, respectivamente. Por seu lado, o fertilizante Exactyon 18:05:13_3m não apresentou diferenças significativas entre nenhum dos demais tratamentos, com um valor médio de 55,1 mg P₂O₅ kg⁻¹.

Os teores de potássio extraíveis apresentaram diferenças significativas entre tratamentos fertilizantes (Tabela 6). Observou-se o maior teor para o tratamentos com o fertilizante BoskGrow 20:05:20, com 329,3 mg K₂O kg⁻¹, o qual diferiu significativamente dos valores apresentados com o fertilizante orgânico Humix 12:03:05, com 187,0 mg K₂O kg⁻¹, Testemunha, com 220,7 mg K₂O kg⁻¹ e Exactyon 18:05:12_6m, com 245,3 mg K₂O kg⁻¹. Os valores do tratamento Exactyon 18:05:13_3m (261,3 K₂O) não diferiram significativamente dos do tratamento BoskGrow 20:05:20.

Tabela 6. Teores médio de carbono (C) orgânico, pH (H₂O), pH (KCl), fósforo e potássio extraíveis em amostras de solo colhidas em 2021 na camada 0,0-0,2 m em função dos tratamentos fertilizantes.

Tratamentos	C orgânico g kg ⁻¹	pH _(H₂O)	pH _(KCl)	Fósforo mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹	Potássio mg K ₂ O kg ⁻¹
Exactyon 18:05:13_3m	18,6 a*	5,29 a	4,33 a	55,2 ab	261,3 ab
Exactyon 18:05:12_6m	20,1 a	5,29 a	4,27 a	63,9 a	245,3 bc
BoskGrow 20:05:20	21,1 a	5,16 a	4,22 a	65,3 a	329,3 a
Humix 12:03:05	18,4 a	4,93 a	4,19 a	44,1 b	187,0 c
Testemunha	19,0 a	5,25 a	4,20 a	46,1 b	220,7 bc
Probabilidade	0,1270	0,1987	0,4921	0,0004	0,0006
Erro padrão	1,15	0,11	0,06	2,59	14,89

* Valores com a mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey HSD a 5% de probabilidade.

Na tabela 7 apresentam-se os teores no solo dos catiões de troca juntamente com a acidez de troca e a capacidade de troca catiónica (CTC). Os valores de cálcio não apresentaram diferenças significativas entre tratamentos, tendo os valores médios variado entre 1,20 e 2,0 cmol₊ kg⁻¹. A acidez de troca também não apresentou diferenças significativas entre tratamentos fertilizantes, tendo os valores médios sido de 1,57 a 2,27 cmol₊ kg⁻¹. A CTC apresentou valores médios variando entre 4,86 a 5,38 cmol₊ kg⁻¹, não diferindo também significativamente entre tratamentos.

Os valores de magnésio apresentaram diferenças significativas entre o tratamento com o fertilizante Exactyon 18:05:13_3m (0,63 cmol₊ kg⁻¹) e o fertilizante orgânico

Humix 12:03:05 (0,47 cmol₊ kg⁻¹). Os demais tratamentos não diferiram significativamente (Tabela 7).

Para os valores de potássio podem observar-se diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 7). O fertilizante BoskGrow 20:05:20 apresentou o maior valor médio com 1,23 cmol₊ kg⁻¹, diferindo significativamente dos demais tratamentos, que apresentaram valores entre 0,58 a 0,72 cmol₊ kg⁻¹.

Os valores de sódio apresentaram-se mais elevados nos tratamentos com os fertilizantes Exactyon 18:05:13_3m (0,46 cmol₊ kg⁻¹) e Humix 12:05:20 (0,41 cmol₊ kg⁻¹), que diferiram significativamente dos que foram registados no tratamento Exactyon 18:05:12_6m (0,19 cmol₊ kg⁻¹).

Tabela 7. Bases do complexo de troca, acidez de troca e capacidade de troca catiónica (CTC), em amostras de solo colhidas em 2021 na camada 0,0-0,2 m em função dos tratamentos fertilizantes.

Tratamentos	Cálcio	Magnésio	Potássio	Sódio	Ac. troca	CTC
	----- cmol ₊ kg ⁻¹ -----					
Exactyon 18:05:13_3m	2,00 a*	0,63 a	0,72 b	0,46 a	1,57 a	5,38 a
Exactyon 18:05:12_6m	1,73 a	0,56 ab	0,58 b	0,19 b	1,80 a	4,86 a
BoskGrow 20:05:20	1,52 a	0,54 ab	1,23 a	0,27 ab	1,77 a	5,33 a
Humix 12:03:05	1,20 a	0,47 b	0,58 b	0,41 a	2,27 a	4,93 a
Testemunha	1,57 a	0,51 ab	0,66 b	0,31 ab	2,17 a	5,22 a
Probabilidade	0,1369	0,0288	0,0007	0,0086	0,1557	0,6563
Erro padrão	0,20	0,03	0,08	0,04	0,20	0,30

* Valores com a mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey HSD a 5% de probabilidade.

Os teores de boro no solo variaram de forma significativa com os tratamentos fertilizantes (Tabela 8). Exactyon 18:05:13_3m (2,29 mg kg⁻¹) originou valores significativamente mais elevados que todos os restantes tratamentos. Humix 12:03:05 originou os valores mais baixos (0,3 mg kg⁻¹), seguidos da modalidade Testemunha (0,47 mg kg⁻¹).

Os tratamentos fertilizantes não influenciaram de forma significativa a concentração dos micronutrientes ferro, zinco e cobre. As concentrações médias de ferro

apresentaram-se entre 21,62 e 27,05 mg kg⁻¹, as de zinco entre 1,18 e 1,33 mg kg⁻¹ e as de cobre entre 0,76 e 1,07 mg kg⁻¹ (Tabela 8).

Para as concentrações de manganês observaram-se diferenças significativas apenas entre o tratamento com o fertilizante orgânico Humix 12:03:05 (190,99 mg kg⁻¹) e a Testemunha (76,60 mg kg⁻¹) (Tabela 8)

Tabela 8. Concentração de micronutrientes em amostras de solo colhidas em 2021 na camada 0,0-0,2 m em função dos tratamentos fertilizantes.

Tratamentos	Boro	Ferro	Zinco	Cobre	Manganês
	----- mg kg ⁻¹ -----				
Exactyon 18:05:13_3m	2,29 a*	21,62 a	1,33 a	0,87 a	123,97 ab
Exactyon 18:05:12_6m	1,16 b	27,05 a	1,18 a	0,81 a	122,41 ab
BoskGrow 20:05:20	0,70 bc	21,71 a	1,24 a	1,07 a	137,23 ab
Humix 12:03:05	0,30 c	23,84 a	1,31 a	0,76 a	190,99 a
Testemunha	0,47 bc	25,42 a	1,23 a	0,98 a	76,60 b
Probabilidade	< 0,0001	0,1098	0,6181	0,3783	0,0235
Erro padrão	0,16	1,49	0,07	0,12	19,18

* Valores com a mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey HSD a 5% de probabilidade.

Na tabela 9 apresentam-se os valores de NH₄⁺ extraído a quente e a frio e a diferença entre estas duas variáveis, habitualmente designada de NH₄⁺ hidrolisável. Os valores de NH₄⁺ extraído a frio variaram de forma significativa com os tratamentos, designadamente entre o tratamento Exactyon 18:05:12_6m (68,3 mg kg⁻¹) e a Testemunha (23,1 mg kg⁻¹). As concentrações de NH₄⁺ extraídas a frio não mostraram diferenças significativas entre tratamentos, apresentando valores médios entre 10,7 a 39,5 mg kg⁻¹. A combinação das duas variáveis anteriores deu origem a diferenças significativas entre o NH₄⁺ hidrolisável, em que os valores do tratamento Exactyon 18:05:12_6m (29,3 mg kg⁻¹) foram significativamente mais elevados que os dos restantes tratamentos, tendo estes variado entre 12,4 e 19,7 mg kg⁻¹.

A concentração de nitratos no solo no último ano de estudo apresentou diferenças significativas entre tratamentos fertilizantes. O tratamento com o fertilizante Exactyon 18:05:13_3m diferenciou-se de todos os outros tratamentos e apresentou o maior teor de NO₃⁻ no solo com 213,5 mg kg⁻¹. Os tratamentos Exactyon 18:05:12_6m e BoskGrow 20:05:20 não diferiram estatisticamente entre si, com valores de 131,7 e 146,6 mg kg⁻¹,

respectivamente, apresentando concentrações intermediárias no estudo. As menores concentrações observaram-se para os tratamentos Humix 12:03:05 e Testemunha, que não apresentaram diferenças significativas entre si, com valores médios de 50,1 e 62,6 mg kg⁻¹, respectivamente.

Tabela 9. Concentração de amônio (NH₄⁺), obtido por extração com KCl a quente (Q) e a frio (F) e NH₄⁺ hirolisável (H) e concentração de nitrato (NO₃⁻) em amostras de solo colhidas em 2021 na camada 0,0-0,2 m em função dos tratamentos fertilizantes.

Tratamentos	NH ₄ ⁺ Q	NH ₄ ⁺ F	NH ₄ ⁺ H	NO ₃ ⁻
	----- mg kg ⁻¹ -----			
Exactyon 18:05:13_3m	48,0 ab*	28,3 a	19,7 b	213,5 a
Exactyon 18:05:12_6m	68,6 a	39,4 a	29,3 a	131,7 b
BoskGrow 20:05:20	42,8 ab	26,4 a	16,3 b	146,6 b
Humix 12:03:05	37,8 ab	20,4 a	17,5 b	50,1 c
Testemunha	23,1 b	10,7 a	12,4 b	62,6 c
Probabilidade	0,0120	0,0813	0,0007	< 0,0001
Erro padrão	6,97	6,24	1,81	12,81

* Valores com a mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey HSD a 5% de probabilidade.

5. DISCUSSÃO

A testemunha, não fertilizada, tendeu a apresentar-se sempre com os menores teores de nitrogênio nas folhas, coincidindo-se com os valores mais baixos encontrados para o SPAD. As amostras do miolo também apresentaram esse comportando de menor concentração de nitrogênio para testemunha no ano de 2021. Um efeito esperado da adubação nitrogenada é o aumento do teor do nutriente nos tecidos da planta (Arrobas et al., 2019; Rodrigues et al., 2019b; Ferreira et al., 2020).

Embora a fertilização com o adubo BoskGrow 20:05:20 tenha apresentado semelhança na produtividade acumulada com os demais tratamentos, diferindo apenas de Exactyon 18:05:12_6m e a Testemunha, que apresentaram menor produtividade, o adubo BoskGrow 20:05:20 apresentou as maiores concentrações de nitrogênio nas folhas durante os três anos de estudo, tendo também a maior concentração de nitrogênio no miolo e valores maiores para o SPAD no ano de 2021. Esse efeito positivo do adubo BoskGrow 20:05:20 na concentração de nitrogênio foi atribuído ao fato de ser o

fertilizante mais concentrado em nitrogênio entre os demais tratamentos, sendo aplicados 80 kg N ha⁻¹, resultando também em concentração de nitrato no solo no último ano de estudo ainda relativamente elevada. Por suas características de revestimento com camada biodegradável de poliuretano e ureia revestida por nitrato de amônio, considera-se que a liberação foi apenas parcialmente controlada, e com isso manteve-se um equilíbrio entre nitrogênio disponibilizado para a planta durante o período experimental.

Em concentrações de nitrogênio mais baixas que o BoskGrow 20:05:20, o fertilizante Exactyon 18:05:13_3m originou concentrações de nitrogênio na folha apenas ligeiramente mais baixas que BoskGrow 20:05:20, mas apresentou maior teor de nitrato no solo, diferindo significativamente dos demais tratamentos. Sendo um fertilizante de liberação controlada também de três meses, concentra 47% do nitrogênio encapsulado por um polímero e 28,8% de nitrogênio presente como ureia revestida, assim acredita-se que esse mecanismo de controle influenciou na sua relativamente alta concentração na planta durante todos os anos de estudo, mas fez ainda com que se mantivesse alta concentração no solo de nitrato. Considera-se que o nitrato presente no solo é resultado da liberação controlada do fertilizante e da sua menor disponibilidade para as plantas.

O fertilizante Exactyon 18:05:12_6m apresentou ao longo dos três anos um aumento consecutivo nas concentrações de nitrogênio no tecido da planta e de valores SPAD. Contudo a produtividade acumulada da castanha foi baixa, se igualando a Testemunha. Tendo um efeito mais prolongado no controle da liberação de nitrogênio (seis meses), baseado em ureia revestida com enxofre e revestimento de poliuretano (94,9% de N), acredita-se que o fertilizante não liberou quantidades significativas de nitrogênio na altura que a planta pudesse aproveitá-lo. Esse controle na liberação, não estando em sincronia com a demanda da planta, acaba que quando liberado estará propício a perdas para o ambiente, o que acaba constatando-se em maiores concentrações de amônio hidrolisável no solo, o qual é propício para conversão de amônia, sendo esta última perdida por volatilização (Zavaschi et al., 2014; Bhaskar et al., 2022) e que depois se pode transformar em nitrato, sendo perdido por lixiviação e/ou desnitrificação (Wang et al., 2019).

As mais baixas concentrações de nitrogênio nas folhas com o fertilizante orgânico Humix 12:03:05 não resultaram em baixa produtividade da castanha em nenhum ano de estudo, apresentando ainda menores concentrações de nitrato no solo, se igualando a Testemunha, sendo que forneceu 48 kg ha⁻¹ de nitrogênio. O efeito positivo na

produtividade pode ter sido devido aos múltiplos efeitos benéficos da matéria orgânica no solo (Oldfield et al., 2018; Jensen et al., 2019; Rattan, 2020), mesmo tendo fornecido menos nitrogênio para as plantas.

As concentrações de fósforo encontradas no tecido foliar no presente estudo corroboram com as concentrações expostas por Arrobas et al., (2018), mostrando que as plantas encontram-se em uma condição nutricional adequada para o nutriente. Apenas no ano de 2019 houve diferença entre um fertilizante e a Testemunha, sendo o fertilizante Exactyon 18:05:13_3m. Os fertilizantes utilizados têm todas concentrações baixas de fósforo (3 a 5%) o que representa baixas quantidades aplicadas do nutriente anualmente. Por outro lado, Rodrigues et al. (2020) reportam ser difícil verificar aumento na concentração de fósforo nas folhas de castanheiro pelo fato do nutriente se redistribuir pelas partes perenes, como troncos e raízes, que funcionam como um regulador da concentração de fósforo nas folhas. Na casca e no miolo não se registraram diferenças significativas nas concentrações de fósforo durante os anos amostrados, talvez por este órgão não ser um local preferencial de acumulação do nutriente. No solo ocorreram diferenças significativas entre os fertilizantes BoskGrow 20:05:20 e Exactyon 18:05:12_6m para Testemunha e Humix 12:03:05. Ainda que nas folhas a resposta não tenha sido tão clara, nos solos foi significativa, talvez devido à menor concentração de fósforo no fertilizante Humix 12:03:05 (3%) e na Testemunha não ter sido aplicado fósforo. De acordo com a classificação proposta por LQARS (2006), os teores de fósforo no solo são considerados baixos para o fertilizante Humix 12:02:05 e a Testemunha e médios para os demais fertilizantes. A menor flutuação do teor de fósforo nos tecidos relativamente ao solo pode também dever-se ao fato de as árvores terem processos naturais de obtenção de fósforo a partir do solo. As plantas podem estabelecer associações micorrízicas com fungos diversos, sendo capazes de superar os baixos níveis de fósforo no solo (Pereira et al., 2012; Lanfranco, et al., 2016). Por outro lado, a análise foi realizada apenas nos 0,2 m superficiais do solo, camada que pode não representar adequadamente o solo que as raízes exploram, o que pode também ajudar a explicar a menor concordância entre os resultados obtidos a partir do solo e das plantas (Rodrigues et al., 2012).

Os valores de potássio apresentaram tendência em mostrar concentrações baixas nas folhas durante os três anos de estudo. As concentrações de potássio nas folhas apresentaram oscilações ao longo dos anos, tornando-se difícil detectar um padrão claro para os resultados de cada fertilizante. Em 2019 os valores encontrados não diferiram e

estiveram abaixo dos valores normais para as concentrações foliares do nutriente propostas por Arrobas et al. (2018), não superando $7,3 \text{ g kg}^{-1}$ de potássio no tecido foliar. Contudo, no ano de 2020 e 2021 o fertilizante BoskGrow 20:05:20 apresentou as maiores concentrações de potássio nas folhas, seguido também dos maiores teores encontrados de potássio no solo, justificando-se esses valores pela composição do fertilizante (20% de K_2O), tendo sido aplicados 80 kg ha^{-1} , valor superior ao que foi fornecido pelos demais fertilizantes.

Para os teores de cálcio nas folhas, as maiores concentrações encontraram-se com o fertilizante Exactyon 18:05:13_3m, o qual em sua composição continha maior teor de CaCO_3 (14,9%) que os demais fertilizantes. Contudo, os valores obtidos no estudo durante todos os anos (não superiores a $3,0 \text{ g kg}^{-1}$), não atendem os valores normais de concentrações estabelecido por Arrobas et al. (2018) para as folhas do castanheiro ($5 \text{ a } 15 \text{ g kg}^{-1}$), ressaltando também não atenderem as concentrações normais para o miolo. O resultado deve estar relacionado com o fato do solo ser bastante ácido. Estudos anteriores indicaram que o castanheiro provavelmente é uma espécie bem adaptada a solos ácidos, podendo ser cultivada satisfatoriamente com baixos teores de cálcio nas folhas (Rodrigues et al., 2020). O cálcio encontra-se associado às paredes e membranas celulares, sendo pouco móvel na planta (Havlin et al., 2014) e, quando em falta, pode prejudicar o desenvolvimento do fruto, aspeto que parece não se verificar no castanheiro. Arrobas et al. (2018) e Rodrigues et al. (2019a) também apresentaram em seus estudos valores de cálcio abaixo da faixa de suficiência em castanheiros cultivados em solos ácidos.

Os teores de magnésio não apresentaram comportamento com alguma tendência clara entre tratamentos, ressaltando que os teores foliares mostraram-se dentro ou muito próximos da faixa de suficiência estabelecida por Arrobas et al. (2018), que é dentre $1,3 \text{ a } 6,0 \text{ g kg}^{-1}$.

A concentração de boro nas folhas apresentou diferenças significativas em todos os anos de estudo, agrupando o fertilizante Exactyon 18:05:13_3m juntamente com o Exactyon 18:05:12_6m com maiores concentrações que os demais tratamentos e havendo acréscimo no decorrer dos anos. Valores estes justificados pela composição desses fertilizantes (cerca de 0,69% de B_2O_3), de que resultou maior adição de boro ao solo. O boro é um nutriente do qual há evidências experimentais que comprovam a necessidade de sua aplicação nesta região (Portela et al., 2011; Arrobas et al., 2017; Rodrigues et al.,

2019a). O boro pode limitar o crescimento das árvores, reduzindo a altura e diâmetro do tronco, devendo sempre ser considerado no plano de fertilização dos pomares (Azevedo, 2014). Em alguns casos de deficiência podem aparecer sintomas, como abortamento, frutos mumificados e queda prematura de frutos (Portela et al., 2015). Contudo, Arrobas e Rodrigues (2020), ainda apontam em seu capítulo sobre fertilização em castanheiros, que o boro é um elemento que exige precauções na sua aplicação, uma vez que em doses elevadas é tóxico para as plantas, em especial para árvores jovens.

A concentração de manganês nas folhas, miolo e também no solo apresentaram-se menores na Testemunha e maiores nos fertilizantes, em especial no Fertilizante Humix 12:03:05. Os fertilizantes mesmo com concentrações mínimas elevavam significativamente os teores na planta e no solo em relação a Testemunha não fertilizada.

Os resultados das concentrações dos demais nutrientes nos tecidos vegetais e no solo foram pouco conclusivos.

6. CONCLUSÕES

A Testemunha não fertilizada tendeu a apresentar concentrações baixas de nutrientes nas folhas, no fruto e também nitrogênio mineral no solo.

O fertilizante BoskGrow 20:05:20 apresentou maior concentração de nitrogênio nas folhas do castanheiro e teores intermediários de nitrogênio mineral no solo em comparação com os demais tratamentos. Também apresentou concentrações mais elevadas de potássio nas folhas e no solo.

O fertilizante Exactyon 18:05:13_3m embora tenha apresentado comportamento semelhante ao fertilizante BoskGrow 20:05:20, principalmente resultando em elevada produtividade acumulada e concentrações adequadas de nutrientes para o castanheiro, foi o tratamento que registou os valores mais elevados de nitratos no solo.

O fertilizante Exactyon 18:05:12_6m registou produção acumulada equivalente a Testemunha, provavelmente devido a controle da liberação de nitrogênio por tempo excessivo, baseado em ureia revestida com enxofre e revestimento de poliuretano (94,9% de N). Isso terá feito com que o fertilizante não liberasse quantidades significativas de nitrogênio na altura que a planta pudesse aproveitá-lo, deixando ainda propensão de perdas de nitrogênio para o ambiente.

O fertilizante orgânico Humix 12:03:05 embora tenha apresentado concentrações baixas de nitrogênio nas folhas, apresentou produtividade acumulada igual estatisticamente aos demais fertilizantes, resultando ainda em concentrações baixas de nitrato no solo, mostrando assim ser uma boa opção de fertilizante para o castanheiro.

7. REFERÊNCIAS

- Abreu, C. G. (2007). **Castanheiros: Origem e dispersão do castanheiro pelo Mundo**. Programa Agro 499. Vila Real.
- Adams, C.; Frantz, J.; Bugbee, B. (2013). Macro- and micronutrient-release characteristics of three polymer- coated fertilizers: Theory and measurements. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.176, p. 76-88.
- Agustí, M. (2010). **Fruticultura**. Universidad Politécnica. Valencia. Mundi-Prensa. p.388 - 395.
- Alix, A.; Capri, E. (2018). Modern agriculture in Europe and the role of pesticides. Advances in Chemical Pollution, **Environmental Management**. v.2, p.1-22.
- Arrobas, M.; Afonso, S.; Ferreira, I.; Moutinho-Pereira, J.; Correia, C.; Rodrigues, M. Â. (2017). Liming and application of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron on a young plantation of chestnut. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v.41, p.441-451.
- Arrobas, M.; Afonso, S.; Rodrigues, M. Â. (2018). Diagnosing the nutritional condition of chestnut groves by soil and leaf analyses. **Scientia Horticulture**, v228, p.113-121.
- Arrobas, M.; Rodrigues, M. Â. (2020). Fertilização. In: Bento, A.; Ribeiro, A. C. **Manual de boas práticas do Castanheiro**. Comunidade Intermunicipal das Terras de Trás-os-Montes. p.129-146.
- Azevedo, E. J. V.; (2014). **Resposta do castanheiro à aplicação de fertilizantes ao solo**. Dissertação em Agroecologia. Bragança, Portugal.
- Beig, B.; Niazi, M. B. K.; Jahan, Z.; Pervaiz, E.; Abbas Shah, G.; Ul Haq, M.; Zafar, M. I.; Zia, M. (2020). Slow-release urea prills developed using organic and inorganic blends in fluidized bed coater and their effect on spinach productivity. **Sustainability**, v.12, ed. 5944.
- Bhaskar, K. A.; Al-Hashimi, A.; Meena, M.; Meena, V. S.; Langyan, S.; Shrivastava, M.; Sayyed, R. Z.; El-Enshasy, H. A.; Almunjedhi, B. M. A.; Singh, R. (2022). Conservation agricultural practices for minimizing ammonia volatilization and maximizing wheat productivity. **Environmental Science and Pollution Research**, v.29, p.9792–9804.
- Bhat, M. R.; Murthy, D. V. R.; Saidutta, M. B. (2011). Modeling of urea release from briquettes using semi infinite and shrinking core models, **Chemical Product and Process Modeling**, v.6, n.1.
- Bremner, John. M. Nitrogen-Total. In: Methods of soil analysis. Part 3, Chemical methods- SSSA (1996). **Soil Science Society of America Book Series**. Book Series no 5. pp. 1085-1122.
- Cardoso, J. F.; Pereira, M. P. (2007). **Castanheiros: O castanheiro de fruto em Portugal**. Programa Agro 499. Vila Real.
- Chen, J.; Lü, S.; Zhang, Z.; Zhao, X.; Li, X.; Ning, P.; Liu, M.; (2018). Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment. **Science of The Total Environment**, v.613–614, p.829-839.
- 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.
- Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD). (1988). **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas.
- Conedera, M.; Krebs, P.; Tinner, W.; Pradella, M.; Torriani, D. (2004). The cultivation of *Castanea sativa* (Mill.) in Europe, from its origin to its diffusion on a continental scale. **Springer-Verlag**, v.13, p.161-179.

Couto, Jessica Oliveira do. (2018). **A gestão da cadeia de abastecimento sustentável: O negócio da castanha portuguesa**. Dissertação (Mestrado) - Negócios Internacionais. Universidade do Minho, Escola de Economia e Gestão. 2018.

Edwards, C. A.; Lal, R.; Madden, P.; Miller, R. H.; House, G. (1990). **Sustainable Agricultural Systems**. Florida: St. Lucia Press.

Elhanafi, L.; Houhou, M.; Rais, C.; Mansouri, I.; Elghadraoui, L.; Greche, H. (2019). Impact of Excessive Nitrogen Fertilization on the Biochemical Quality, Phenolic Compounds, and Antioxidant Power of *Sesamum indicum* L Seeds. **Journal of Food Quality**, p.1–6.

Fageria, N. K.; Baligar, V. C.; Jones, C. A. (2011). **Growth and mineral nutrition of field crops**. Boca Raton: FL CRC Press.

FAO - **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat>. Acesso em: 10 ago. 2021.

Ferreira, I. Q.; Arrobas, M.; Moutinho-Pereira, J. M.; Correia, C. M.; Rodrigues, M. Â. (2020). The effect of nitrogen applications on the growth of young olive trees and nitrogen use efficiency. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v.44, p.278-289.

Fertahi, S.; Ilsouk, M.; Zeroual, Y.; Oukarroum, A.; Barakat, A. (2021). Recent trends in organic coating based on biopolymers and biomass for controlled and slow-release fertilizers. **Journal of Controlled Release**, v.330, p.341-361.

França, D.; Messa L. L.; Souza, C. F.; Faez, R. (2019). Nano and Microencapsulated Nutrients for Enhanced Efficiency Fertilizer. In: Gutiérrez T. (eds) **Polymers for Agri-Food Applications**. Springer, Cham. p.29-44.

Francis, C. A.; Youngberg, G. (1990). **Sustainable Agriculture in Temperate Zones**. John Wiley And Sons, Inc : New York, New York, Usa.

Gabrielli, A. (1994). La civiltà del castagno. In: Monti e Boschi, 65, 3 Gobet, E., Tinner, W., Hubschmid, P., Jansen, I., Wehrli, M., Ammann, B., Wick, L. (2000). Influence of human impact and bedrock differences on the vegetational history of the Insubrian southern Alps. **Vegetation History and Archaeobotany**, v.9, p.175– 187.

Gençer, N, S.; Mert, C. (2019). Studies on the gall characteristics of *Dryocosmus kuriphilus* in chestnut genotypes in Yalova and Bursa provinces of Turkey. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v.47(1), p.177–182.

Gianquinto, G.; Muñoz, P.; Pardossi, A.; Ramazzotti, S.; Savvas, D. (2013). Soil fertility and plant nutrition. Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops. **Principles for Mediterranean Climate Areas**. FAO, Rome, Italy, p.205–269.

Gouveia, E. (2020). Doenças do Castanheiro. In: Bento, A.; Ribeiro, A. C. **Manual de boas práticas do Castanheiro**. Comunidade Intermunicipal das Terras de Trás-os-Montes. p.189-201.

Gras, R.; Benoit, M.; Deffontaines J. P.; Duru, M.; Lafarge, M.; Langlet, A.; Osty, P. L.; (1989). **Le Fait Technique en Agronomie: Activité Agricole, Concepts et méthodes d Étude**. INRA. Editions L'Harmattan.

Halvorson, A. D.; Snyder, C. S.; Blaylock, A. D.; Del Grosso, S. J. (2014). Enhanced-efficiency nitrogen fertilizers: Potential role in nitrous oxide emission mitigation. **Agronomy Journal**, v.106, p.715–722.

Havlin, J. L.; Tisdale, S. L.; Nelson, W. L.; Beaton, J. D. (2014). **Soil Fertility and Fertilizers**. Pearson, Boston, USA.

Hergert, G.; Ferguson, R.; Wortmann, C.; Shapiro, C.; Shaver, T. (2011). Enhanced Efficiency Fertilizers: Will They Enhance My Fertilizer Efficiency?. **Extension Soils Specialists**.

Hester, R.E.; Harrison, R.M.; Addiscott, T.M. (1996). Fertilizers and nitrate leaching. *In*: Hester, R.E., Harrison, R.M. (Eds.), **Agricultural Chemicals and the Environment**. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK. p.1–26.

INE, (2021). Estatísticas Agrícolas. **Instituto Nacional de Estatística**, I.P. Lisboa, Portugal.

IPCC. (2013). **Climate change. The physical science basis**. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Irfan, S. A.; Razali, R.; KuShaari, K.; Mansor, N.; Azeem, B.; Versupt, A. N. F. (2018). A review of mathematical modeling and simulation of controlled-release fertilizers. **Journal of Controlled Release**, v.271, p.45-54.

Jensen, J. L.; Schjøning, P.; Watts, C. W.; Christensen, B. T.; Peltre, C.; Munkholm, L. M. (2019). Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability, **Geoderma**, v.337, p.834-843.

Jin, F. (2018). Environmental pollution caused by excessive use of chemical fertilizers. **Journal of Green Science and Technology** v.04, p.102–103.

Khan, M. A.; Mingzhi, W.; Lim, B.-K.; Lee, J.-Y. (2008). Utilization of waste paper for an environmentally friendly slow-release fertilizer. **Journal of Wood Science**, v.54, p.158–161.

Khan, M. N.; Mobin, M.; Abbas, Z. K.; Alamri, S. A. (2018). Fertilizers and Their Contaminants in Soils, Surface and Groundwater. **Encyclopedia of the Anthropocene, Elsevier**, p.225-240.

Kopittke, P. M.; Menzies, N. W.; Wang, P.; McKenna, B.A. (2019). Lombi, E. Soil and the intensification of agriculture for global food security. **Environment International**, n.132.

Kopittke, P.M.; Dalal, R.C.; Finn, D.; Menzies, N.W. (2017). Global changes in soil stocks of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulphur as influenced by long-term agricultural production. **Global Change Biology**, v.23 p.2509-2519.

Lakanen, E.; Ervio, R. (1971). A comparison of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soils. **Acta Agraria Fennica** v.123, p.223-232.

Lal, Rattan. (2020). Soil organic matter content and crop yield. **Journal of soil and water conservation**, v.75, Ed.72.

Landais, E. (1998). **Agriculture Durable: Les Fondements d'un Nouveau Contrat Social**, *Courrier de l'Environnement*. v.33 p.5–22.

Lanfranco, L.; Bonfante, P.; Genre, A.; (2016). The mutualistic interaction between plants and arbuscular mycorrhizal fungi. **Microbiology Spectrum**, v.4(6), p.1–20

Laranjo, J.G.; Peixoto, F.; Cardozo, J.F. (2009) – **Castanheiro, Técnicas e Práticas, Pupilo Consulting** – Industria Criativa & Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.

Li, T.; Zhang, W.; Yin, J.; Chadwick, D.; Norse, D.; Lu, Y.; Liu, X.; Chen, X.; Zhang, F.; Powlson, D.; Dou, Z. (2017). Enhanced-efficiency fertilizers are not a panacea for resolving the nitrogen problem. **Global Change Biology**, v.24.

Liu, G.; Zotarelli, L.; Li, Y.; Dinkins, D.; Wang, Q.; Ozores-Hampton, M. (2014). Controlled-release and slow-release fertilizers as nutrient management tools. USA: US Department of Agriculture, **UF/IFAS Extension Service**, University of Florida, IFAS.

LQARS (2006) - Manual de Fertilização de Culturas. INIAP, Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva. Lisboa, Portugal.

- MAP – Ministério da Agricultura e Pescas, Laboratório Químico-Agrícola Rebelo da Silva. (1977) **Sector Fertilidade do Solo**. Documentação 2. D.G.S.A.
- McBratney, A. B.; Morgan, C. L. S.; Jarrett, L. E. (2017). The value of soil's contributions to ecosystem services. *Global Soil Security*, **Springer International Publishing**, Cham.
- Minolta Camera Co. Ltd. (2009). **Chlorophyll meter SPAD-502Plus**. Minolta, Osaka, Japan.
- Monsalve, M. C.; Leorri, A. B.; Sánchez, C.; Murua, G. M.; Estavillo, J. M. (2021). Joint application of urease and nitrification inhibitors to diminish gaseous nitrogen losses under different tillage systems, **Journal of Cleaner Production**, v.289.
- Murolo, S.; Concas, J.; Romanazzi, G. (2019). Use of biocontrol agents as potential tools in the management of chestnut blight. **Journal Biological Control**, v.132, p.102–109.
- Myhre, G.; Shindell, D.; Bréon, F-M.; Collins, W.; Fuglestedt, J.; Huang, J.; Koch, D.; Lamarque, J. F.; Lee, D.; Mendoza, B. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. *In*: Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G. K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; PM, M, et al., editors. **Climate Change. The physical science basis**. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. p.659–740.
- Oldfield, E. E.; Wood, S. A.; Bradford, M. A. (2018). Direct effects of soil organic matter on productivity mirror those observed with organic amendments. **Plant Soil**, v.423, p.363–373.
- Paiva, J. (2007). **Árvores e florestas de Portugal**. Do castanheiro ao Teixo. As outras espécies florestais. Público, v.5. Lisboa.
- Patnaik, P. (2010). **Handbook of Environmental Analysis: Chemical Pollutants in Air, Water, Soil, and Solid Wastes**. CRC Press.
- Pereira, E.; Coelho, V.; Tavares, R. M.; Lino-Neto, T.; Baptista, P. (2012) Effect of competitive interactions between ectomycorrhizal and saprotrophic fungi on *Castanea sativa* performance. **Journal Mycorrhiza**, v.22, p.41–49.
- Portela, E.; Ferreira-Cardoso, J. V.; Louzada, J. L.; (2011). Boron application on a Chestnut orchard: effect on yield and quality of nuts. **Journal of Plant Nutrition**, v.34, p.1245–1253.
- Portela, E.; Vale, R.; Abreu, M. M. (2015). Carências de boro no interior – norte e centro – de Portugal. **Revista Ciências Agrárias**, v.38(4), p.484–517.
- Ransom, C. J.; Jolley, V. D.; Blair, T. A.; Sutton, L. E.; Hopkins, B. G. (2020). Nitrogen release rates from slow- and controlled-release fertilizers influenced by placement and temperature. **Plos One**, v.15, n.6, p.21.
- Ravishankara, A. R.; Daniel, J. S.; Portmann, R. W. (2009). Nitrous Oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. **Science**. v.326, Ed. 5949, p.123-125.
- Regulamento (UE) 2019/1009 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de junho de 2019, que estabelece regras sobre a disponibilização no mercado de produtos fertilizantes da UE e altera os Regulamentos (CE) n.º 1069/2009 e (CE) n.º 1107/ 2009 e que revoga o Regulamento (CE) n.º 2003/2003.
- Robertson, G. P.; Groffman, P. M.; (2015). Chapter 14 - **Nitrogen Transformations**, Editor(s): Eldor A. Paul, *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry (Fourth Edition)*, Academic Press, p.421-446.
- Rodale, R. (1983). Breaking new ground: The search for a sustainable agriculture. **The Futurist 1(1)**: p.15-20.

- Rodrigues, M. Â. (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.; Coelho, V.; Arrobas, M.; Gouveia, E.; Raimundo, S.; Correia, C.; Bento, A. (2019b). The effect of nitrogen fertilization on the incidence of olive fruit fly, olive leaf spot and olive anthracnose in two olive cultivars grown in rainfed conditions. **Scientia Horticulturae**, v.256.
- Rodrigues, M. Â.; Ferreira, I. Q.; Claro, A. M.; Arrobas, M. (2012) Fertilizer recommendations for olive based upon nutrients removed in crop and pruning. **Scientia Horticulture**, v.142, p.205–211.
- Rodrigues, M. Â.; Grade, V.; Barroso, V.; Barroso, V.; Pereira, A.; Cassol, L. C.; Arrobas, M. (2019a). Response to Organo-mineral and Controlled-Release Fertilizers in Rainfed Growing Conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.20, p.380–391.
- Rodrigues, M.Â.; Raimundo, S.; Pereira, A.; Arrobas, M. (2020). Large Chestnut Trees (*Castanea sativa*) Respond Poorly to Liming and Fertilizer Application. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.20, p.1261–1270.
- Sapkota, T. B.; Singh, L. K.; Yadav, A. K.; Khatri-Chhetri, A.; Jat, H. S.; Sharma, P. C.; Jat, M. L.; Stirling, C. M. (2020). Identifying optimum rates of fertilizer nitrogen application to maximize economic return and minimize nitrous oxide emission from rice–wheat systems in the Indo-Gangetic Plains of India. **Archives of Agronomy and Soil Science**. v.66, n.44, p.2039-2054.
- Shaviv, A. (2001). Advances in controlled-release fertilizers, **Advances in Agronomy**, Academic Press, v.71, p.1-49.
- Silva, E.; Arrobas, M.; Gonçalves, A.; Martins, S.; Raimundo, S.; Pinto, L.; Brito, C.; Pereira, J. M.; Correia, C. M.; Rodrigues, M. A. (2021). A controlled-release fertilizer improved soil fertility but not olive tree performance. **Nutrient Cyclin in Agroecosystems**, v.120, p.1–15.
- Stewart, W. M.; Dibb, D. W.; Johnston, A. E.; Smyth, T. J. (2005). The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. **Agronomy Journal**. v.97, p.1–6.
- Temminghoff, E. J. M.; Houba, V. J. G. (2004). **Plant Analysis Procedures**. 2nd ed.
- Tilman, D.; Cassman, K.G.; Matson, P.A.; Naylor, R.; Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature** v.418, p.671–677.
- Tisdale, S. L.; Nelson, W. L.; Beaton, J. D. (1985). Soil Fertility and Fertilizers. 4^a ed., **Macmillan Publishing Company**, New York, 754 p.
- Trenkel, M.E. (1997): Improving Fertilizer Use Efficiency. Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture. **The International Fertilizer Industry Association**, Paris.
- Trenkel, M.E. (2010). **Slow- and Controlled-release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture**, 2nd ed., International Fertilizer Industry Association. Paris, France p.163.
- Van Reeuwijk. (2002). **Procedures for soil analysis**. Sixth edition. ISRIC. FAO.
- Vashishtha, M.; Dongara, P.; Singh, D. (2010). Improvement in properties of urea by phosphogypsum coating. **International Journal od ChemTech Reseach**, v.2, n.1, p.36-44.
- Vieira, R.F. (2017). **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. Brasília: Embrapa.
- Wang, S. (2002). **Harm of excessive application of chemical fertilizer and its control measures**. Qinghai Nonglin Keji v.2, 25 p.

Wang, Y.; Ying, H.; Yin, Y.; Zheng, H.; Cui, Z. (2019). Estimating soil nitrate leaching of nitrogen fertilizer from global meta-analysis, **Science of The Total Environment**, v.657, p.96-102.

Wen, P.; Wu, Z.; He, Y.; Ye, B.-C.; Han, Y.; Wang, J.; Guan, X. (2016). Microwave-assisted synthesis of a semi-interpenetrating polymer network slow-release nitrogen fertilizer with water absorbency from cotton stalks. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v.4, p.6572–6579.

Xiang, Y.; Ji-yun, J.; Ping, H.; Ming-zao, L. (2008). Recent Advances on the Technologies to Increase Fertilizer Use Efficiency. **Agricultura Sciences in China, Science Direct**. v.7(4), p.469-479.

Zahm, F.; Viaux, P.; Vilain, L.; Girardin, P.; Mouchet, C. (2020). Farm Sustainability Assessment using the IDEA Method. From the concept of farm sustainability to case studies on French farms. 1. **INFASA Symposium**, Berne, Switzerland.

Zhang, S. (2017). Study on the effect of balanced fertilization on Rice yield in saline alkaline soil. **Agriculture and Technology** v.37, p.109–120.

Zhang, Y., He, X. (2015). Talking about the problems and suggestions of soil testing and formula fertilization. **Shan Xi Agricultural Economy**, v.2, p.72–73.