

# **Cobertura herbácea da entrelinha do olival, controle da erosão e propriedades físicas do solo: efeitos da espécie da flora espontânea e semeada**

**Lucas Salcoski Rossoni**

*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-Campus Pato Branco.*

Orientado por

**Prof. Doutor Tomás de Figueiredo**

**Prof<sup>a</sup>. Doutora Zulimar Hernández**

**Prof<sup>a</sup> Doutora. Rachel Muylaert Locks Guimarães**

**Bragança**

**2025**

**Cobertura herbácea da entrelinha do olival, controle da erosão e propriedades físicas do solo: efeitos da espécie da flora espontânea e semeada**

Lucas Salcoski Rossoni

Prof. Dr. Tomás de Figueiredo

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Zulimar Hernández

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Rachel Muylaert Locks Guimarães

Bragança, dezembro de 2025.

## RESUMO

A erosão hídrica constitui um dos principais fatores de degradação dos solos agrícolas em regiões mediterrâneas, onde a combinação entre elevada pluviosidade concentrada, declives acentuados e manejo inadequado potencializa a perda de solo e nutrientes. Nos olivais tradicionais do Nordeste de Portugal, a prática frequente de mobilização do solo, visando o controle de plantas espontâneas, tem agravado o processo erosivo e comprometido a sustentabilidade produtiva e ambiental desses sistemas. Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes espécies e densidades de plantas de cobertura sobre os processos erosivos e as propriedades físicas e hidráulicas do solo, sob condições controladas de chuva simulada. Foram conduzidos dois ensaios experimentais em lisímetros, utilizando espécies de cobertura com distintos hábitos radiculares (*Lolium multiflorum*, *Calendula officinalis*, *Ornithopus compressus*, *Brachypodium distachyon*, *Trifolium subterraneum*, *Centaurea cyanus* e *Silene gallica*), além de um tratamento controle sem vegetação. As variáveis analisadas incluíram escoamento superficial, perda de solo, salpicamento, densidade aparente, porosidade total, macro e microporosidade, condutividade hidráulica (inicial e final), capacidade de campo (CC) e capacidade máxima de água (CMA).

Os resultados demonstraram que a presença de cobertura vegetal reduziu significativamente o escoamento e a perda de solo, evidenciando forte correlação inversa entre a porcentagem de cobertura e a Erosividade ( $R^2 > 0,90$ ). As plantas de cobertura também promoveram melhorias estruturais expressivas, reduzindo a densidade aparente e aumentando a conectividade do sistema poroso. Observou-se que a macroporosidade e a condutividade hidráulica foram fortemente influenciadas pela atividade radicular, sendo que os tratamentos com maior emergência e densidade de plantas apresentaram condutividade mais elevada, mesmo quando o volume total de macroporos era inferior, o que indica que a continuidade e funcionalidade dos poros são mais determinantes que seu volume absoluto. De forma geral, os ensaios revelaram que o uso de plantas de cobertura contribui para a melhoria da estrutura e da funcionalidade hidráulica do solo, reduzindo a vulnerabilidade à erosão e promovendo maior eficiência no uso da água. Além dos benefícios ambientais, a adoção dessas práticas apresenta viabilidade econômica e relevância social, pois alia a conservação dos recursos naturais ao fortalecimento da sustentabilidade da olivicultura transmontana. Os resultados obtidos reforçam que a cobertura vegetal, quando adequadamente manejada, representa uma ferramenta eficaz e ecologicamente responsável para o controle da erosão e a recuperação da qualidade física dos solos mediterrâneos.

**Palavras-chave:** Erosão hídrica; Plantas de cobertura; Propriedades físicas do solo; Condutividade hidráulica; Conservação do solo; Olival mediterrâneo.

## ABSTRACT

Water erosion is one of the main factors of soil degradation in Mediterranean agricultural regions, where the combination of intense and concentrated rainfall, steep slopes, and inadequate management practices increases soil and nutrient losses. In traditional olive groves of Northeast Portugal, frequent soil tillage aimed at controlling spontaneous vegetation has intensified erosion processes, compromising both the productive and environmental sustainability of these systems. In this context, the present study aimed to evaluate the effects of different cover crop species and sowing densities on soil erosion and on the physical and hydraulic properties of the soil, under controlled simulated rainfall conditions. Two experimental trials were carried out in erosion trays using cover crop species with contrasting root systems (*Lolium multiflorum*, *Calendula officinalis*, *Ornithopus compressus*, *Brachypodium distachyon*, *Trifolium subterraneum*, *Centaurea cyanus* and *Silene gallica*), as well as a bare soil control. The variables analyzed included surface runoff, soil loss, splash detachment, bulk density, total, macro- and microporosity, hydraulic conductivity (initial and final), field capacity (FC), and maximum water capacity (MWC).

Results showed that the presence of vegetation significantly reduced both runoff and soil loss, revealing a strong negative correlation between soil cover percentage and erosion intensity ( $R^2 > 0.90$ ). Cover crops also promoted structural improvements, decreasing bulk density and enhancing pore system connectivity. It was observed that macroporosity and hydraulic conductivity were strongly influenced by root activity, as treatments with higher plant emergence and density exhibited greater conductivity even when total macroporosity was lower, indicating that pore continuity and functionality are more decisive than total pore volume. Overall, the experiments demonstrated that the use of cover crops effectively improves soil structure and hydraulic functionality, reducing vulnerability to erosion and enhancing water use efficiency. Beyond environmental benefits, adopting such practices offers economic feasibility and social relevance, as it combines natural resource conservation with the long-term sustainability of the Trás-os-Montes olive groves. The results highlight that cover crops, when properly managed, are an efficient and ecologically responsible tool for erosion control and for restoring the physical quality of Mediterranean soils.

**Keywords:** Water erosion; Cover crops; Soil physical properties; Hydraulic conductivity; Soil conservation; Mediterranean olive grove.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ser base, refúgio e por me permitir ter chegado até aqui. A minha família, meu pai Valdecir Rossoni e minha mãe Liliane Salcoski, por acreditarem nesse meu sonho e por me apoiarem a viver tudo isso, meu mais sincero obrigado, mesmo com a distância se fizeram presentes através de chamadas onde compartilhávamos conversas, momentos e risada, amo vocês.

Agradecer de maneira especial meu orientador, Prof. Doutor Tomás de Figueiredo pelas inúmeras conversas, suporte, e risadas compartilhadas, sem dúvidas foi mais do que um orientador, se tornou um grande amigo e que me motiva e seguir nessa jornada em busca do conhecimento, foi um prazer imenso de tal maneira que não consigo demonstrar em palavras ter conversado com o senhor. Agradecer a minhas coorientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Zulimar Hernández pelas idas a campo, trocas de ideia e auxílio no desenvolvimento desta dissertação.

De maneira especial, agradecer a minha coorientadora prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rachel Muylaerts Locks Guimarães, pôr no início do meu percurso acadêmico ter visto potencial em mim, acreditado nas minhas competências e ter me ajudado a chegar até esse momento, com maior certeza do mundo sou eternamente grato por ser seu orientado e afirmo que a senhora foi mais que uma orientadora, foi amiga, carregou carinho e não sei como demonstrar a admiração que sinto.

Agradeço a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Felicia Fonseca pelas conversas e ensinamentos sobre solos, um agradecimento mais que especial a Renecleide Viana dos Santos, por todo auxílio e apoio na condução dos ensaios experimentais, nas nossas conversas e momentos dentro de uma estufa gelada e embaixo de um simulador de chuva, afirmo que este trabalho não seria possível sem sua presença, meu mais sincero obrigado, você é “barril”!!!

A UTFPR campus Pato Branco e ao Instituto Politécnico de Bragança, demonstro minha gratidão por através de vocês ser possível viver este momento que ficara marcada pra sempre em minha vida. A todo o corpo docente, profissionais pelas oportunidades em projetos e pesquisas, me sinto orgulhoso de onde vim e só estou aqui graças a essas instituições e pessoas que fizeram parte do meu percurso acadêmico, em especial ao GFIS, ao Cezar Rebouças, Vacilania Pacheco, Esmailson Moreira, Samienta Charles e novamente a Rachel Muylaert Locks Guimarães, por todos os ensinamentos, experiências e risadas compartilhadas tanto em laboratório quanto em campo, nos vemos nesse mundão!

Aos amigos que ficaram no Brasil e que sinto muitas saudades, em especial ao Otavio Augusto Bongiovanni e Renata Duarte, por todos os momentos passados, os apertos em provas, trabalhos, mas acima de tudo à nossa amizade e momentos bons vividos juntos, a amizade de vocês é uma dádiva.

Aos amigos que tive a oportunidade de compartilhar toda essa experiência em Bragança, meus mais sinceros obrigados. Ressaltando, a amizade de Tiago Albrecht Baratieri, Paulo Augusto Crestani, Maria Eduarda Macedo, Alexandre das Rosas Costa e Rodrigo Vilela, as conversas, risadas e experiências vividas com vocês tornaram a 88 mais do que uma casa, se tornou um lar, vocês foram família e tornaram esse período longe do Brasil incrível, novamente obrigado por tudo.

Quero expressar minha profunda gratidão a Joana Baptista, uma pessoa especial que esteve ao meu lado nos momentos mais desafiadores da reta final desta dissertação. Sua presença, apoio e generosidade iluminaram caminhos quando tudo parecia difícil. Compartilhamos momentos incríveis que levarei comigo para sempre, guardados com todo o carinho em meu coração. Joana, obrigado por ser exatamente quem eu precisava para redescobrir a beleza da vida e para lembrar-me de que nenhum percurso precisa ser trilhado sozinho.

Por fim, mas não menos importantes, aqueles que compartilharam algum momento comigo durante este meu percurso acadêmico, tanto no Brasil como em Portugal, espero que minha amizade tenha sido um momento bom na vida de vocês pois a minha sem vocês não teria me feito a pessoa que sou hoje. Por fim, obrigado a todos.

## SUMÁRIO

<b>CAPITULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>3</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 SOLO.....	3
2.1.1 Propriedades Físicas do solo.....	3
2.2 DEGRADAÇÃO DO SOLO.....	4
2.2.1 Perda acelerada da matéria orgânica no solo.....	5
2.3 EROSÃO.....	6
2.3.1 Erosão hidrica.....	6
2.4 AVALIAÇÃO DA EROSÃO DO SOLO: IMPORTÂNCIA E MÉTODOS.....	7
2.5 SIMULADOR DE CHUVA.....	8
2.5.1 Simuladores de chuva por gotejamento.....	8
2.5.2 Simuladores de Chuva Pressurizados.....	9
2.6 MODELOS DE EROSÃO DO SOLO: USLE, RUSLE e MUSLE.....	9
2.6.1 Universal Soil Loss Equation.....	9
2.6.2 Revised Universal Soil Loss Equation.....	10
2.6.3 Modified Universal Soil Loss Equation.....	10
2.7 PROTEÇÃO DO SOLO.....	11
2.7.1. Uso de plantas de cobertura na diminuição da erosão do solo.....	12
2.8 OLIVICULTURA EM PORTUGAL.....	14
2.8.1. Contextualização histórica e geográfica.....	15
2.8.2. Importância econômica dos olivais em Trás-os-montes.....	16
2.8.3. Importância ambiental dos olivais em Trás-os-Montes.....	17
2.8.4. Desafios à conservação do solo em olivais de Trás-os-Montes.....	18
2.9 USO DE PLANTAS DE COBERTURA NA CONSERVAÇÃO DO SOLO.....	19
2.10 PERSPECTIVAS FUTURAS PARA OS OLIVAIS DE TRÁS-OS-MONTES.....	21

<b>CAPITULO III.....</b>	<b>22</b>
<b>3. METODOLOGIAS .....</b>	<b>22</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO .....	22
3.2. TRATAMENTO DO SOLO.....	23
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>26</b>
<b>INSTALAÇÃO.....</b>	<b>26</b>
4.1 IMPLANTAÇÃO DO ENSAIO ESPONTÂNEO .....	26
4.1.1 Avaliações da vegetação .....	27
4.1.2 Cobertura Vegetal.....	27
4.1.3 Simulação de Chuva .....	29
4.2 IMPLANTAÇÃO DO ENSAIO SEMEADO .....	32
<b>CAPITULO V .....</b>	<b>34</b>
5.1 PARÂMETROS REFERENTES A PERDA DE SOLO .....	34
5.1.1 Escoamento .....	34
5.1.2 Perda de solo .....	34
5.1.3 Salpicamento .....	35
5.1.4 Coeficiente de Escoamento.....	35
5.1.5 Concentração de Sedimentos Global.....	35
5.1.6 Concentração de Sedimentos em Suspensão.....	36
5.1.7 Erodibilidade .....	36
5.1.8 Destacabilidade.....	36
5.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO .....	37
5.2.1 Determinação da Condutividade hidráulica do solo .....	37
5.3 TRATAMENTO DOS DADOS.....	39
<b>CAPITULO VI.....</b>	<b>40</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO - ENSAIO ESPONTÂNEO .....</b>	<b>40</b>
6.1 Estatística – Teste de Normalidade e teste F.....	40
6.2 Cobertura do Solo.....	41
6.3 Intensidade de Precipitação.....	43

6.4	Escoamento e Coeficiente de Escoamento .....	44
6.5	Concentração de Sedimentos global e Concentração de Sedimentos em Suspensão	49
6.6	Perda de solo e Erodibilidade.....	53
6.7	Sedimento em suspensão e Sedimento de frente.....	58
6.8	Salpicamento e Destacabilidade .....	60
6.9	Densidade aparente e Porosidade total.....	64
6.10	Micro e Macroporosidade.....	68
6.11	Capacidade máxima de água e Capacidade de campo .....	71
6.12	Permeabilidade inicial e final.....	74
6.13	Cobertura vegetal x Perda de solo .....	78
6.14	Cobertura vegetal x Salpicamento .....	81
6.15	Cobertura vegetal x Erodibilidade .....	83
6.16	Cobertura vegetal x Destacabilidade.....	85
6.17	Densidade aparente x Porosidade .....	86
<b>CAPITULO VII.....</b>		<b>88</b>
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÃO - ENSAIO SEMEADO .....</b>		<b>88</b>
7.1	Estatística – Teste de Normalidade e teste F.....	88
7.2	Cobertura do solo.....	89
7.3	Intensidade de Precipitação.....	93
7.4	Escoamento e Coeficiente de escoamento.....	93
7.5	Concentração de Sedimentos global e Concentração de Sedimentos em suspensão	94
7.6	Perda de solo e Erodibilidade.....	95
7.7	Salpicamento e Destacabilidade .....	97
7.8	Densidade aparente e Porosidade total.....	101
7.9	Micro e Macroporosidade.....	103
7.10	Capacidade máxima de água e Capacidade de campo .....	104
7.11	Permeabilidade inicial e final.....	105
7.12	Cobertura vegetal x Perda de solo .....	109
7.3.2	Cobertura vegetal x Salpicamento .....	110

7.13 Cobertura vegetal x Erodibilidade .....	110
7.14 Cobertura vegetal x Destacabilidade.....	111
<b>CAPITULO VII.....</b>	<b>112</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>116</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - 1 Evolução da área de olivais em Portugal (2003-2023); 2 - Evolução da Produtividade dos Olivais em Portugal. (2003-2023), adaptados de FAOSTAT (2025).</i>	15
<i>Figura 2 – Distribuição relativa correspondente do total por regiões de Portugal referentes a produtividade total de azeitonas, adaptado de INE, 2025.</i>	17
<i>Figura 3 - Localização do Olival referência para o estudo, Sucães, em Mirandela, NE de Portugal.</i>	23
<i>Figura 4 - Ensaio espontâneo montado sobre bancada.</i>	25
<i>Figura 5 - Tabuleiros em processo de saturação.</i>	25
<i>Figura 6 - Determinação de altura de plantas. A. Lolium. B. Calendula. C. Ornithopus.</i>	27
<i>Figura 7 - A. Imagem tirada do tabuleiro com as plantas. B. Imagem processada pelo software Canopeo.</i>	28
<i>Figura 8 - A. Simulador de chuva e suporte para tabuleiros, no momento de ensaio de I; B. Simulador com os coletores de chuva, durante a chuva simulada.</i>	29
<i>Figura 9 - Recipientes, rampas, e tampas de proteção. A. Tampas de proteção, tabuleiros e estruturas. B. Áreas de coleta de sedimentos e água durante simulação.</i>	31
<i>Figura 10 - Dinâmica da cobertura vegetal por tratamento ao longo do período experimental.</i>	42
<i>Figura 11 - escoamento superficial médio (E, mm) obtido durante as simulações de chuva, comparando tratamentos com e sem cobertura vegetal nas diferentes espécies e densidades de semeadura. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.</i>	45
<i>Figura 12 - Coeficiente de escoamento (CE) obtido nas simulações de chuva, comparando tratamentos com e sem cobertura vegetal nas diferentes espécies e densidades de semeadura.. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.</i>	47
<i>Figura 13 - Concentração de sedimentos global (CSg, g L<sup>-1</sup>) nos diferentes tratamentos, comparando condições com e sem vegetação, para as espécies Lolium, Calêndula, Ornithopus e Mix, em diferentes densidades de semeadura. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam</i>	

diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média. \_\_\_\_\_ 51

Figura 14 - Concentração de sedimentos em suspensão (CSs,  $g L^{-1}$ ) nos diferentes tratamentos, comparando condições com e sem vegetação, para as espécies *Lolium*, *Calêndula*, *Ornithopus* e *Mix*, em distintas densidades de semeadura. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média. \_\_\_\_ 52

Figura 15 - Perda de solo (PS,  $g m^{-2}$ ) nos diferentes tratamentos com e sem cobertura vegetal, considerando as espécies *Lolium*, *Calêndula*, *Ornithopus* e *Mix*, sob diferentes densidades de semeadura. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média. \_\_\_\_\_ 54

Figura 16 - Erosão do solo (EROD,  $g m^{-2} mm^{-1}$ ) nos diferentes tratamentos com e sem cobertura vegetal, considerando as espécies *Lolium*, *Calendula*, *Ornithopus* e *Mix*, sob distintas densidades de semeadura. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média. \_\_\_\_\_ 56

Figura 17 - Comparação entre as frações de sedimentos transportados (sedimento de rampa, sedimento em suspensão e perda total de solo) para as espécies *Lolium*, *Calendula*, *Ornithopus* e *Mix* sob diferentes densidades de semeadura e no controle. \_\_\_\_\_ 59

Figura 18 - Salpicamento (SP) em tratamentos com e sem cobertura vegetal (*Lolium*, *Calendula*, *Ornithopus* e *Mix*) sob diferentes densidades de semeadura e controle. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média. \_\_\_\_\_ 61

Figura 19- Comparação da Destacabilidade (DEST) entre os tratamentos com e sem cobertura vegetal (*Lolium*, *Calendula*, *Ornithopus* e *Mix*), sob diferentes densidades de semeadura e

controle. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.	62
Figura 20 - Valores médios de densidade aparente do solo (DAP) obtidos para os diferentes tratamentos com <i>Lolium</i> , <i>Ornithopus</i> , <i>Calendula</i> e <i>Mix</i> , sob distintas densidades de semeadura e controle.	65
Figura 21 - Porosidade total ( $\phi_{total}$ ) dos solos sob diferentes espécies e densidades de cobertura vegetal.	67
Figura 22 - Microporosidade do solo ( $\phi_{m,c,o}$ , $m^3 m^{-3}$ ) nos diferentes tratamentos e densidades de semeadura.	70
Figura 23 - Variação da macroporosidade ( $\phi_{m,c,m}$ ) em função das espécies e densidades de cobertura vegetal.	71
Figura 24 - Comparação dos valores médios de capacidade de campo (CC) e capacidade de máxima armazenagem (CMA) para os diferentes tratamentos.	73
Figura 25 - Condutividade hidráulica saturada (Ksat) inicial dos diferentes tratamentos sob distintas densidades de cobertura vegetal.	74
Figura 26 - Condutividade hidráulica saturada (Ksat) final dos diferentes tratamentos sob distintas densidades de cobertura vegetal.	76
Figura 27 – Condutividade hidráulica inicial (Ki) e final (Kf) nos diferentes tratamentos e níveis de cobertura vegetal.	78
Figura 28 - Influência da cobertura vegetal na redução da perda de solo sob chuva simulada para diferentes espécies de cobertura.	79
Figura 29 - Ajuste exponencial da relação entre salpicamento do solo ( $g m^{-2}$ ) e cobertura vegetal (%) para <i>Lolium</i> , <i>Ornithopus</i> , <i>Calendula</i> e <i>Mix</i>	81
Figura 30 - Ajuste exponencial da relação entre a erodibilidade (EROD, $g m^{-2}$ ) e o percentual de cobertura vegetal para <i>Lolium</i> , <i>Ornithopus</i> , <i>Calendula</i> e <i>Mix</i> .	83
Figura 31 – Ajuste exponencial entre a cobertura vegetal e a destacabilidade do sol (DEST) observada para diferentes espécies em condições controladas de erosão hídrica..	85
Figura 32 - Relação entre a densidade aparente do solo (Dap) e a porosidade total, micro e macroporosidade.	87
Figura 33 - Evolução da cobertura vegetal (%) ao longo do período experimental no segundo ensaio, para as espécies <i>Brachypodium distachyon</i> , <i>Trifolium subterraneum</i> , <i>Centaurea cyanus</i> , <i>Silene gallica</i> e o tratamento <i>Mix</i> , sob diferentes densidades de semeadura (baixa – B, média – M, alta – A)..	90

Figura 34- Escoamento médio ( $E$ , mm) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média. \_\_\_\_ 91

Figura 35 – Coeficiente de escoamento ( $CE$ ) médio da água sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média. \_\_\_\_\_ 91

Figura 36 - Perda de solo ( $PS$ ) média sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média. \_\_\_\_ 91

Figura 37- Salpicamento ( $SP$ ) médio sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média. \_\_\_\_ 92

Figura 38 -Erodibilidade ( $EROD$ ,  $g\ m^{-2}\ mm^{-1}$ ) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média. \_\_\_\_ 92

Figura 39 - Concentração de sedimentos em suspensão ( $CSss$ ,  $g\ L^{-1}$ ) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos

<i>distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.</i>	92
<i>Figura 40 - Concentração global de sedimentos (CSg, g L<sup>-1</sup>) sob diferentes coberturas vegetais e intensidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1<sup>a</sup> simulação e a segunda coluna à 2<sup>a</sup> simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.</i>	93
<i>Figura 41 - Destacabilidade de solo (DEST, g m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>) sob diferentes coberturas vegetais e intensidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1<sup>a</sup> simulação e a segunda coluna à 2<sup>a</sup> simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.</i>	93
<i>Figura 42 - Densidade aparente do solo (DAP, g cm<sup>-3</sup>) sob diferentes coberturas vegetais e intensidades de semeadura no segundo ensaio.</i>	99
<i>Figura 43 Variação da umidade volumétrica (<math>\theta</math>) sob CC e CMA nos tratamentos com diferentes espécies vegetais</i>	99
<i>Figura 44 - Microporosidade (<math>\phi_{micro}</math>, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio.</i>	100
<i>Figura 45- Macroporosidade (<math>\phi_{macro}</math>, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio.</i>	100
<i>Figura 46 – Porosidade total (<math>\phi_{total}</math>, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio.</i>	100
<i>Figura 47 - Condutividade hidráulica do solo saturado inicial (Ksat, cm h<sup>-1</sup>(Ki)) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio.</i>	100
<i>Figura 48 - Condutividade hidráulica do solo saturado final (Ksat, cm h<sup>-1</sup>(Kf)) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio</i>	100
<i>Figura 49 - Condutividade hidráulica inicial (Ki) e final (Kf) do solo (cm h<sup>-1</sup>) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio.</i>	100
<i>Figura 50 - Relação entre a perda de solo (g m<sup>-2</sup>) e a cobertura vegetal (%) no segundo ensaio.</i>	109
<i>Figura 51 - Relação entre o salpicamento (g m<sup>-2</sup>) e a cobertura vegetal (%) no segundo ensaio.</i>	109

*Figura 52 - Relação entre a erodibilidade do solo EROD ( $\text{g m}^{-2}$ ) e a cobertura vegetal (%) no segundo ensaio.* \_\_\_\_\_ 109

*Figura 53 - Relação entre o Destacabilidade do solo DEST ( $\text{g m}^{-2}$ ) e a cobertura vegetal (%) no segundo ensaio.* \_\_\_\_\_ 109

## INDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Parâmetros referentes ao solo coletado</i>	24
<i>Tabela 2 - Grupo, Repetições (Rep.), Nomenclatura (Nomen.), Tratamento e Densidades de Semeadura (Dens. Semeadura) para todas as culturas escolhidas no ensaio Espontâneo.</i>	26
<i>Tabela 3 - Grupo, Repetições (Rep.), Nomenclatura (Nomen.), Tratamento e Densidades de Semeadura (Dens. Semeadura) para todas as culturas escolhidas no ensaio Semeado</i>	32
<i>Tabela 4 - Resultado do teste de normalidade Kolmogorov (5%)</i>	40
<i>Tabela 5 - Valores de p do teste F (ANOVA bifatorial) para o Ensaio Espontâneo.</i>	41
<i>Tabela 6 - Intensidade média de precipitação simulada em função dos tratamentos aplicados.</i>	43
<i>Tabela 7 - Intensidade média e desvio-padrão do escoamento superficial (<math>\text{mm h}^{-1}</math>) obtidos durante as simulações de chuva para os diferentes tratamentos com e sem cobertura vegetal.</i>	44
<i>Tabela 8 - Comparação das médias da concentração de sedimentos global (CSg) e da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) para todos os tratamentos avaliados, sob condições 1ª e 2ª simulação de chuva (com e sem cobertura vegetal).</i>	50
<i>Tabela 9 - Parâmetros físicos do solo, incluindo densidade aparente (<math>\rho</math>), porosidade total (<math>\phi_{\text{total}}</math>) e densidade das partículas (<math>\rho_s</math>), obtidos para os diferentes tratamentos e densidades de semeadura das espécies avaliadas.</i>	66
<i>Tabela 10 - Microporosidade (<math>\phi_{\text{micro}}</math>) e macroporosidade (<math>\phi_{\text{macro}}</math>) do solo (<math>\text{m}^3 \text{m}^{-3}</math>) nos diferentes tratamentos e densidades de semeadura.</i>	68
<i>Tabela 11 - Valores médios de capacidade de máxima de água (CMA), capacidade de campo (CC) e macroporosidade (<math>\phi_{\text{macro}}</math>) do solo nos diferentes tratamentos.</i>	72
<i>Tabela 12 - Parâmetros do ajuste exponencial e métricas derivadas para a relação Perda de Solo <math>\times</math> Cobertura Vegetal (%).</i>	80
<i>Tabela 13 - Perda de solo prevista (<math>\text{g m}^{-2}</math>) pelo modelo exponencial <math>y0^{-kx}</math> em função da cobertura vegetal (%).</i>	81
<i>Tabela 14 - Parâmetros do ajuste exponencial e métricas derivadas para a relação Salpicamento <math>\times</math> Cobertura Vegetal (%).</i>	82
<i>Tabela 15 - Salpicamento previsto (<math>\text{g m}^{-2}</math>) pelo modelo exponencial <math>y0^{-kx}</math> em função da cobertura vegetal (%).</i>	82
<i>Tabela 16 - Parâmetros do ajuste exponencial e métricas derivadas para a relação Erodibilidade <math>\times</math> Cobertura Vegetal (%).</i>	83
<i>Tabela 17 - Valores estimados de erodibilidade (EROD, <math>\text{g m}^{-2}</math>) em função do aumento percentual da cobertura vegetal para diferentes espécies.</i>	84
<i>Tabela 18 - Parâmetros do ajuste exponencial e métricas derivadas da Destacabilidade do Solo (DEST) em função da cobertura vegetal (%).</i>	85

<i>Tabela 19 - Valores estimados da Destacabilidade do Solo (DEST) em diferentes níveis de cobertura vegetal (%).</i>	86
<i>Tabela 20 - Resultado do teste de normalidade Kolmogorov (5%), Ensaio – Semeado).</i>	88
<i>Tabela 21 - Valores de p do teste F (ANOVA bifatorial) para o Ensaio Semeado.</i>	88

## CAPITULO I

### 1. INTRODUÇÃO

A degradação do solo é um dos desafios ambientais mais graves da atualidade, afetando diretamente a segurança alimentar (*food security*), a conservação dos ecossistemas e o equilíbrio hidrológico das paisagens agrícolas. Em regiões mediterrâneas, como o Nordeste de Portugal, a combinação entre chuvas intensas e concentradas, períodos prolongados de seca, declives acentuados e práticas de manejo inadequadas tem acelerado a erosão dos solos agrícolas, particularmente nos olivais tradicionais de Trás-os-Montes. Estes sistemas, herdeiros de séculos de ocupação humana, representam não apenas um pilar da economia local, mas também um patrimônio cultural e paisagístico de elevado valor identitário para as comunidades rurais (FIGUEIREDO et al., 2013; RODRIGUES et al., 2015).

A erosão, além de remover as camadas mais férteis do solo, reduz a produtividade agrícola, aumenta a necessidade de insumos externos e compromete a recarga dos aquíferos e a qualidade da água, gerando impactos sociais e econômicos que ultrapassam os limites da propriedade rural. Os custos associados à perda de solo, de nutrientes e de produtividade recaem sobre os agricultores, mas também sobre toda a sociedade, por meio da degradação ambiental e da perda de serviços ecossistêmicos (GÓMEZ et al., 2014). Assim, a conservação do solo é uma questão não apenas técnica, mas também moral e social, relacionada à responsabilidade coletiva de preservar os recursos naturais para as gerações futuras.

Nesse contexto, a adoção de práticas agrícolas sustentáveis é essencial para compatibilizar a produção de alimentos com a conservação ambiental. Entre as estratégias mais promissoras, destaca-se o uso de plantas de cobertura, que atuam como uma barreira viva contra os processos erosivos. Ao interceptarem o impacto direto das gotas de chuva, reduzem a energia cinética da precipitação e aumentam a rugosidade superficial do solo, essas plantas minimizam a desagregação e o transporte de partículas (ALCÁNTARA et al., 2017). Além disso, os sistemas radiculares promovem melhorias estruturais duradouras, estimulando a agregação, a formação de bioporos e o aumento da infiltração de água, com reflexos positivos sobre a resiliência hídrica e a fertilidade do solo.

Do ponto de vista econômico, o manejo com cobertura vegetal em olivais representa uma alternativa de baixo custo e alto retorno ambiental, pois reduz a necessidade de mobilizações mecânicas, diminui o consumo de combustíveis e prolonga a vida útil do solo — o principal capital natural do agricultor. Ao mesmo tempo, do ponto de vista social, a adoção dessas práticas

reforça a imagem pública da olivicultura transmontana como um sistema produtivo sustentável e alinhado aos princípios da agricultura europeia contemporânea, que valoriza a multifuncionalidade e a conservação dos recursos naturais. Já sob o prisma ético e moral, a conservação do solo representa um compromisso com a responsabilidade intergeracional, assegurando que os recursos utilizados hoje permaneçam disponíveis às futuras gerações.

Com base nesse contexto, o presente trabalho busca integrar as dimensões física, hidrológica e ecológica da conservação do solo em olivais do Nordeste de Portugal, avaliando o papel de diferentes espécies de cobertura e densidades de sementeira na mitigação da erosão e na melhoria das propriedades físicas e hidráulicas do solo. O estudo foi conduzido sob condições controladas de chuva simulada, permitindo analisar de forma detalhada as interações entre o crescimento vegetal, a cobertura superficial e as respostas do solo à ação erosiva da água.

As variáveis avaliadas — incluindo escoamento superficial, salpicamento, perda de solo, densidade aparente, porosidades (macro, micro e total), condutividade hidráulica e retenção de água (CC e CMA) — oferecem uma visão integrada dos processos que controlam o equilíbrio solo-água-plantas. Dessa forma, os resultados apresentados nesta dissertação contribuem para o entendimento mecanicista e aplicado da conservação do solo, oferecendo subsídios técnicos e científicos para a gestão sustentável dos olivais mediterrâneos e para a formulação de políticas públicas de uso e manejo do solo.

O Objetivo geral desta pesquisa foi avaliar o impacto da utilização de plantas de cobertura com diferentes hábitos radiculares e densidades de sementeira na redução da erosão e na melhoria das propriedades físicas do solo em condições controladas de simulação de chuva. Como objetivos específicos:

- Avaliar o efeito da biomassa aérea e radicular no controle das perdas de solo e no escoamento superficial;
- Investigar a influência das plantas de cobertura sobre propriedades físicas do solo, como densidade aparente, macroporosidade, microporosidade e condutividade hidráulica;
- Comparar a eficiência de espécies vegetais isoladas e em mistura quanto à redução do salpicamento e da erosividade superficial;
- Analisar o efeito dos diferentes níveis de densidade de sementeira sobre a proteção do solo e o equilíbrio hídrico superficial;
- Integrar os resultados obtidos de erosão e propriedades físicas para compreender o papel estrutural e funcional das plantas de cobertura na sustentabilidade dos olivais transmontanos.

## **CAPITULO II**

### **2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

#### **2.1 SOLO**

O solo é um recurso natural fundamental para a sustentabilidade dos ecossistemas terrestres e para a produção agrícola. Constitui-se como um sistema complexo, dinâmico e vivo, formado por componentes minerais e orgânicos, que se organizam em diferentes camadas ou horizontes (LEPSCH, 2016).

De acordo com Santos et al. (2018), o solo representa a interface entre a litosfera, a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera, desempenhando funções essenciais como suporte para o crescimento vegetal, habitat para organismos, filtração e armazenamento de água, e ciclagem de nutrientes. Em áreas agrícolas, como os olivais, o solo assume papel ainda mais relevante, pois suas características determinam diretamente a produtividade das culturas e a sustentabilidade dos sistemas de produção.

Segundo Gómez et al. (2014), os solos em regiões mediterrâneas, onde se concentra grande parte da produção mundial de oliveiras, apresentam características particulares, como baixo teor de matéria orgânica, susceptibilidade à erosão e, frequentemente, limitações quanto à disponibilidade hídrica.

##### **2.1.1 Propriedades Físicas do solo**

As propriedades físicas do solo são determinantes para seu funcionamento e qualidade, influenciando diretamente processos como infiltração, retenção e movimento de água, aeração, temperatura e resistência à penetração de raízes (REICHERT et al., 2016).

Entre as principais propriedades físicas destacam-se a textura, a estrutura, a densidade, a porosidade e a consistência. A textura do solo refere-se à proporção relativa das partículas de diferentes tamanhos que o compõem, classificadas como areia, silte e argila. Esta propriedade é considerada permanente, não sendo facilmente modificada pelo manejo (BRADY e WEIL, 2013).

Segundo Klein (2014), a textura influencia diretamente a capacidade de retenção de água, a aeração, a drenagem, a erodibilidade e a capacidade de troca catiônica do solo. Stefanoski et al. (2013) destacam que a estrutura do solo, por sua vez, refere-se ao arranjo das partículas primárias em unidades compostas (agregados) e ao espaço poroso resultante. Diferentemente da textura, a estrutura é uma propriedade dinâmica, altamente influenciada pelo manejo.

Uma estrutura adequada proporciona condições favoráveis para o desenvolvimento radicular, infiltração de água e trocas gasosas. A porosidade, definida como a proporção do volume do solo ocupada por poros, é uma propriedade derivada da textura e da estrutura.

Segundo Reichert et al. (2016), os poros podem ser classificados em macroporos (responsáveis pela aeração e drenagem rápida da água) e microporos (responsáveis pela retenção de água). O equilíbrio entre estas duas classes de poros são fundamentais para o adequado funcionamento do solo. A densidade do solo, expressa pela relação entre a massa de solo seco e seu volume total, é um indicador do grau de compactação. Valores elevados de densidade (1,60 g cm<sup>3</sup> e 1,75 g cm<sup>3</sup> para solos franco-arenosos) indicam redução da porosidade total, especialmente dos macroporos, comprometendo a infiltração de água e o desenvolvimento radicular (REICHERT et al., 2016).

Em olivais, especialmente aqueles submetidos à mecanização intensiva, o aumento da densidade do solo é um problema frequente, como observado por Gómez et al. (2014). A consistência do solo refere-se ao comportamento físico do material em resposta a forças mecânicas, manifestando-se pelos graus de adesão e coesão, ou pela resistência do solo à deformação (BRADY e WEIL, 2013). Esta propriedade varia com o teor de umidade e influencia diretamente operações de preparo do solo e o desenvolvimento radicular.

Em olivais, as propriedades físicas do solo assumem particular importância, pois influenciam diretamente a disponibilidade de água para as plantas, fator crítico em regiões de clima mediterrâneo, onde a oliveira é tradicionalmente cultivada. Segundo Zuazo e Pleguezuelo (2008), solos com boa estrutura, adequada porosidade e baixa densidade favorecem o desenvolvimento radicular profundo, característica desejável para a oliveira, permitindo maior exploração do perfil do solo e acesso à água em períodos de estiagem.

## **2.2 DEGRADAÇÃO DO SOLO**

A degradação do solo é um processo que reduz sua capacidade atual ou potencial de produzir bens ou serviços, constituindo um dos mais graves problemas ambientais da atualidade (LAL, 2015). Este processo pode ocorrer por causas naturais, mas é frequentemente acelerado por atividades antrópicas inadequadas, especialmente práticas agrícolas não sustentáveis.

De acordo com FAO e ITPS (2015), a degradação do solo manifesta-se de diversas formas, incluindo erosão hídrica e eólica, compactação, salinização, acidificação, contaminação por poluentes, perda de matéria orgânica e redução da biodiversidade. Estas formas de degradação frequentemente ocorrem de maneira simultânea e sinérgica, potencializando seus efeitos negativos. Em áreas de cultivo de oliveiras, a degradação do solo representa um desafio significativo para a sustentabilidade da produção.

Segundo Gómez et al. (2014), os olivais tradicionais mediterrâneos, frequentemente estabelecidos em áreas de encosta e submetidos a práticas de manejo que mantêm o solo descoberto, são particularmente vulneráveis à degradação, especialmente por erosão hídrica. Vanwalleghem et al. (2011) destacam que a degradação do solo em olivais não apenas compromete a produtividade das árvores, mas também gera externalidades ambientais negativas, como assoreamento de corpos d'água, contaminação por agroquímicos e redução da biodiversidade. Além disso, a degradação do solo contribui para a emissão de gases de efeito estufa, agravando as mudanças climáticas.

### **2.2.1 Perda acelerada da matéria orgânica no solo**

A matéria orgânica do solo (MOS) é um componente fundamental para sua qualidade e funcionamento, influenciando positivamente propriedades físicas, químicas e biológicas (LAL, 2016). Segundo Stockmann et al. (2013), a MOS contribui para a formação e estabilização de agregados, aumento da capacidade de retenção de água, melhoria da infiltração, redução da densidade, aumento da capacidade de troca catiônica e fornecimento de nutrientes para as plantas e organismos do solo.

A perda acelerada de matéria orgânica é um dos principais processos de degradação do solo, especialmente em regiões de clima mediterrâneo, onde as condições climáticas favorecem a rápida mineralização (MUÑOZ-ROJAS et al., 2015). Em olivais, o manejo tradicional, caracterizado pelo controle mecânico ou químico das plantas espontâneas e manutenção do solo descoberto, contribui significativamente para a redução dos teores de MOS.

De acordo com Gómez et al. (2014), os solos sob olivais mediterrâneos frequentemente apresentam teores de matéria orgânica inferiores a 2%, valor considerado crítico para a manutenção da qualidade do solo. Esta situação é agravada pela erosão, que remove seletivamente as partículas mais finas do solo, onde a matéria orgânica está preferencialmente associada.

Repullo-Ruibérriz et al. (2018) observaram que a perda de matéria orgânica em olivais está diretamente relacionada à intensidade de manejo do solo, sendo mais acentuada em sistemas com maior frequência de operações de preparo e menor aporte de resíduos vegetais. Os autores destacam que a adoção de práticas conservacionistas, como o uso de plantas de cobertura e a manutenção de resíduos culturais na superfície, pode reverter este processo, promovendo o incremento gradual dos teores de MOS.

## **2.3 EROSÃO**

A erosão é um processo natural de deslocamento de partículas do solo pela ação de agentes como água, vento, gelo e organismos, que pode ser significativamente acelerado por atividades humanas (MORGAN, 2005). Segundo Panagos et al. (2015), a erosão acelerada do solo constitui uma das principais ameaças à sustentabilidade dos sistemas agrícolas e à segurança alimentar global, afetando aproximadamente 1,3 bilhão de hectares de terras em todo o mundo.

O processo erosivo envolve três fases principais: desagregação/destacamento, transporte e deposição de partículas do solo. A desagregação ocorre pelo impacto das gotas de chuva ou pela ação abrasiva da água em movimento, do vento ou de implementos agrícolas. O transporte das partículas desagregadas é realizado pelos agentes erosivos, e a deposição ocorre quando a energia destes agentes é reduzida (MORGAN, 2005).

De acordo com Lal (2019), a erosão do solo tem impactos diretos e indiretos. Os impactos diretos incluem a perda da camada superficial do solo, rica em matéria orgânica e nutrientes, redução da profundidade efetiva para o desenvolvimento radicular, diminuição da capacidade de retenção de água e formação de sulcos e ravinas (voçorocas). Os impactos indiretos envolvem a contaminação de águas superficiais, assoreamento de reservatórios, inundações e emissão de gases de efeito estufa.

Em olivais, a erosão representa um problema particularmente grave, devido às características do cultivo e das regiões onde é tradicionalmente estabelecido. Segundo Gómez et al. (2014), os olivais mediterrâneos são frequentemente implantados em áreas de encosta, com solos delgados e submetidos a regimes pluviométricos caracterizados por eventos de alta intensidade após períodos de estiagem, condições que favorecem a ocorrência de erosão hídrica.

Vanwalleghem et al. (2011) estimaram taxas de erosão em olivais tradicionais da Andaluzia, Espanha, variando de 29 a 47 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, valores muito superiores à taxa de formação do solo, estimada em aproximadamente 1 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para as condições mediterrâneas. Estes valores evidenciam o caráter não sustentável do manejo tradicional do solo em olivais e a necessidade urgente de adoção de práticas conservacionistas.

### **2.3.1 Erosão hídrica**

A erosão hídrica é o tipo mais comum e amplamente distribuído de degradação do solo, ocorrendo quando a água da chuva, não infiltrada no solo, escoar sobre sua superfície, transportando partículas desagregadas (MORGAN, 2005). Este processo é particularmente

relevante em regiões de clima mediterrâneo, onde a ocorrência de chuvas intensas após períodos de estiagem potencializa os processos erosivos.

Segundo Panagos et al. (2015), a erosão hídrica é influenciada por diversos fatores, incluindo erosividade da chuva, erodibilidade do solo, topografia, cobertura vegetal e práticas de manejo. A erosividade da chuva, determinada principalmente por sua intensidade e energia cinética, representa o potencial da precipitação em causar erosão.

A erodibilidade, por sua vez, refere-se à suscetibilidade intrínseca do solo à erosão, sendo influenciada por propriedades como textura, estrutura, teor de matéria orgânica e permeabilidade. Em olivais, a erosão hídrica é frequentemente agravada pelo manejo tradicional do solo, que envolve operações frequentes de preparo para controle de plantas espontâneas, resultando em solo descoberto durante grande parte do ano (GÓMEZ et al., 2014). Esta condição, associada à topografia frequentemente acidentada e à ocorrência de chuvas erosivas, resulta em taxas elevadas de perda de solo.

De acordo com Taguas et al. (2015), a erosão hídrica em olivais ocorre predominantemente na forma de erosão entressulcos (laminar) e em sulcos, com a formação ocasional de voçorocas em situações de concentração do fluxo de água. Os autores destacam que, mesmo em áreas com declives suaves, a erosão pode ser significativa quando o solo permanece descoberto, especialmente durante eventos de chuva de alta intensidade.

Repullo-Ruibérriz et al. (2018) observaram que a erosão hídrica em olivais não apenas remove a camada superficial do solo, mais fértil, mas também transporta seletivamente as partículas mais finas (argila e silte) e a matéria orgânica, resultando em degradação acelerada da qualidade do solo. Além disso, os sedimentos transportados frequentemente carregam nutrientes e agroquímicos, contribuindo para a eutrofização e contaminação de corpos d'água.

## **2.4 AVALIAÇÃO DA EROSÃO DO SOLO: IMPORTÂNCIA E MÉTODOS**

A avaliação da erosão do solo é um passo fundamental para a implementação de práticas de manejo e conservação eficazes. Ao quantificar a perda de solo, é possível identificar áreas de maior risco, priorizar intervenções e monitorar a efetividade das medidas adotadas (AEROENGENHARIA, [s.d.]). A erosão afeta diretamente a qualidade do solo, reduzindo sua fertilidade, capacidade de retenção de água e matéria orgânica, o que impacta negativamente a produtividade agrícola e a saúde ambiental (AGROADVANCE, 2023; EOS, 2022).

Diversos métodos são empregados para estimar e/ou prever a perda de solo por erosão, variando em escala, complexidade e custo. Entre os métodos mais comuns, destacam-se:

**Pequenas escalas de parcelas de campo:** Consistem na instalação de parcelas experimentais em campo para medir diretamente a perda de solo e escoamento superficial sob condições naturais de chuva. Embora forneçam dados precisos, são experimentos de curta duração e de difícil extrapolação para grandes áreas (FIGUEIREDO et al., 2022).

**Medição de erosões de voçorocas:** Envolve o monitoramento e a quantificação do volume de solo perdido em voçorocas, que são formas severas de erosão. Este método é útil para identificar áreas críticas e entender a dinâmica de processos erosivos em larga escala.

**Levantamento de campo:** Baseia-se na observação direta e mapeamento de feições erosivas no terreno, como sulcos, ravinas e depósitos de sedimentos. Permite uma avaliação qualitativa e semi-quantitativa da erosão, sendo útil para o planejamento inicial de ações de conservação.

**Simulações de chuva:** Utilizam equipamentos que replicam a chuva de forma controlada, permitindo a medição da perda de solo, infiltração e escoamento superficial em diferentes tipos de solo e inclinações. São ferramentas valiosas para estudos experimentais e para a calibração de modelos (MORGAN, 2005).

**Modelos matemáticos:** Representam a relação entre os fatores que influenciam a erosão do solo por meio de equações. Podem ser empíricos (baseados em observações e dados de campo) ou baseados em processos físicos. Os modelos são amplamente utilizados para estimar a perda de solo em diferentes cenários e para auxiliar no planejamento do uso da terra (EMBRAPA, [s.d.]

## 2.5 SIMULADOR DE CHUVA

Além dos modelos matemáticos, a simulação experimental utilizando simuladores de chuva é uma ferramenta valiosa e amplamente empregada na pesquisa sobre erosão do solo. Os simuladores de chuva permitem replicar as chuvas de forma controlada e padronizada, possibilitando a análise detalhada do grau de erodibilidade do solo, da infiltração de água e do escoamento superficial em diferentes condições (ANDERSON, 1961; DUNNE et al., 1980; MORGAN, 2005; CERDÀ, 2011; GRISMER, 2012).

Historicamente, o desenvolvimento de simuladores de chuva remonta a meados do século XX, com os primeiros modelos buscando replicar as características da chuva natural em laboratório ou em campo (ANDRÉ e ANDERSON, 1961). Atualmente, a diversidade de designs e tecnologias resultou em diferentes classificações, mas os dois tipos principais, baseados no mecanismo de formação das gotas, são:

### 2.5.1 Simuladores de chuva por gotejamento

Os simuladores de chuva por gotejamento (Drop Forming Rain Simulators - DRSs) operam com base na força gravitacional para a formação e queda das gotas. A água é liberada através de orifícios ou capilares localizados em uma câmara superior, e as gotas se formam e caem livremente. Para que as gotas atinjam a velocidade terminal (velocidade máxima que uma gota de chuva pode atingir ao cair livremente na atmosfera) antes de impactar a superfície do solo, é necessária uma altura de queda considerável, geralmente em torno de 10 metros (AKSOY et al., 2012). Essa característica, embora promova uma simulação mais próxima da chuva natural em termos de energia cinética das gotas, pode tornar o equipamento volumoso e de difícil manejo em campo, limitando sua portabilidade e aplicabilidade em certas situações (CAMPOS, 2021).

### **2.5.2 Simuladores de Chuva Pressurizados**

Os simuladores de chuva pressurizados (Pressurized Rain Simulators - PRSs) utilizam um sistema de bombeamento para forçar a água através de bicos aspersores, que fragmentam o fluxo em gotas. A pressão na saída dos bicos confere às gotas a energia necessária para simular a velocidade terminal da chuva natural, mesmo com alturas de queda menores em comparação com os DRSs. Isso os torna mais compactos e versáteis para uso em campo (MARTÍNEZ-MURILLO et al., 2013; MHASKE et al., 2019). Os bicos podem ser de diversos tipos, como bicos de aspersão rotativos ou fixos, e a intensidade da chuva é controlada pela pressão da água e/ou pelo tipo de bico utilizado (CHOW e HARBAUGH, 1965). A calibração desses simuladores é crucial para garantir a uniformidade da distribuição da chuva e a reprodutibilidade dos experimentos (SOUZA et al., 2022)

## **2.6 MODELOS DE EROSÃO DO SOLO: USLE, RUSLE e MUSLE**

Os modelos matemáticos desempenham um papel crucial na estimativa e predição da perda de solo por erosão. Entre eles, a Universal Soil Loss Equation (USLE) e suas versões revisadas, Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) e Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE), são amplamente reconhecidas e utilizadas globalmente devido à sua simplicidade e eficácia.

### **2.6.1 Universal Soil Loss Equation**

A Universal Soil Loss Equation (USLE) é um modelo empírico desenvolvido por Wischmeier e Smith na década de 1960, que se tornou uma ferramenta fundamental para estimar

a perda média anual de solo por erosão hídrica em áreas agrícolas (WISCHMEIER; SMITH, 1978). A equação é expressa como:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Onde:

A = perda média anual de solo (toneladas por hectare por ano). \*

R = fator de erosividade da chuva, que representa a capacidade da chuva em causar erosão (É calculado a partir da energia cinética e intensidade máxima da chuva)

K = fator de erodibilidade do solo, que indica a suscetibilidade do solo à erosão (Depende das propriedades físicas e químicas do solo, como textura, estrutura, matéria orgânica e permeabilidade.)

LS = fator topográfico, que considera o comprimento e a declividade da (Quanto maior o comprimento e a declividade, maior o potencial de erosão.)

C = fator de cobertura e manejo do solo, que reflete o efeito da cobertura vegetal e das práticas de manejo na proteção do solo contra a erosão (Varia de 0 (solo totalmente protegido) a 1 (solo descoberto)).

P = fator de práticas de conservação, que representa o impacto de práticas de suporte, como terraceamento, cultivo em contorno e faixas de retenção, na redução da erosão.

### **2.6.2 Revised Universal Soil Loss Equation**

A Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) é uma versão aprimorada da USLE, desenvolvida para superar algumas de suas limitações e melhorar a precisão das estimativas de perda anual de solo (RENARD et al., 1997). A RUSLE incorpora maior detalhe de informação no cálculo dos fatores de erosão, tornando-a mais robusta e adaptável a diferentes condições (PHINZI; NGETAR, 2019; GHOSAL; DAS BHATTACHARYA, 2020).

Os fatores da RUSLE são os mesmos da USLE (R, K, LS, C, P), mas com metodologias de cálculo mais refinadas. Por exemplo, o fator R na RUSLE pode ser calculado com base em dados de chuva mais detalhados, e o fator LS pode considerar variações na declividade e comprimento da encosta de forma mais precisa (MCCONNELL, 2023). O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem facilitado a aplicação da RUSLE, permitindo o processamento de grandes volumes de dados e a espacialização dos fatores de erosão (UFPA, [s.d.]).

### **2.6.3 Modified Universal Soil Loss Equation**

A Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) foi desenvolvida para estimar a produção de sedimentos em eventos individuais de chuva, incorporando o escoamento superficial no fator de erosividade (R) (GWAPEDZA et al., 2018). Ao contrário da USLE e RUSLE, que focam na perda de solo a longo prazo, a MUSLE é mais adequada para prever a quantidade de sedimentos transportados por um evento de chuva específico.

A equação da MUSLE é expressa como:

$$Y = 11.8 (Qq_p)^{0.56} K L S C P$$

Onde:

Y = produção de sedimentos (toneladas).

Q = volume de escoamento superficial (m<sup>3</sup>).

q<sub>p</sub> = vazão de pico do escoamento superficial (m<sup>3</sup>/s).

K, LS, C, P = fatores de erodibilidade do solo, topográfico, cobertura e manejo do solo, e práticas de conservação, respectivamente, com as mesmas definições da USLE/RUSLE.

## 2.7 PROTEÇÃO DO SOLO

A proteção do solo contra a erosão e outras formas de degradação é essencial para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, especialmente em cultivos perenes como os olivais, nos quais a recuperação da qualidade do solo é um processo lento e economicamente oneroso (LAL, 2015). De acordo com Gómez et al. (2014), a conservação do solo em olivais pode ser alcançada por meio de três abordagens principais: práticas mecânicas, vegetativas e de manejo.

As práticas mecânicas consistem na modificação do relevo ou na construção de estruturas físicas voltadas ao controle do escoamento superficial e da perda de solo, como terraços, cordões em contorno, bacias de retenção e canais de desvio. Essas práticas são especialmente relevantes em áreas declivosas, onde o potencial erosivo da água é elevado (MORGAN, 2005). Contudo, Taguas et al. (2015) salientam que tais medidas, quando aplicadas isoladamente, não são suficientes para controlar a erosão de forma duradoura, sendo necessário integrá-las a estratégias biológicas e de manejo.

As práticas vegetativas baseiam-se no uso da vegetação — espontânea ou cultivada — para proteger o solo contra o impacto das gotas de chuva, reduzir a velocidade do escoamento superficial e melhorar a infiltração e a estrutura do solo. Entre as técnicas mais eficazes estão o uso de plantas de cobertura, o cultivo em faixas alternadas, os cordões vegetados e a manutenção de resíduos culturais na superfície (GÓMEZ et al., 2014). Essas práticas não apenas reduzem as

perdas de solo e água, mas também promovem o acúmulo de matéria orgânica, aumento da biodiversidade edáfica e melhoria da capacidade de infiltração.

As práticas de manejo referem-se à forma como as operações agrícolas são planejadas e executadas, incluindo o preparo conservacionista do solo, a rotação de culturas, o uso de adubação verde e o manejo integrado de pragas e doenças. Segundo Repullo-Ruibérriz et al. (2018), o manejo conservacionista em olivais deve priorizar a redução da intensidade e da frequência de mobilizações mecânicas, a manutenção da cobertura vegetal nas entrelinhas e o aporte regular de matéria orgânica — fatores que contribuem diretamente para a estabilidade estrutural do solo e a redução da erodibilidade.

Por fim, Gómez et al. (2014) ressaltam que a eficácia das práticas de proteção do solo depende de sua adequação às condições locais, levando em consideração clima, tipo de solo, topografia, sistema produtivo e disponibilidade de recursos. Assim, recomenda-se uma abordagem integrada e adaptativa, que combine diferentes práticas de forma complementar, garantindo tanto a produtividade agrícola quanto a conservação ambiental dos olivais mediterrâneos.

### **2.7.1. Uso de plantas de cobertura na diminuição da erosão do solo**

O uso de plantas de cobertura representa uma das estratégias mais eficazes para o controle da erosão e a melhoria da qualidade do solo em sistemas agrícolas, incluindo os olivais (GÓMEZ et al., 2014). Segundo Alcántara et al. (2017), as plantas de cobertura são espécies cultivadas durante os períodos em que a cultura principal não está presente ou em consórcio com ela, sem finalidade comercial direta, com o objetivo de promover benefícios agronômicos, ecológicos e ambientais.

Nos olivais, essas plantas são normalmente implantadas nas entrelinhas, podendo ser manejadas de forma temporária (durante o período chuvoso) ou permanente, dependendo das condições edafoclimáticas e dos objetivos do sistema de produção (GÓMEZ et al., 2014).

De acordo com Soriano et al. (2016), as plantas de cobertura podem ser espontâneas, selecionadas da vegetação natural, ou introduzidas, por meio de semeadura dirigida. O principal mecanismo de redução da erosão promovido por essas plantas é a proteção física da superfície do solo contra o impacto direto das gotas de chuva, o chamado efeito splash, reduzindo o destacamento e transporte de partículas (ZUAZO e PLEGUEZUELO, 2008). Esse efeito é

especialmente relevante em regiões mediterrâneas, onde as chuvas intensas, concentradas após longos períodos de estiagem, potencializam os processos erosivos.

Além da proteção física, as plantas de cobertura atuam por mecanismos complementares. Segundo Gómez-Muñoz et al. (2016), seus sistemas radiculares melhoram a estrutura do solo, aumentam a estabilidade dos agregados, favorecem a infiltração de água e reduzem o volume e a velocidade do escoamento superficial.

Adicionalmente, a biomassa aérea contribui para reduzir a velocidade do vento junto à superfície, minimizando a erosão eólica.

Estudos realizados em olivais mediterrâneos confirmam a eficácia dessa prática: Gómez et al. (2014) relataram reduções de até 80% nas taxas de erosão em áreas com cobertura vegetal, em comparação ao manejo convencional de solo descoberto. Resultados semelhantes foram obtidos por Repullo-Ruibérriz et al. (2018), que verificaram reduções significativas nas perdas de solo, água e nutrientes em olivais com plantas de cobertura.

Além de reduzir a erosão, as plantas de cobertura trazem benefícios adicionais para o sistema solo-planta.

Segundo Alcántara et al. (2017), elas promovem aumento do teor de matéria orgânica, melhoria da estrutura e da atividade biológica, maior ciclagem de nutrientes, controle de plantas espontâneas, regulação térmica do solo e incremento da biodiversidade.

A escolha das espécies deve considerar fatores como adaptação edafoclimática, rapidez de estabelecimento, produção de biomassa, morfologia radicular, ciclo de vida e potencial competitivo com a oliveira (SORIANO et al., 2016). De modo geral, gramíneas são preferidas pela alta produção de biomassa e raízes fasciculadas, que favorecem a agregação e estabilidade estrutural do solo, enquanto leguminosas se destacam pela fixação biológica de nitrogênio, reduzindo a necessidade de adubação nitrogenada (GÓMEZ et al., 2014; ALCÁNTARA et al., 2017).

O manejo das plantas de cobertura é decisivo para equilibrar os benefícios e possíveis efeitos competitivos. Conforme Alcántara et al. (2017), devem ser definidos criteriosamente a época de semeadura, densidade de plantio, método de controle (mecânico, químico ou pastejo) e momento de supressão, de modo a compatibilizar o uso da água com as necessidades da oliveira. Em regiões semiáridas, recomenda-se o uso de espécies temporárias, cujo ciclo se encerra antes do período de déficit hídrico, ou o manejo antecipado de coberturas permanentes, reduzindo a competição por água durante o verão (SORIANO et al., 2016). Gómez-Muñoz et al. (2016) observaram que, em olivais de sequeiro, o controle precoce (início da primavera) não reduziu a produtividade das oliveiras, mantendo a proteção do solo durante o

período chuvoso e preservando a umidade para o período seco subsequente. Os autores destacam ainda que a manutenção dos resíduos vegetais na superfície após o manejo é essencial para prolongar o efeito protetor contra a erosão.

Estudos recentes têm destacado o potencial das misturas de espécies (coquetéis vegetais) para aumentar a eficiência e resiliência do sistema. Segundo Alcántara et al. (2017), essas misturas, combinando gramíneas, leguminosas e crucíferas, proporcionam maior diversidade funcional, melhor cobertura superficial e maior estabilidade de agregados em comparação com monoculturas.

Apesar dos inúmeros benefícios, a adoção das plantas de cobertura em olivais ainda é limitada, em parte devido à falta de conhecimento técnico, custos de implantação e manejo, preocupações com a competição hídrica e aspectos culturais relacionados à aparência do pomar. De acordo com Gómez et al. (2014), a superação dessas barreiras depende de programas de extensão rural, políticas públicas de incentivo e apoio técnico contínuo voltado à transição para sistemas conservacionistas e sustentáveis.

## **2.8 OLIVICULTURA EM PORTUGAL**

A oliveira (*Olea europaea* L.) e o azeite são elementos intrínsecos à paisagem, cultura e economia de Portugal, com uma história que remonta a milénios. A presença da oliveira na Península Ibérica é anterior à chegada dos romanos, com vestígios que sugerem a sua existência desde o período Neolítico (INIAV, s.d.). No entanto, foi com a romanização que a olivicultura ganhou um impulso significativo, com a introdução de técnicas de cultivo mais avançadas e a expansão da produção de azeite, que se tornou um produto essencial para a alimentação, iluminação e higiene (TALKPAL AI, s.d.a).

Durante a Idade Média, a cultura da oliveira manteve a sua importância, adaptando-se às diversas realidades sociais e económicas. Mosteiros e ordens religiosas desempenharam um papel crucial na preservação e desenvolvimento dos olivais, utilizando o azeite para fins litúrgicos e como fonte de rendimento. A dispersão dos olivais era uma característica marcante, com a oliveira a ser cultivada de forma integrada em sistemas agrícolas diversificados, muitas vezes proveniente da enxertia de zambujeiros (oliveiras bravas) (INIAV, s.d.).

A partir do século XIX, a olivicultura portuguesa começou a passar por transformações significativas. A instalação de olivais estromes, ou seja, plantações dedicadas exclusivamente à oliveira e dispostas em alinhamentos, marcou uma mudança em direção a uma produção mais organizada e intensiva. Esta evolução foi impulsionada pela crescente procura por azeite e pela necessidade de otimizar a produção (INIAV, s.d.).

Ao longo do século XX, a olivicultura portuguesa enfrentou desafios e adaptações. Períodos de estagnação e até de declínio foram observados, muitas vezes devido a políticas agrícolas que favoreciam outras culturas ou à falta de investimento na modernização do setor. No entanto, a resiliência da oliveira e a importância cultural e económica do azeite garantiram a sua permanência na agricultura portuguesa.

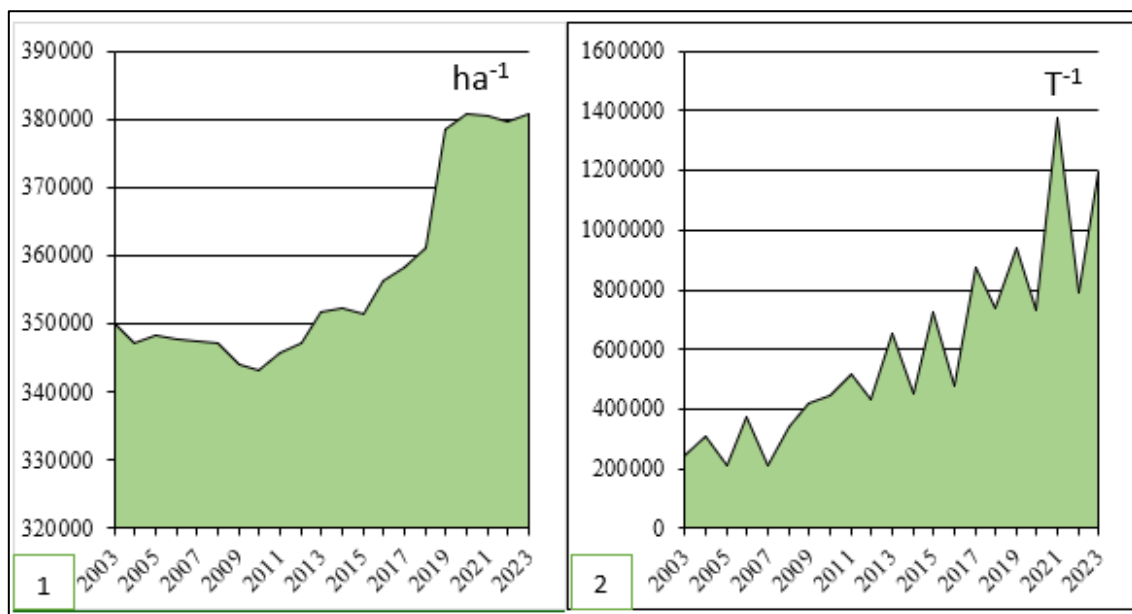


Figura 1 - 1 Evolução da área de olivais em Portugal (2003-2023); 2 - Evolução da Produtividade dos Olivais em Portugal. (2003-2023), adaptados de FAOSTAT (2025).

### 2.8.1. Contextualização histórica e geográfica

A olivicultura em Portugal, particularmente na região de Trás-os-montes, representa uma atividade agrícola de profunda tradição histórica e cultural. Segundo Rodrigues e Correia (2009), o cultivo da oliveira (*Olea europaea L.*) nesta região remonta ao período da ocupação romana da Península Ibérica, tendo se consolidado ao longo dos séculos como elemento fundamental da paisagem e da economia local. A região de Trás-os-Montes, localizada no nordeste de Portugal, caracteriza-se por um relevo acidentado, com altitudes que variam entre 400 e 900 metros, e por um clima mediterrânico com influência continental, apresentando verões quentes e secos e invernos frios (MONTEIRO et al., 2013).

Estas condições edafoclimáticas particulares conferem aos azeites produzidos na região características organolépticas distintas, que têm sido reconhecidas através de denominações de origem protegida (DOP), como "Azeite de Trás-os-Montes DOP", contribuindo para a valorização económica da produção regional (PERES et al., 2011). De acordo com dados do Instituto Nacional

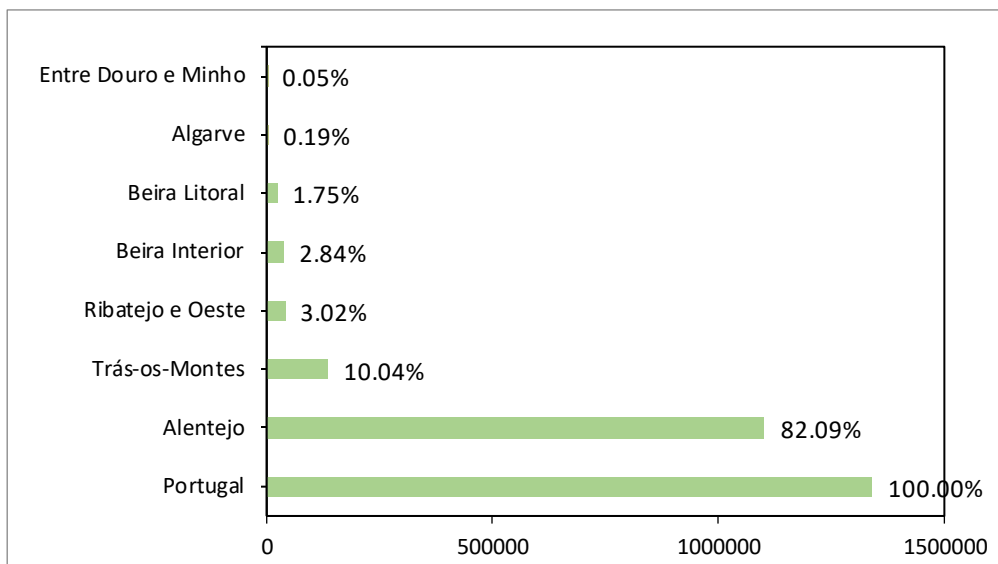
de Estatística (INE, 2025), Trás-os-Montes possui aproximadamente 78928 hectares de olival, representando 22% da área total de olival em Portugal, contudo possui pouco mais de 10% da produtividade total posicionando-se como a segunda maior região produtora do país, atrás apenas do Alentejo.

### **2.8.2. Importância econômica dos olivais em Trás-os-montes**

A olivicultura constitui um dos pilares fundamentais da economia agrícola transmontana, representando uma fonte significativa de rendimento para milhares de famílias rurais. Segundo Duarte et al. (2008), o setor olivícola em Trás-os-Montes caracteriza-se predominantemente por pequenas e médias explorações, com uma área média de 2,5 hectares, em contraste com as grandes explorações intensivas do sul do país. Esta estrutura fundiária fragmentada reflete-se no modelo de produção predominante na região: o olival tradicional.

De acordo com Figueiredo et al. (2013), o olival tradicional transmontano caracteriza-se por baixas densidades de plantação (geralmente entre 100 e 150 árvores por hectare), árvores centenárias de grande porte, e práticas culturais frequentemente menos intensivas em comparação com os sistemas modernos. Apesar dos menores rendimentos produtivos, este sistema apresenta vantagens significativas em termos de sustentabilidade ambiental e qualidade do produto final.

Dados do Gabinete de Planeamento, Políticas e Administração Geral (GPP, 2021) indicam que a produção de azeitona em Trás-os-Montes representa aproximadamente 20% da produção nacional, com uma média anual de 80.000 toneladas. Esta produção destina-se maioritariamente à extração de azeite, sendo a região responsável por cerca de 25% do azeite produzido em Portugal, com destaque para azeites de elevada qualidade, frequentemente premiados em concursos internacionais. A cadeia de valor do setor oleícola em Trás-os-Montes estende-se além da produção primária, englobando lagares, cooperativas, empresas de embalagem e comercialização, gerando um impacto econômico multiplicador na região.



*Figura 2 – Distribuição relativa correspondente do total por regiões de Portugal referentes a produtividade total de azeitonas, adaptado de INE, 2025.*

Segundo estimativas da Associação de Olivicultores de Trás-os-Montes e Alto Douro (AOTAD, 2020), o setor gera aproximadamente 5.000 empregos diretos e 10.000 indiretos, contribuindo significativamente para a fixação da população em territórios rurais de baixa densidade demográfica. Adicionalmente, o olival transmontano tem desempenhado um papel crescente no desenvolvimento do turismo rural e gastronômico na região. Rodrigues e Cabral (2018) destacam o surgimento de rotas temáticas do azeite, visitas a lagares tradicionais e modernos, e experiências de colheita de azeitona como atividades que complementam a oferta turística regional, diversificando as fontes de rendimento dos produtores e valorizando o patrimônio cultural associado à olivicultura.

### **2.8.3. Importância ambiental dos olivais em Trás-os-Montes**

Para além da sua relevância econômica, os olivais de Trás-os-Montes desempenham funções ambientais de grande importância. Segundo Figueiredo et al. (2015), o olival tradicional, predominante na região, constitui um agroecossistema de elevado valor ecológico, contribuindo para a conservação da biodiversidade, proteção contra a erosão do solo, sequestro de carbono e manutenção da paisagem cultural.

Estudos conduzidos por Belo et al. (2009) demonstraram que os olivais tradicionais de Trás-os-Montes, especialmente aqueles geridos com práticas menos intensivas, abrigam uma diversidade significativa de flora e fauna, incluindo espécies de aves, insetos e plantas herbáceas com valor para a conservação. Esta biodiversidade desempenha funções ecossistêmicas

importantes, como o controle biológico de pragas, a polinização e a ciclagem de nutrientes, contribuindo para a resiliência do sistema produtivo.

Em termos de serviços ambientais, Arrobas e Rodrigues (2016) destacam o papel dos olivais na mitigação das alterações climáticas através do sequestro de carbono. Segundo os autores, um olival adulto pode sequestrar entre 0,2 e 0,5 toneladas de carbono por hectare por ano, dependendo das práticas de manejo adotadas. Considerando a área total de olival em Trás-os-Montes, este valor representa uma contribuição significativa para o balanço de carbono regional. Outro aspecto ambiental relevante é a contribuição dos olivais para a prevenção de incêndios florestais, problema recorrente em Portugal.

De acordo com Torres et al. (2017), os olivais, quando adequadamente mantidos, funcionam como barreiras naturais à propagação do fogo, devido à baixa combustibilidade das oliveiras e à descontinuidade que introduzem na paisagem florestal. Esta função é particularmente importante em Trás-os-Montes, região frequentemente afetada por incêndios de grande dimensão. No entanto, é importante ressaltar que os benefícios ambientais dos olivais estão intrinsecamente ligados às práticas de manejo adotadas. Conforme apontado por Figueiredo et al. (2013), práticas inadequadas, como mobilizações frequentes do solo e uso excessivo de herbicidas, podem comprometer significativamente as funções ecológicas destes sistemas, resultando em degradação do solo, perda de biodiversidade e contaminação de recursos hídricos.

#### **2.8.4. Desafios à conservação do solo em olivais de Trás-os-Montes**

Apesar da sua importância econômica e ambiental, os olivais de Trás-os-Montes enfrentam desafios significativos relacionados à conservação do solo. Segundo Figueiredo et al. (2015), a erosão hídrica constitui uma das principais ameaças à sustentabilidade destes sistemas, especialmente considerando as características topográficas da região, com predominância de terrenos declivosos, e o regime de precipitação, caracterizado por eventos de alta intensidade após períodos de estiagem.

De acordo com estudos conduzidos pelo Instituto Politécnico de Bragança (IPB), as taxas de erosão em olivais tradicionais de Trás-os-Montes podem variar entre 1 e 20 toneladas por hectare por ano, dependendo da declividade do terreno, tipo de solo e práticas de manejo adotadas (FIGUEIREDO et al., 2013). Estes valores são preocupantes, considerando que a taxa de formação de solo na região é estimada em menos de 1 tonelada por hectare por ano, indicando um processo de degradação não sustentável a longo prazo.

A erosão do solo em olivais não apenas compromete a produtividade das árvores, através da perda da camada superficial mais fértil, mas também gera externalidades ambientais negativas,

como assoreamento de corpos d'água, contaminação por agroquímicos e emissão de gases de efeito estufa (VANWALLEGHEM et al., 2011). Adicionalmente, a perda de matéria orgânica associada à erosão contribui para a degradação da estrutura do solo, redução da capacidade de retenção de água e diminuição da atividade biológica, comprometendo a resiliência do sistema frente a eventos climáticos extremos, cada vez mais frequentes no contexto das alterações climáticas.

O manejo tradicional do solo em olivais de Trás-os-Montes, caracterizado por mobilizações frequentes para controle de plantas espontâneas, tem sido identificado como um dos principais fatores que contribuem para a erosão. Segundo Rodrigues et al. (2015), esta prática, além de aumentar a suscetibilidade do solo à erosão, resulta em compactação subsuperficial, redução da infiltração de água e destruição de agregados do solo, comprometendo sua qualidade física, química e biológica.

## **2.9 USO DE PLANTAS DE COBERTURA NA CONSERVAÇÃO DO SOLO**

Diante dos desafios relacionados à conservação do solo em olivais, o uso de plantas de cobertura emerge como uma estratégia promissora para mitigar a erosão e melhorar a qualidade do solo. De acordo com Rodrigues et al. (2015), as plantas de cobertura são espécies vegetais cultivadas nas entrelinhas do olival, sem finalidade comercial direta, visando benefícios agronômicos e ambientais.

Figueiredo et al. (2013) observaram reduções de até 80% nas taxas de erosão em olivais com cobertura vegetal nas entrelinhas, em comparação com o manejo convencional (solo mobilizado). Esta redução deve-se principalmente à proteção física da superfície do solo contra o impacto direto das gotas de chuva, processo conhecido como efeito "splash", e à diminuição da velocidade do escoamento superficial. Além do controle da erosão, as plantas de cobertura proporcionam diversos benefícios adicionais para o sistema solo-planta em olivais. Segundo Arrobas e Rodrigues (2016), estes benefícios incluem:

1. Aumento do teor de matéria orgânica do solo, melhorando sua estrutura e capacidade de retenção de água;
2. Incremento da atividade biológica, favorecendo processos como a ciclagem de nutrientes e o controle biológico de pragas;
3. Redução da lixiviação de nutrientes, especialmente nitrogênio, diminuindo o risco de contaminação de águas subterrâneas;
4. Sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das alterações climáticas;

5. Aumento da biodiversidade, criando habitats para organismos benéficos como polinizadores e inimigos naturais de pragas.

Em Trás-os-Montes, diferentes tipos de plantas de cobertura têm sido estudados para uso em olivais. Rodrigues et al. (2015) destacam três abordagens principais:

**1. Cobertura vegetal espontânea:** consiste no manejo da vegetação natural que surge nas entrelinhas do olival, através de cortes periódicos, sem incorporação ao solo. Esta abordagem apresenta baixo custo de implementação e favorece a biodiversidade local, mas pode resultar em competição por água e nutrientes se não for adequadamente manejada.

**2. Cobertura vegetal semeada:** envolve a introdução deliberada de espécies ou misturas de espécies selecionadas por características desejáveis, como rápido estabelecimento, elevada produção de biomassa, sistema radicular profundo ou capacidade de fixação biológica de nitrogênio. Leguminosas como *Trevos* (*Trifolium* spp.) e serradela (*Ornithopus* spp.) têm mostrado resultados promissores em olivais transmontanos, devido à sua capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, reduzindo a necessidade de fertilização nitrogenada.

**3. Cobertura morta (mulch):** consiste na aplicação de resíduos vegetais na superfície do solo, como palha, aparas de madeira ou resíduos da poda do olival. Esta abordagem proporciona proteção imediata contra a erosão e contribui para o incremento da matéria orgânica do solo, mas pode apresentar limitações em termos de disponibilidade e custo dos materiais.

Estudos conduzidos por Figueiredo et al. (2015) em olivais de Trás-os-Montes demonstraram que a cobertura vegetal semeada com leguminosas anuais de ressementeira natural apresenta o melhor equilíbrio entre benefícios agronômicos e ambientais. Estas espécies completam seu ciclo no início da primavera, reduzindo a competição por água durante o período crítico de verão, e produzem sementes duras que permanecem viáveis no solo, germinando com as primeiras chuvas de outono e estabelecendo um novo ciclo de cobertura sem necessidade de ressemeadura anual.

No entanto, a adoção de plantas de cobertura em olivais de Trás-os-Montes ainda enfrenta desafios significativos. Segundo Rodrigues e Cabral (2018), barreiras para a adoção incluem falta de conhecimento técnico, percepção de risco de competição com a cultura principal, custos de implementação e manejo, e aspectos culturais relacionados à "limpeza" do pomar. Os autores destacam a importância de políticas públicas, programas de extensão rural e incentivos econômicos para promover a adoção desta prática conservacionista.

## 2.10 PERSPECTIVAS FUTURAS PARA OS OLIVAIIS DE TRÁS-OS-MONTES

O futuro dos olivais de Trás-os-Montes dependerá da capacidade de conciliar viabilidade econômica com sustentabilidade ambiental, em um contexto de alterações climáticas, pressões de mercado e mudanças nas políticas agrícolas.

Segundo Duarte et al. (2018), a valorização dos produtos diferenciados, como azeites com denominação de origem protegida e azeites biológicos, representa uma oportunidade para os olivais tradicionais da região, permitindo compensar a menor produtividade com maior valor agregado. Neste contexto, a adoção de práticas de conservação do solo, como o uso de plantas de cobertura, não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também pode representar um diferencial competitivo, especialmente em mercados que valorizam produtos com menor impacto ambiental.

Adicionalmente, estas práticas podem aumentar a resiliência dos olivais frente às alterações climáticas, através da melhoria da capacidade de retenção de água no solo e da redução dos riscos de erosão associados a eventos climáticos extremos. Iniciativas como o projeto "Conservação do Solo em Olivais Mecanizados na Região de Trás-os-Montes", desenvolvido pelo IPB em parceria com associações de produtores, têm demonstrado o potencial das práticas conservacionistas para melhorar a sustentabilidade dos olivais transmontanos.

Segundo Figueiredo et al. (2015), os resultados deste projeto indicam que a adoção de sistemas de conservação baseados em mobilização reduzida ou nula, combinada com o uso de plantas de cobertura, pode reduzir significativamente as perdas de solo e água, sem comprometer a produtividade das oliveiras.

## CAPITULO III

### 3. METODOLOGIAS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), Campus de Santa Apolónia – PT, (latitude 41°47'47" N, longitude 6°45'43" O e a uma altitude de 674 metros). A região do Concelho de Bragança (região Nordeste de Portugal), capital do Distrito de Bragança, localizado na região denominada de Trás-os-Montes possui um clima classificado pelo Portal do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA, 2024) como Temperado. O clima Temperado é característico por possuir estações muito bem definidas, com Temperatura média do mês mais quente superior a 10°C, ou seja, verões quentes e secos, e com Invernos chuvosos onde a Temperatura média do mês mais frio fica entre -3°C e 18°C.

Na subclassificação de Köppen-Geiger para a região Transmontana tem se duas classificações sendo elas Csa e Csb, as quais apresentam as seguintes características:

- Csa: a letra “C” se refere ao fato de ser um clima temperado quente (mesotérmico) seguido do “s” o qual caracteriza a região com invernos chuvosos, e por fim o “a” indicando verões quentes e inverno ameno. Este tipo é encontrado desde o Vale do Douro e no sul das cadeias montanhosas de Montejunto-Estrela.

- Csb: a a letra “C” se refere ao fato de ser um clima temperado quente (mesotérmico) seguido do “s” o qual caracteriza a região com invernos chuvosos, e por fim o “b” indica um verão com temperaturas mais amenas e brandas enquanto um inverno mais rigoroso.

A região Nordeste de Portugal, particularmente Trás-os-Montes, caracteriza-se pela predominância de solos pouco desenvolvidos, com elevada pedregosidade e baixa fertilidade natural. Essas condições, aliadas ao relevo acidentado e ao uso inadequado do solo, tornam-nos altamente suscetíveis a processos de degradação, como erosão hídrica, perda de matéria orgânica e compactação. De acordo com a classificação da FAO, os principais tipos de solos da região são os Leptosolos, que representam cerca de 72% da área e se distinguem pela sua pouca profundidade e elevada vulnerabilidade à erosão. Seguem-se os Cambissolos (13,4%), Antrossolos (6,9%), Pararregossolos (4,7%) e outros tipos de solos (3,4%) (Figueiredo et al., 2013).

### 3.2. TRATAMENTO DO SOLO

O solo utilizado no experimento foi coletado nas entrelinhas de um olival, na profundidade de 0-20cm, o solo é caracterizado como um Leptosolo Êutrício de origem xistosa, segundo a classificação FAO/UNESCO, tal olival fica localizado em Suções, no concelho de Mirandela, Nordeste de Portugal (Figura 3). Após a coleta, o material foi transportado para as casas de vegetação do Instituto Politécnico de Bragança, onde foi disposto sobre lonas para secagem ao ar. Após aproximadamente duas semanas, o solo apresentava um teor de umidade suficientemente baixo para permitir a sua crivagem, possibilitando a separação eficiente entre a fração terra fina (<2 mm) e os fragmentos grosseiros (>2 mm). A fração fina resultante foi acondicionada em recipientes e deixada novamente em repouso para secagem à temperatura ambiente, de modo a garantir homogeneidade na umidade antes do enchimento dos tabuleiros.

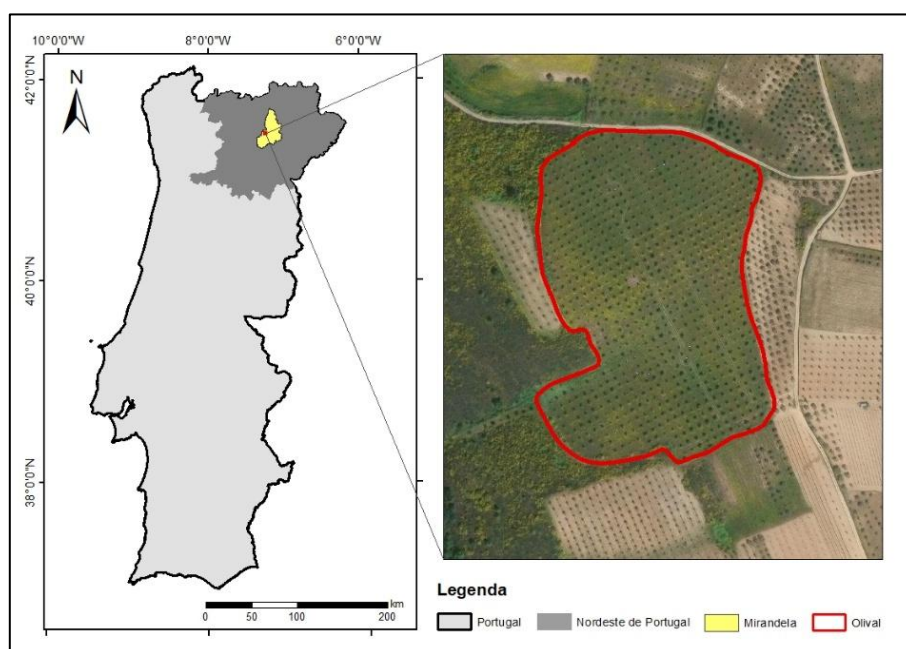


Figura 3 - Localização do Olival referência para o estudo, Sucões, em Mirandela, NE de Portugal.

As características físico-químicas e granulométricas do solo encontram-se apresentadas na Tabela 1, evidenciando um material de textura franco-arenosa ( $665 \text{ g kg}^{-1}$  de areia total), baixa matéria orgânica (2,4%) e elevada proporção de fragmentos grosseiros (41,2%), características típicas de solos mediterrânicos cultivados sob olival. Esses parâmetros são fundamentais para contextualizar o comportamento físico-hídrico observado ao longo do experimento.

*Tabela 1 - Parâmetros referentes ao solo coletado*

Parâmetros	Média
pH (H <sub>2</sub> O)	5,3
pH (KCl)	4,0
Matéria orgânica (%)	2,4
Nitrogênio total (g kg <sup>-1</sup> )	1,4
Fósforo extraível – P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	31,0
Potássio extraível – K <sub>2</sub> O (mg kg <sup>-1</sup> )	193,7
Saturação por bases (cmolc kg <sup>-1</sup> )	3,4
Alumínio trocável – Al <sup>3+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0,3
CTC a pH 7,0 (cmolc kg <sup>-1</sup> )	7,1
Areia grossa (g kg <sup>-1</sup> )	367,5
Areia fina (g kg <sup>-1</sup> )	297,5
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	214,5
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	120,5
Classe textural	Franco arenoso
Fragmentos grosseiros (%)	41,2
Densidade aparente (g cm <sup>-3</sup> )	1,07

Fonte: Santos (2023).

O estudo foi conduzido em tabuleiros, onde ambas as modalidades foram estabelecidas através de sementeira. A diferença fundamental entre os tratamentos reside na composição específica da flora utilizada: o ensaio espontâneo foi semeado com uma seleção de espécies identificadas como pertencentes à vegetação espontânea características da região, ao passo que o ensaio semeado foi constituído por espécies de plantas de cobertura habitualmente selecionadas e semeadas pelos produtores na gestão das entrelinhas do olival.

Para a montagem das unidades experimentais (tabuleiros), utilizaram-se tabuleiros trapezoidais (Figura 4 e Figura 5). Com o auxílio de uma broca de 0,3 mm, foram perfurados aproximadamente 28 orifícios no fundo de cada tabuleiro para permitir a drenagem da água infiltrada. Em seguida, todo o interior dos tabuleiros, base e laterais, foi revestido com tecido permeável, garantindo a retenção do solo e a passagem apenas da água drenada.

Com o solo previamente seco ao ar e apresentando umidade aproximada de 5%, procedeu-se ao preenchimento dos tabuleiros. A densidade aparente alvo foi definida como 1,20 Mg m<sup>-3</sup>, valor escolhido com base na textura franco-arenosa. Para assegurar uniformidade da densidade ao longo da coluna de solo, cada tabuleiro foi preenchido em quatro camadas, cujo volume foi calculado pela equação trapezoidal:

$$V = \left( \frac{(B + b) * h}{2} \right) * Ap$$

V = Volume do tabuleiro.

B = Base maior.

b = Base menor.

h = altura do tabuleiro.

Ap = Comprimento do tabuleiro.

Com aproximadamente 4,5 cm de coluna de solo instalada, iniciaram-se os procedimentos de saturação dos tabuleiros. Cada unidade experimental foi colocada sobre bandejas e saturada por capilaridade durante 48 horas (Figura 5). Após a saturação inicial, procederam-se à semeadura das espécies individuais (1º Ensaio (*Lolium rigidum*, *Ornithopus sativus* e *Calendula arvensis*) 2º Ensaio (*Brachypodium distachyon*, *Silene colorata*, *Centaurea cyanus* e *Trifolium subterraneum*) e do tratamento Mix (mistura das espécies de cada ensaio), seguindo as densidades estabelecidas (Tabela 2 e Tabela 3). Uma fina camada superficial de 0,5 cm de solo previamente seco foi adicionada sobre as sementes, que em seguida passaram por nova saturação breve. Os tabuleiros destinados ao tratamento Controlo foram preenchidos integralmente até a borda desde o início e submetidos ao mesmo processo de saturação.

Ao final, foram obtidas 39 unidades experimentais no primeiro ensaio e 51 unidades experimentais o segundo, distribuídas em três repetições por tratamento (Figura 4).



Figura 4 - Ensaio espontâneo montado sobre bancada.



Figura 5 - Tabuleiros em processo de saturação.

## CAPITULO IV

### INSTALAÇÃO

#### 4.1 IMPLANTAÇÃO DO ENSAIO ESPONTÂNEO

As culturas escolhidas para o primeiro ensaio (Outono-Inverno) foram o Azevém (*Lolium rigidum*), Serradela (*Ornithopus sativus*) e Calêndula (*Calendula arvensis*), três culturas identificadas, como plantas que nascem espontaneamente nas entrelinhas e linhas dos olivais. Assim apresentando características, hábitos e famílias distintas, o nome dado a esse ensaio foi “ENSAIO ESPONTÂNEO”

As densidades de semeadura foram determinadas levando em conta as densidades utilizadas e recomendadas para cada espécie/família, onde a densidade “Média” seria a quantidade de kg/ha<sup>-1</sup> que os produtores comumente usam, a densidade “Baixa” a metade do que os produtores usam e a densidade “Alta” como o dobro do que é usado pelos produtores. Para garantir condições térmicas adequadas ao estabelecimento das espécies, os tabuleiros foram posicionados sobre uma bancada com sistema de aquecimento (24 °C), e irrigação controlada favorecendo o desenvolvimento individual das três culturas e do respectivo consórcio (mix) vegetal,

*Tabela 2 - Grupo, Repetições (Rep.), Nomenclatura (Nomen.), Tratamento e Densidades de Semeadura (Dens. Semeadura) para todas as culturas escolhidas no ensaio Espontâneo.*

Grupo	Rep.	Nomen.	Tratamento	Dens. Semeadura kg ha <sup>-1</sup>	
Espontânea	3	Controle	Controle	0	
	3	LBD	Lolium Baixa Densidade	15	
	3	LMD	Lolium Média Densidade	30	
	3	LAD	Lolium Alta Densidade	60	
	3	OBD	Ornithopus Baixa Densidade	4.5	
	3	OMD	Ornithopus Média Densidade	9	
	3	OAD	Ornithopus Alta Densidade	18	
	3	CBD	Calêndula Baixa Densidade	9	
	3	CMD	Calêndula Média Densidade	17	
	3	CAD	Calêndula Alta Densidade	34	
	3	MXBD	Mix Baixa Densidade	15	
	3	MXMD	Mix Média Densidade	30	
	3	MXAD	Mix Alta Densidade	60	
	Total	39			

As diferentes coberturas vegetais foram semeadas nos tabuleiros em 26 de novembro de 2024 (ensaio espontâneo). Cada tabuleiro foi dividido de forma a permitir a semeadura das distintas espécies, que foram conduzidas sob condições controladas. Ao longo do período experimental, realizaram-se avaliações semanais da altura das plantas e da cobertura foliar, com o objetivo de acompanhar o crescimento e o desenvolvimento das culturas.

#### 4.1.1 Avaliações da vegetação

Semanalmente, foram avaliadas a altura e a cobertura vegetal em cada tabuleiro, com o objetivo de monitorar o desenvolvimento das plantas e o efeito dos diferentes tratamentos. Cada tabuleiro foi dividido em quatro seções iguais (quartis), nomeadas de acordo com sua posição em relação à frente do tabuleiro: Quartil Superior Esquerdo (QSE), Quartil Superior Direito (QSD), Quartil Inferior Esquerdo (QIE) e Quartil Inferior Direito (QID).

A altura média das plantas ( $ALT_{média}$ ) foi determinada em uma das plantas que representasse a média das plantas de cada quartil. Considerou-se a altura de plantas desde a base até a ponta da folha superior, como pode ser observado na Figura 6.

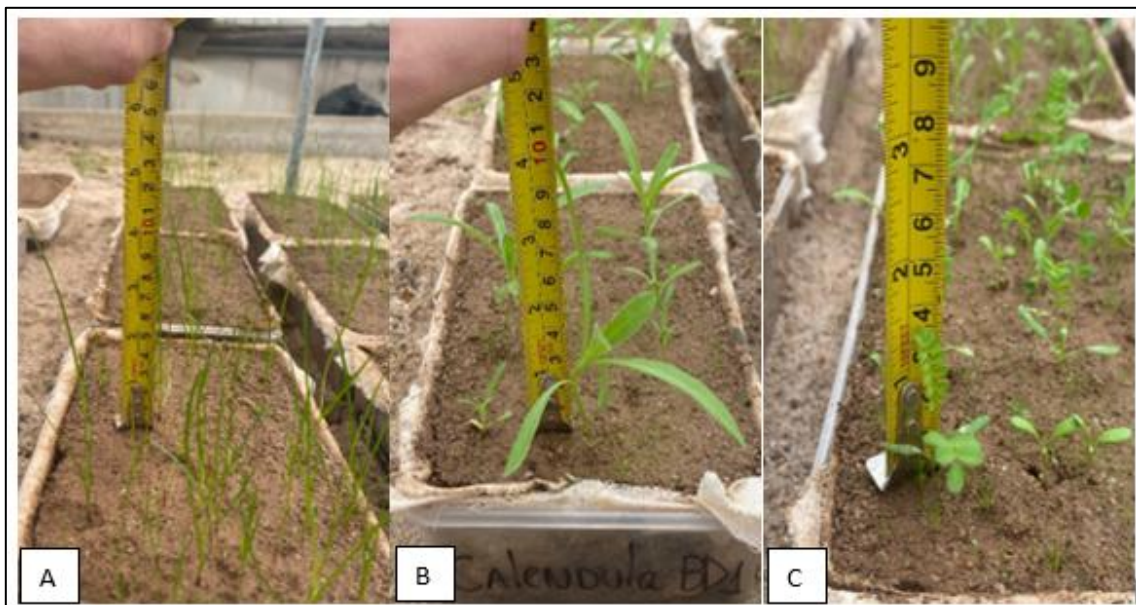


Figura 6 - Determinação de altura de plantas. A. Lollium. B. Calendula. C. Ornithopus.

#### 4.1.2 Cobertura Vegetal

Para a obtenção da cobertura vegetal foi usada a razão da área que as folhas das plantas cobrem por área de solo coberta, multiplicado por 100 para expressar os dados em percentual. Esse dado auxilia em quantificar o percentual de solo protegido pelas plantas.

$$CV = \left( \frac{A_c}{A_t} \right) * 100$$

$A_c$ : Área coberta por vegetação (m<sup>2</sup> ou cm<sup>2</sup>).

$A_t$ : Área total avaliada (m<sup>2</sup> ou cm<sup>2</sup>).

Esse parâmetro foi avaliado com o auxílio do Software Canopeo, o qual após a instalação no smartphone é possível realizar a fotografia da área desejada onde a aplicação analisa os pixels da imagem com base nos tons de verde presentes e os classifica em:

- Vegetação viva (verde).
- Solo exposto ou material não vegetal.

Com base nesses dois fatores o aplicativo calcula a porção de pixels captados como vegetação e não vegetação, dessa forma dando a porcentagem, em cobertura verde Figura 7

Foi calculada semanalmente a cobertura vegetal para todos os tabuleiros.

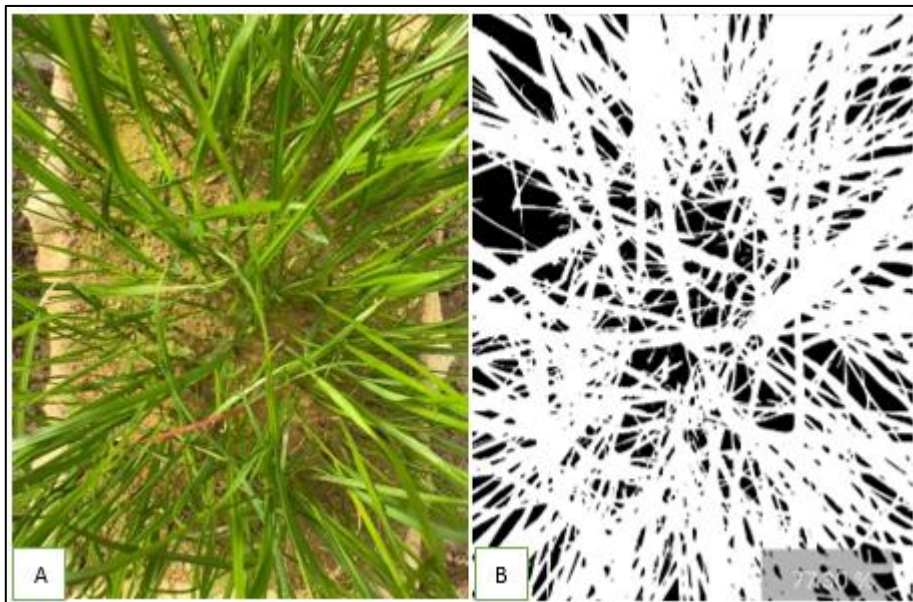


Figura 7 - A. Imagem tirada do tabuleiro com as plantas. B. Imagem processada pelo software Canopeo.

### 4.1.3 Simulação de Chuva

Para o experimento foi utilizado um simulador de chuva do tipo aspersor, o qual possui 4 pés de apoio os quais podem ser ajustados gerando diferentes alturas centrais, para esse experimento foi escolhida a altura de 2,80 m. O bico aspersor fica situado centralmente, onde abaixo dele e no centro dos 4 pés é inserido uma base a qual serve de suporte para as estruturas nas quais os tabuleiros com a plantas são inseridas em baterias de três, ou seja, cada um dos tratamentos completos, esse suporte tem uma inclinação de 14,5%, altura entre os tabuleiros e o bico do simulador de 2,37 m como pode ser observado na Figura 8.

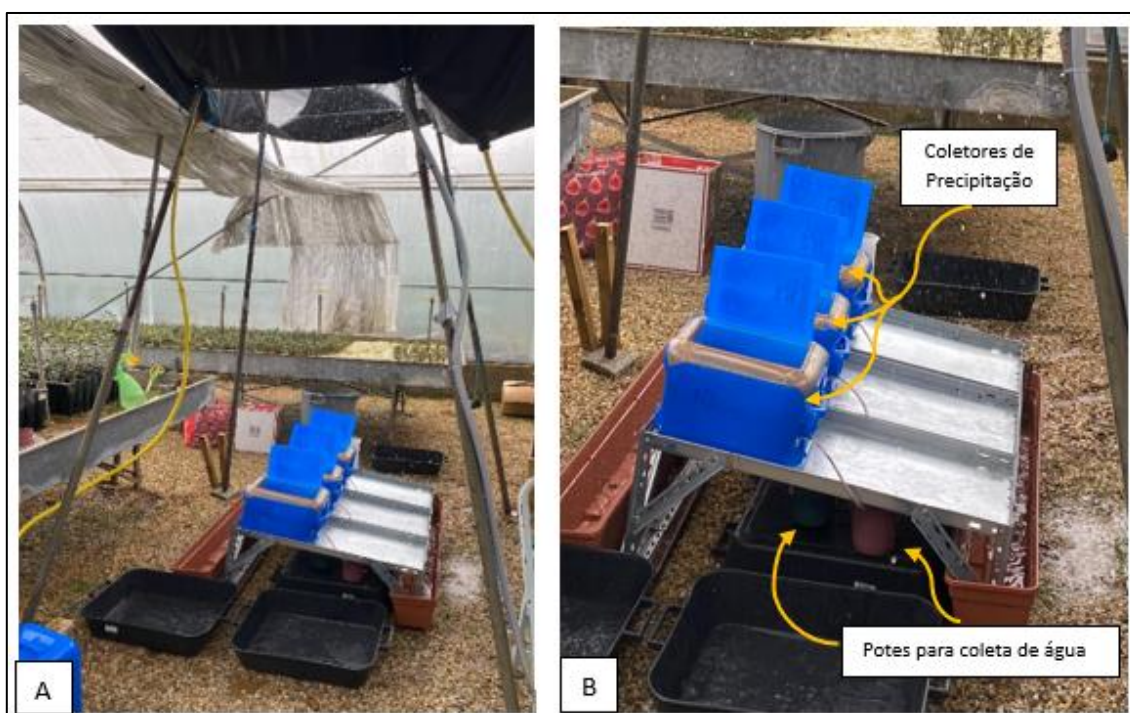


Figura 8 - A. Simulador de chuva e suporte para tabuleiros, no momento de ensaio de I; B. Simulador com os coletores de chuva, durante a chuva simulada.

Após a determinação da intensidade de chuva gerada pelo bico aspersor, foi realizada uma simulação de precipitação sobre os bidões, ainda sem a presença dos tabuleiros de solo, durante dez minutos. Nesse período, coletou-se o volume de água de cada recipiente, conduzido por mangueiras até potes de armazenamento. Posteriormente, com o auxílio de uma proveta, foi quantificada a distribuição e o volume de água direcionados a cada compartimento correspondente aos tabuleiros.

Após os 10 minutos, e a medição do volume de água em cada um dos bidões para cada um dos tabuleiros por meio da Equação abaixo.

$$I (mm h^{-1}) = \frac{V(mm)}{A(cm^2)} * 6 * 10$$

Depois da realização do teste, foi feita uma avaliação de 30 minutos sobre as estruturas com tabuleiros de solo testes os quais foram preparados para determinar o escoamento superficial. Os 30 minutos de simulação foram divididos em três grupos de 10 minutos, onde nos 5 minutos finais de cada um deles (5 – 10; 15 – 20; 25 - 30) era inserido um pote na frente da rampa de escoamento para coletar a água e os sedimentos de solo que desciam juntamente com a água que escorria superficialmente pelo tabuleiro e não infiltrava.

A precipitação média (P) foi estimada a partir da intensidade média ( $I_{média}$ ) dividida por dois, conforme metodologia adotada para o equipamento. A partir dessa relação, foi calculada a precipitação média de cada simulação, sendo que, antes de cada ensaio, realizou-se a calibração do volume de água emitido pelo bico aspersor, com o objetivo de determinar a intensidade efetiva da chuva simulada. Para essa calibração, utilizou-se um funil acoplado à extremidade de uma mangueira, direcionando o fluxo para um recipiente de volume conhecido. O tempo de enchimento completo do recipiente foi cronometrado, permitindo o cálculo da vazão (Q) por meio do volume coletado (V) e o tempo (t):

$$Q(mm h^{-1}) = \frac{V(mm)}{T(h)}$$

A pressão ajustada foi de 0,35 bar.

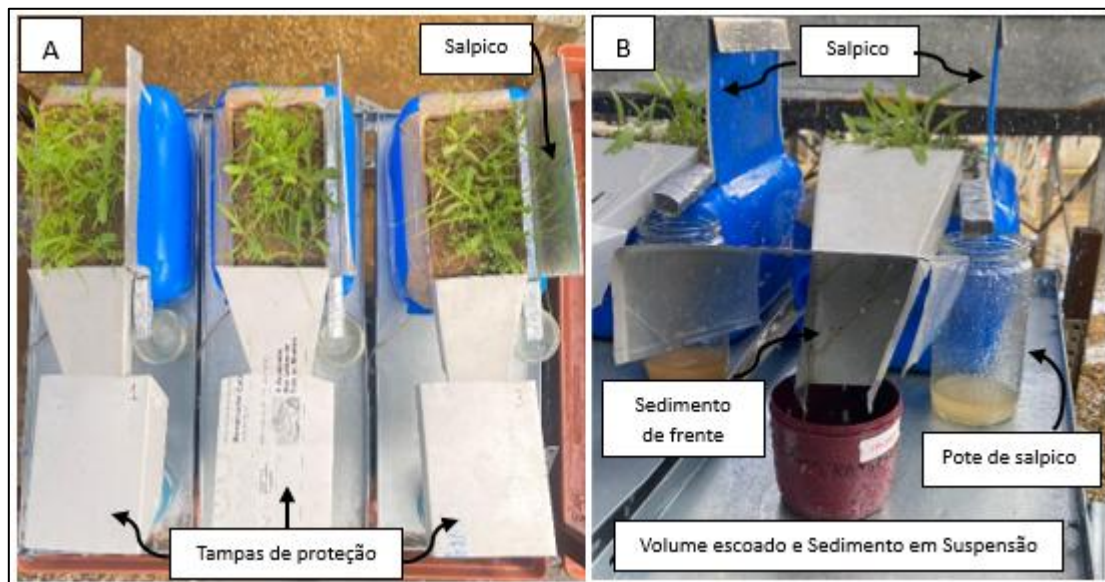
Também na borda direita de cada um dos bidões possuía uma chapa de alumínio onde os sedimentos destacados pelo impacto da gota (salpicamento) ficavam retidos de maneira a poder serem lavados em um recipiente onde seriam levados a estufa a 105°C e pesados para determinar a quantidade de material é mobilizado pelo impacto da gota.

Após o final da simulação teste e últimos ajustes foi realizada a simulação sobre os tabuleiros de solo onde foram semeadas as plantas, repetindo a mesma metodologia dos 30 minutos, contudo, após a simulação com a plantas as mesmas eram cortadas rente à superfície do solo e guardadas em tabuleiros.

Depois da retirada da parte aérea das plantas os tabuleiros foram submetidos novamente a simulação da chuva no intuito de determinar se a presença das raízes ajuda na estabilidade do solo e na diminuição do escoamento superficial, além da erosão por salpicamento, esse procedimento foi subsequente a primeira simulação de chuva.

Ao final de cada simulação foram pesados os potes com volume escoado e dos sedimentos de frente para determinar o quanto de água escoou superficialmente e quanto de sedimento é carregado junto com ela. Foi coletado o sedimento de frente onde o sedimento que ficou retido na rampa e não desceu com água para o pote onde tem o volume de água escoado e o sedimento em suspensão carregado. Para evitar que esse sedimento de frente fosse afetado pela chuva simulada a rampa era protegida por uma tampa de proteção como na Figura 9.

Para cada tabuleiro foram coletados 5 potes de sedimentos e água, 3 destinados ao Sedimento em Suspensão (SS) juntamente com o Escoamento (E); um pote onde era coletado o Sedimento de Frente ou Rampa (SF) e por último um pote para o Salpico (Sp). Sendo isso repetido para com e sem a planta. Dessa forma até o final do experimento foram coletados 195 potes simulados com as plantas e 195 potes sem a presença da parte aérea das plantas, totalizando assim 390 potes.



*Figura 9 - Recipientes, rampas, e tampas de proteção.*

*A. Tampas de proteção, tabuleiros e estruturas. B. Áreas de coleta de sedimentos e água durante simulação.*

Todos os potes foram levados ao laboratório de Física do solo do Instituto Politécnico de Bragança, onde os potes destinados a Escoamento Superficial e Sedimento de Frente foram pesados em balança analítica e colocados em estufa por 105°C por 48 horas, onde ao final houve uma nova pesagem para determinar a quantidade de terra fina perdida. Os potes restantes foram pesados inicialmente e levados a estufa juntamente com os potes citados acima onde ao final houve a mesma pesagem para determinar a terra fina.

## 4.2 IMPLANTAÇÃO DO ENSAIO SEMEADO

O segundo experimento foi conduzido seguindo o mesmo protocolo estabelecido no Ensaio Espontâneo; contudo, não houve necessidade de aquecimento artificial da bancada, uma vez que as temperaturas médias durante o período experimental já eram adequadas para o crescimento e desenvolvimento das espécies selecionadas. Neste ensaio, optou-se por utilizar plantas comumente semeadas por produtores transmontanos durante a estação primavera–verão, a saber: *Brachypodium distachyon*, *Silene colorata*, *Centaurea cyanus* e *Trifolium subterraneum*. A escolha dessas espécies reflete a intenção de avaliar comunidades vegetais com diferentes arquiteturas radiculares e estratégias de crescimento, permitindo compreender de forma mais aprofundada sua influência na estrutura e no comportamento hidrológico do solo.

A Tabela 3 sintetiza a estrutura experimental utilizada, incluindo o número de repetições, a nomenclatura adotada para cada combinação espécie–densidade e as respectivas doses de semeadura. Essa diversidade de densidades e composições visa reproduzir diferentes níveis de competição intra e interespecífica, permitindo avaliar a resposta do solo sob distintos graus de cobertura vegetal.

Tabela 3 - Grupo, Repetições (Rep.), Nomenclatura (Nomen.), Tratamento e Densidades de Semeadura (Dens. Semeadura) para todas as culturas escolhidas no ensaio Semeado

Grupo	Rep.	Nomen.	Tratamento	Dens. Semeadura kg ha <sup>-1</sup>
	6	Controle	Controle	0
	3	BBD	Brach Baixa Densidade	20
	3	BMD	Brach Média Densidade	40
	3	BAD	Brach Alta Densidade	80
	3	SBD	Silene Baixa Densidade	0.5
	3	SMD	Silene Média Densidade	1
	3	SAD	Silene Alta Densidade	2
Semeado	3	CEBD	Centaurea Baixa Densidade	9
	3	CEMD	Centaurea Média Densidade	17
	3	CEAD	Centaurea Alta Densidade	34
	3	TBD	Trevo Baixa Densidade	6
	3	TMD	Trevo Média Densidade	12
	3	TAD	Trevo Alta Densidade	24
	3	MXBD	Mix Baixa Densidade	15
	3	MXMD	Mix Média Densidade	30
	3	MXAD	Mix Alta Densidade	60
Total	51			

As culturas foram semeadas em 27 de fevereiro de 2025 e permaneceram em cultivo até 04 de junho de 2025, data da realização das simulações de chuva. Cada espécie foi distribuída em

nove tabuleiros, subdivididos em três repetições para cada densidade de semeadura (Baixa, Média e Alta). Paralelamente, um grupo adicional de nove tabuleiros foi reservado para o tratamento Controle, totalizando 51 unidades experimentais no ensaio. Ao longo de todo o período experimental, foram realizadas avaliações semanais de altura e cobertura vegetal, permitindo acompanhar a dinâmica de estabelecimento, expansão do dossel, e diferenças no vigor entre densidades e espécies, informações essenciais para a interpretação dos resultados hidrológicos e erosivos subsequentes.

A inclusão diferenciada de espécies e densidades no Ensaio Semeado teve como objetivo ampliar a compreensão dos mecanismos de mitigação da erosão e modificação estrutural do solo. Dessa forma, o desenho experimental do Ensaio Semeado oferece um cenário mais complexo e ecologicamente realista, permitindo comparar diretamente a eficácia de diferentes formas de vegetação no controle dos processos erosivos.

## CAPITULO V

### 5.1 PARÂMETROS REFERENTES A PERDA DE SOLO

Após a realização das simulações e das pesagens foi possível calcular os indicadores de referentes aos processos erosivos, sendo esses:

#### 5.1.1 Escoamento

Através desse parâmetro é possível quantificar a lâmina do escoamento que foi gerada partindo de um volume de precipitação simulada. É a razão entre volume de água escoado (Litros), multiplicado pela intensidade de chuva, e o produto da área do tabuleiro (metros quadrados), e a intensidade média da chuva que ocorreu durante a simulação.

$$E = \frac{(e(L) \cdot I)}{(A_{\text{tabuleiro}} (m^2) \cdot I_{\text{média}})}$$

$e(L)$ : volume de água escoada, em litros.

$I$ : intensidade da chuva aplicada no experimento.

$A_{\text{tabuleiro}}$ : área da superfície onde foi feita a simulação, em metros quadrados.

$I_{\text{média}}$ : intensidade média da chuva durante o período da simulação. O resultado é expresso em milímetros (mm), representando a altura equivalente da lâmina de água que escoou.

#### 5.1.2 Perda de solo

Através desse parâmetro é possível determinar a quantidade de solo que se perde por área de solo em razão do escoamento e do salpico (impacto das gotas). É a razão entre a soma da massa de sedimentos que foram transportados superficialmente e a massa de solo que foi destacada pela ação do salpico, multiplicados pela intensidade de chuva, e o produto da área do tabuleiro e a intensidade média da precipitação.

$$P_s = \frac{(SF + SP(g)) \cdot I}{(A_{\text{tabuleiro}} (m^2) \cdot I_{\text{média}})}$$

$SF$ : massa de solo transportada com o escoamento.

$SP(g)$ : massa de solo deslocada por salpico.

$A_{\text{tabuleiro}}$  : área da superfície onde foi feita a simulação, em metros quadrados.

$I_{\text{média}}$ : intensidade média da chuva durante o período da simulação. O resultado é expresso em milímetros (mm), representando a altura equivalente da lâmina de água que escoou.

### 5.1.3 Salpicamento

É a razão entre o produto de solo destacado pelo salpico, multiplicado por dois (considerando que a coleta dupla de material) e a Intensidade de chuva, e o produto da área do tabuleiro e a Intensidade média da chuva simulada. Com isso é possível determinar a perda de solo exclusivamente associado ao impacto das gotas da precipitação sobre a superfície do solo.

$$SP = \frac{(2 * SP(g) \cdot I)}{(A_{\text{tabuleiro}} (m^2) \cdot I_{\text{média}})}$$

2 : O fator 2 indica que o salpico foi coletado de dois lados ou com duas bandejas.

$SP(g)$ : massa de solo deslocada por salpico.

$A_{\text{tabuleiro}}$  : área da superfície onde foi feita a simulação, em metros quadrados.

$I_{\text{média}}$ : intensidade média da chuva durante o período da simulação. O resultado é expresso em milímetros (mm), representando a altura equivalente da lâmina de água que escoou.

### 5.1.4 Coeficiente de Escoamento

É definido como a razão entre a lâmina de escoamento gerada pela precipitação (E) e a lâmina de chuva aplicada (P). Esse coeficiente é utilizado como indicador da capacidade de retenção de água no solo e a infiltração, através da eficiência do escoamento superficial e a chuva que está caindo sobre determinada área de solo, os valores variam entre 0 e 1, onde valores próximos de 1 demonstram que há maior escoamento.

$$CE = \frac{E(mm)}{P(mm)}$$

$E$ : escoamento obtido da primeira equação.

$P$ : quantidade total de chuva aplicada.

### 5.1.5 Concentração de Sedimentos Global

É definido como a razão da Perda de Solo (PS) e o Escoamento (E). Esse indicador é utilizado para indicar a quantidade total de sedimentos que foram transportadas por uma quantidade de água, podendo ser usada para calcular a intensidade erosiva em função de uma quantidade de água que escoou.

$$CSg = \frac{PS (g m^{-2})}{E (mm)}$$

*PS*: Perda de solo

*E*: Escoamento

### 5.1.6 Concentração de Sedimentos em Suspensão

É definido pela razão entre a massa de sedimentos em suspensão (SS) multiplicado por mil (transformando em Litros), e o volume de água escoado. Esse parâmetro auxilia na determinação de partículas sólidas transportadas na fase líquida.

$$CSs = \frac{SS (g) * 1000}{e (mL)}$$

*SS*: Concentração de sedimentos em suspensão.

*e*: Volume de água escoado

### 5.1.7 Erodibilidade

É definido pela massa de solo perdida por hectare para cada milímetro de chuva aplicada. O valor de Perda de solo é convertido para toneladas por hectare pelo fator do 0.01. Essa equação e indicador é fundamental para comparar diferentes tipos de solos ou tratamentos em função da resistência do solo à erosão do solo.

$$EROD = \frac{PS (g m^{-2}) * 0.01}{P (mm)}$$

*PS*: Perda de solo

0.01: fator de conversão de gramas por metro quadrado para toneladas por hectare.

*P*: quantidade total de chuva aplicada.

### 5.1.8 Destacabilidade

É definido pela razão entre a massa de solo que é destacada pelo impacto da gota da precipitação e a lâmina de água total. Essa variável expressa a eficiência com que o impacto da gota da chuva consegue remover as partículas de solo, dessa forma o desagregando.

$$DET = \frac{SP (g m^{-2})}{P (mm)}$$

$SP(g)$ : massa de solo deslocada por salpico

$P$ : quantidade total de chuva aplicada.

## 5.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

O solo após as duas simulações de chuva (com e sem a presença de vegetação), foi mantido na casa de vegetação para coleta de amostras indeformadas, com auxílio de cilindros volumétricos de 5x5 (diâmetro/altura, respectivamente) e um amostrador do tipo castelo foi possível inserir e retirar as amostras de cada um dos tabuleiros, os cilindros já tiveram seu ajuste feito no momento da coleta, após isso foi colocada uma tampa em cada extremidade do cilindro para evitar a perda de umidade e de solo no transporte até o laboratório, e para, que a estrutura do solo não fosse comprometida, dessa forma comprometendo os dados futuramente coletados.

Os cilindros foram levados até o laboratório de Física do solo do Instituto Politécnico de Bragança, onde os mesmos foram usados para determinação de Densidade aparente ( $Dap$ ), macroporosidade do solo ( $MAp$ ), microporosidade do solo ( $MIp$ ), porosidade total ( $Pt$ ), Densidade real ( $Dr$ ), Capacidade de Campo ( $CC$ ), Capacidade Máxima de água ( $CMA$ ) condutividade hidráulica.

### 5.2.1 Determinação da Condutividade hidráulica do solo

Para determinação da condutividade do solo foi utilizado um permeâmetro de circuito fechado de carga constante com suporte para 25 amostras. O permeâmetro permite que seja realizada a avaliação individualmente para cada uma das amostras, onde as mesmas são ligadas a uma bureta com volume conhecido (40 ml), assim, é possível medir o volume de água que passa pelo sistema em um período de tempo.

As amostras de solo foram acondicionadas em cilindros volumétricos, ajustados à estrutura do permeâmetro. Na extremidade inferior (não biselada), fixou-se um pano hidrófilo sobre uma base perfurada, atuando como filtro e suporte. Na face superior (biselada), aplicou-se fita de politetrafluoretileno (Veda Rosca) para garantir a vedação e o encaixe hermético do cilindro na estrutura do permeâmetro, evitando fugas de água que pudessem comprometer a

medição do volume percolado. As amostras foram posicionadas de modo que o fluxo de água reproduzisse o mesmo sentido observado nos tabuleiros de solo.

Após o encaixe e fixação dos cilindros na estrutura, a mesma foi levada ao permeâmetro, após serem inseridas no equipamento começou a saturação das amostras por capilaridade, subindo o nível da água até que cerca de 1/3 do cilindro estivesse submerso em água, foi mantido esse nível de água por 48h.

Ao final das 48h foi aumentado o nível da água, de maneira que todo o ar que ainda estivesse retido no solo fosse expulso e que o nível da água passasse pelo solo até ficar cerca de dois centímetros abaixo do limite superior da estrutura onde a parte biselada do cilindro foi inserida. Após essa passagem de água, foi introduzido os sifões, onde uma das pontas estava na água que estava acima da amostra e a outra no cano de evacuação o qual levava até a bureta de medição, e dessa forma iniciando o circuito hidráulico.

Em seguida a inserção dos sifões foi mantida a passagem de água por uma hora, até que a mesma estabilizasse, após a passagem deste período de tempo foi começado a avaliação da condutividade hidráulica.

Para a avaliação, foi cronometrado o tempo necessário que a água preenchesse os 40 ml da bureta, caso a bureta não estivesse preenchida ao final de uma hora, era anotado o tempo e o volume que estava na bureta. Ao final de cada uma das avaliações era realizada a medição da altura do nível fora e dentro da estrutura onde o cilindro está inserido, essa medida foi realizada com auxílio de uma régua própria fixada no equipamento, a qual auxilia na determinação da diferença de nível, o qual é utilizado no cálculo do coeficiente de permeabilidade em carga zero. Essa diferença pode variar conforme a permeabilidade do solo.

Foi realizada as avaliações diariamente durante quatro dias consecutivos, após a primeira avaliação, de maneira que ao final da quarta medição os cilindros foram retirados do permeâmetro e da estrutura, com cuidado para que não houvesse a perda de solo. Em seguida, os cilindros ficaram por uma hora em drenagem, para que o excesso de água saísse do solo e após a pesagem fosse possível futuramente calcular a Capacidade Máxima de Água. Após essa primeira pesagem as amostras ficaram por mais 24h sendo drenadas afim de que todos os macroporos do solo fossem drenados e assim calcular a capacidade de campo do solo.

Ao final dessa última pesagem de solo com água, as amostras foram levadas a estufa por 48h a 105°C. Onde ao final desse tempo as amostras foram pesadas novamente e com isso ser possível calcular o peso de solo seco. Após isso, o solo foi retirado de dentro do cilindro e usado para determinação da Densidade real, os cilindros, pano e pote foram lavados e levados a estufa para determinar as taras respectivas a cada um dos cilindros.

Para o cálculo da Condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) em um permeâmetro de carga constante, foi aplicado a Lei de Darcy, a qual auxilia na caracterização do comportamento hidráulico do solo, de maneira que é possível estimar a drenagem, infiltração e movimento da água no solo. Quando se analisa a  $K_s$  do solo usando um cilindro volumétrico com amostra indeformada, assume-se que o fluxo de água é unidimensional vertical e de regime estacionário, ou seja, o fluxo é contínuo e não se altera. A equação utilizada foi:

$$K_s = \frac{V * L}{A * t * dH}$$

K – Coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica (cm/h);

V – Volume de água que flui através da amostra (1ml = 1cm<sup>3</sup>);

L – Comprimento da amostra de solo (cm);

A – Superfície da secção transversal da amostra (cm<sup>2</sup>);

t – Tempo estabelecido para a medição do volume (h).

dH – Diferença de nível de água dentro e fora do cilindro da amostra (cm)

Como os cilindros possuíam todos a altura de 5cm o Comprimento da amostra (L) foi o mesmo para todas as amostras, o mesmo ocorre para a Secção Transversal (A), pois, os cilindros tem 5cm de diâmetro, dessa forma gerando assim  $\approx 20 \text{ cm}^2$ (19,63cm<sup>2</sup>), valor que foi assumido para todas as amostras. Os valores de  $K_s$  obtidos foram classificados segundo a tabela de classificação de Permeabilidade dos solos disponibilizada pela Natural Resources Conservation Service (NRCS).

### 5.3 TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados foram inicialmente submetidos a um teste de normalidade, a fim de verificar o atendimento aos pressupostos da análise estatística. Em seguida, procedeu-se à estatística descritiva, com o cálculo da média, do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV) para cada parâmetro avaliado. Posteriormente, foi analisado o efeito dos tratamentos por meio de uma análise de variância (ANOVA) de um fator, adotando-se nível de significância de 5% ( $p \leq 0,05$ ), seguida pelo teste de comparação de médias de Tukey (5%), Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software R (R Core Team, 2025).

Os resultados foram representados em forma de gráficos e tabelas para melhor interpretação dos efeitos dos tratamentos.

## CAPITULO VI

### 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO - ENSAIO ESPONTÂNEO

#### 6.1 Estatística – Teste de Normalidade e teste F

Nesta seção, será decorrido os resultados da parte experimental do trabalho, após a realização das simulações de chuva sobre os tabuleiros saturados e com a presença da parte aérea das plantas de cobertura e subsequente realizadas simulações de chuva sobre os mesmos tabuleiros, mas sem a presença da parte aérea das plantas, visando avaliar como os diferentes percentuais de cobertura do solo implicam na resposta à erosão do solo e nas propriedades Físicas do solo.

Os dados obtidos nas simulações de chuva e no laboratório foram submetidos a um Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov, onde constatou-se que as séries apresentavam uma distribuição normal (Tabela 4).

*Tabela 4 - Resultado do teste de normalidade Kolmogorov (5%)*

Parâmetro	p-valor
	Espontâneo
E (mm)	0.289
Sed susp. (g m <sup>-2</sup> )	0.973
Sed rampa (g m <sup>-2</sup> )	0.177
PS (g m <sup>-2</sup> )	0.792
SP (g m <sup>-2</sup> )	0.278
CE (%)	0.073
CSg (g L <sup>-1</sup> )	<b>0.047</b>
CSss (g L <sup>-1</sup> )	<b>0.001</b>
EROD (g m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	0.946
DEST (g m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	0.182

Nota: valores destacados em negrito não apresentaram normalidade.

Na Tabela 5 é apresentado a síntese da análise de variância ANOVA fator duplo com repetições, a um nível de significância de 5% para o ensaio espontâneo, onde os valores os quais dados pelo teste como significantes destacados em negrito.

Tabela 5 - Valores de p do teste F (ANOVA bifatorial) para o Ensaio Espontâneo.

Efeito fixo: Cobertura (com vs. sem vegetação); Tratamento (espécie × densidade);

Interação: Cobertura × Tratamento.

Parâmetros	<i>p</i> -valor (0.05)		
	Cobertura (A)	Tratamento (B)	Interação
<b>E (mm)</b>	<b>0,0181</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
<b>Sed susp. (g m<sup>-2</sup>)</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
<b>Sed rampa (g m<sup>-2</sup>)</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
<b>PS (g m<sup>-2</sup>)</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
<b>SP (g m<sup>-2</sup>)</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
<b>CE (%)</b>	<b>0,0353</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
<b>CSg (g L<sup>-1</sup>)</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
<b>CSss (g L<sup>-1</sup>)</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
<b>EROD (g m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>)</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
<b>DEST (g m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>)</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>

## 6.2 Cobertura do Solo

De modo geral, todas as culturas, independentemente da densidade de semeadura, demonstram um aumento progressivo na porcentagem de cobertura do solo ao longo do tempo. Esse padrão de crescimento é esperado, pois as plantas se desenvolvem e expandem sua área foliar e radicular, cobrindo gradualmente a superfície do solo. A taxa de crescimento da cobertura é mais acentuada a partir de meados de dezembro de 2024, com um incremento mais significativo a partir de janeiro de 2025, culminando nos valores máximos ao final de Janeiro, onde após isso é realizada as chuvadas que é determinado na Figura 10 como SIMULAÇÃO.

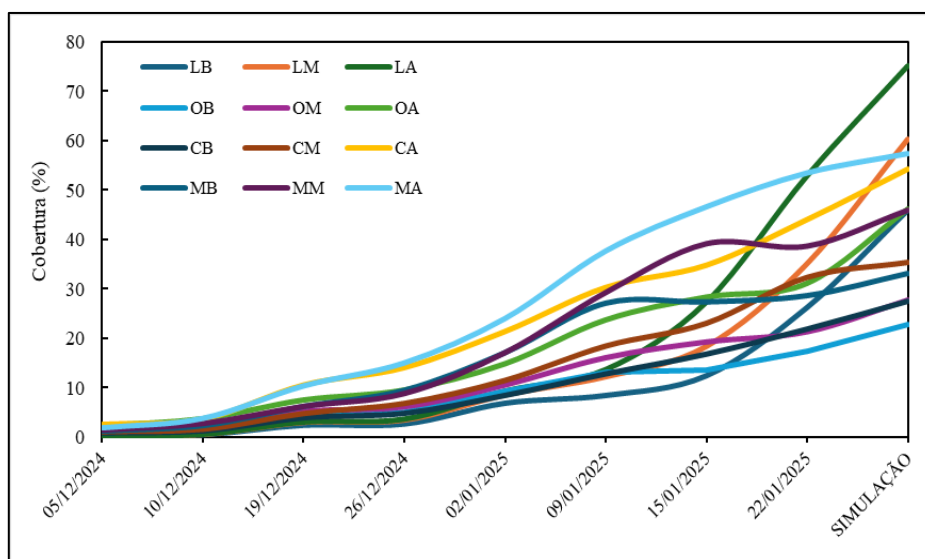


Figura 10 - Dinâmica da cobertura vegetal por tratamento ao longo do período experimental.

Ao analisar as curvas individualmente, é possível identificar diferenças marcantes no desempenho das culturas e no impacto das densidades de semeadura:

No tratamento *Lolium* (L): As linhas de *Lolium* (LB, LM, LA) mostram um comportamento interessante. A linha LA (*Lolium* Alta densidade) apresenta o crescimento mais rápido e atinge a maior porcentagem de cobertura no final do período, ultrapassando 70%. Isso indica que o *Lolium*, especialmente em alta densidade de semeadura, é extremamente eficiente em estabelecer uma cobertura densa e rápida do solo. A linha LM (*Lolium* Média densidade) também demonstra um bom desempenho, superando a maioria das outras culturas. A linha LB (*Lolium* Baixa densidade) tem um crescimento mais lento e atinge uma cobertura final menor, mas ainda assim contribui para a proteção do solo.

No tratamento *Ornithopus* (O): As linhas de *Ornithopus* (OB, OM, OA) mostram um crescimento constante, com a linha OA (*Ornithopus* Alta densidade) apresentando uma das maiores coberturas finais, próxima a 60%. O *Ornithopus* parece ser uma cultura com bom potencial de cobertura, e o aumento da densidade de semeadura claramente acelera e maximiza esse processo.

Para o tratamento *Calêndula* (C): As linhas de *Calêndula* (CB, CM, CA) exibem um crescimento mais moderado em comparação com *Lolium* e *Ornithopus*. A linha CA (*Calêndula* Alta densidade) atinge uma cobertura razoável, mas não tão elevada quanto as melhores de *Lolium* e *Ornithopus*. Isso pode indicar que a *Calêndula* tem uma taxa de crescimento inicial mais lenta ou uma arquitetura de planta que resulta em menor cobertura percentual do solo para a mesma biomassa.

No tratamento Mix (M): As linhas de Mix (MB, MM, MA) mostram um desempenho variado. A linha MA (Mix Alta densidade) apresenta um crescimento robusto, atingindo uma cobertura final significativa, comparável às culturas de bom desempenho. As linhas MB e MM também contribuem para a cobertura, mas com taxas de crescimento e coberturas finais menores. O desempenho do Mix é influenciado pela combinação das espécies e suas interações, podendo resultar em sinergias que otimizam a cobertura do solo (ALCÁNTARA et al., 2017).

Uma tendência clara observada em todas as culturas é que a densidade de semeadura tem um impacto direto e positivo na velocidade e na porcentagem final de cobertura do solo. Em quase todos os casos, a densidade Alta (A) resulta na maior cobertura, seguida pela Média (M) e, por fim, pela Baixa (B). Isso é consistente com a literatura, que aponta que uma maior densidade de plantas por área geralmente leva a um fechamento mais rápido do dossel e a uma maior cobertura do solo, o que é crucial para a supressão de plantas daninhas e para a proteção contra a erosão (BRENNAN; SMITH, 2009; ZHANG et al., 2023).

### 6.3 Intensidade de Precipitação

A Intensidade de precipitação escolhida foi referente ao regime hídrico médio para região do solo coletado. É possível observar que no tratamento *Lolium* há uma diferença significativa com relação aos demais tratamentos. Isso se deve ao fato da alteração do local onde fora realizada a as primeiras simulações, onde mesmo com ajustes não foi possível alcançar intensidades semelhantes, o que acabou prejudicando nos valores de intensidades apresentados na Tabela 6

Tabela 6 - Intensidade média de precipitação simulada em função dos tratamentos aplicados.

		Intensidade 1ª Simulação	Intensidade 2ª Simulação
		mm h <sup>-1</sup>	
<i>Lolium</i>	Baixa	76.42	76.42
	Média	76.42	76.42
	Alta	76.42	76.42
Calêndula	Baixa	76.65	76.65
	Média	75.04	75.04
	Alta	76.01	76.01
Ornithopus	Baixa	76.01	76.01
	Média	76.01	76.01
	Alta	75.68	75.68
Mix	Baixa	74.40	74.40
	Média	77.29	77.29
	Alta	76.65	76.65
Controle		73.43	72.46

## 6.4 Escoamento e Coeficiente de Escoamento

Para avaliação do escoamento, inicialmente foi detectado a diferença entre o tempo do início da simulação da chuva e o tempo em que se levava para que a primeira gota escoasse pela rampa presente na Figura 9. Como o solo era saturado por 24h antes do ensaio, o tempo para que a gota demorasse a descer a rampa foram mais rápidos do que os apresentados por Royer (2017) onde a mesma trabalhou com o solo seco, contudo, o mesmo trabalho demonstra que na segunda simulação onde o solo já apresentava maior teor de umidade o tempo para a presença de escoamento se reduzia pela metade, reforçando a ideia de que o solo úmido apresenta um propensão a começar escoar mais rapidamente, isso se deve pelo fato de que em solos secos quando a água entra o ar presente nos poros do solo pode ficar aprisionado à medida que a frente de umedecimento avança. Este ar aprisionado cria uma pressão positiva que se opõe ao movimento da água, reduzindo a taxa de infiltração (REICHERT et al., 1992), ou seja, a medida que os poros são saturados essa pressão tende a diminuir e com isso a maior condutividade hidráulica. A Tabela 7 demonstra os valores médios de escoamento para os tratamentos.

*Tabela 7 - Intensidade média e desvio-padrão do escoamento superficial ( $\text{mm h}^{-1}$ ) obtidos durante as simulações de chuva para os diferentes tratamentos com e sem cobertura vegetal.*

		Média 1 <sup>a</sup> Simulação	DP 1 <sup>a</sup> Simulação	Média 2 <sup>a</sup> Simulação	DP 2 <sup>a</sup> Simulação
<i>Lolium</i>	Baixa	18.80	0.72	22.60	0.70
	Média	24.58	0.55	22.46	0.44
	Alta	19.40	0.36	19.33	0.60
Calêndula	Baixa	20.22	0.37	22.58	0.42
	Média	22.95	0.77	24.49	1.99
	Alta	20.53	2.44	20.81	1.31
Ornithopus	Baixa	22.03	1.93	22.09	4.05
	Média	23.89	0.75	20.02	0.76
	Alta	21.56	0.70	24.76	0.21
Mix	Baixa	21.33	2.75	18.98	4.52
	Média	22.66	2.31	22.24	0.13
	Alta	18.18	2.49	19.59	3.20
Controle		19.56	0.80	14.00	0.54

A Figura 11 compara o volume de escoamento (E, em mm) sob diversas condições. As barras verdes representam a condição "1<sup>a</sup> simulação" (parte aérea presente), enquanto as barras amarelas representam a condição "2<sup>a</sup> simulação" (apenas raízes presentes, sem parte aérea). As culturas analisadas são *Lolium*, Calêndula, Ornithopus e um Mix, cada uma com densidades de semeadura Baixa, Média e Alta. Há também um grupo de Controle, o qual não possui plantas.

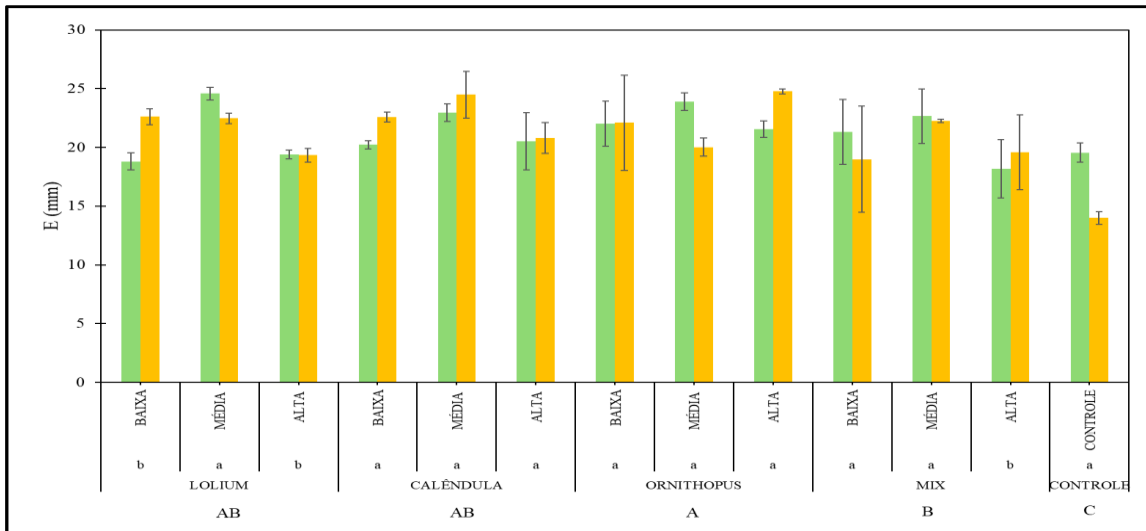


Figura 11 - escoamento superficial médio ( $E$ , mm) obtido durante as simulações de chuva, comparando tratamentos com e sem cobertura vegetal nas diferentes espécies e densidades de semeadura. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

Em quase todos os cenários, a presença da parte aérea da planta resulta em um escoamento ligeiramente menor ou similar em comparação com a condição onde apenas as raízes estão presentes. Isso sugere que a parte aérea da planta desempenha um papel na redução do escoamento. A parte aérea reduz a quantidade de água que atinge diretamente o solo, permitindo que mais água se infiltre e diminuindo o volume de escoamento superficial (TUCCI & CLARKE, 1997).

Os padrões observados na Figura 11 estão em consonância com os princípios hidrológicos e agrônômicos que governam o escoamento superficial e a erosão do solo. A presença de cobertura vegetal, seja pela parte aérea ou pelo sistema radicular, é um fator crucial na mitigação desses processos (CARVALHO et al., 2012; AHDB, s.d.).

Para as culturas individuais (*Lolium*, *Calêndula*, *Ornithopus*) e o Mix, a tendência geral é que o escoamento diminua à medida que a densidade de semeadura aumenta de Baixa para Alta. Isso é mais evidente em algumas culturas do que em outras, mas indica que uma maior cobertura vegetal, resultante de maior densidade, tende a ser mais eficaz na redução do escoamento. Mesmo na ausência da parte aérea

Embora na condição "Sem Vegetação" geralmente mostrem um escoamento maior do que as "Com Vegetação", elas ainda apresentam um escoamento significativamente menor do que o grupo de Controle. Isso demonstra claramente o benefício residual do sistema radicular na

melhoria das propriedades hidrológicas do solo e na redução do escoamento, mesmo após a remoção da parte aérea. O sistema radicular das plantas desempenha um papel vital na redução do escoamento. As raízes das plantas criam e estabilizam os agregados do solo, melhorando a estrutura e a porosidade do solo (YU et al., 2016). Isso aumenta a capacidade de infiltração da água e a resistência do solo à erosão.

Além disso, as raízes podem criar macroporos e canais que facilitam a percolação da água para camadas mais profundas do solo, reduzindo o escoamento superficial (LOPES et al., 1987).

As variações no escoamento entre as diferentes culturas (*Lolium*, Calêndula, Ornithopus e Mix) podem ser atribuídas às suas características morfológicas e fisiológicas distintas. Culturas com maior produção de biomassa aérea e/ou sistemas radiculares mais densos e profundos tendem a ser mais eficazes na redução do escoamento.

Para o tratamento *Lolium*, observou-se efeito significativo da interação intensidade × condição de vegetação. Em Baixa Intensidade, ‘sem vegetação’ apresentou Escoamento superior a ‘com vegetação’ (19,62 vs 16,32 mm;  $p < 0,05$ ), ao passo que, na intensidade média, o padrão se inverteu (21,34 vs 19,50 mm;  $p < 0,05$ ). Em alta intensidade não houve diferença. É possível observar que o Escoamento é relativamente baixo, com uma redução notável da densidade baixa para a alta, especialmente na condição "Com Vegetação". apresenta consistentemente menor escoamento, isso pode indicar que ele oferece uma cobertura mais eficaz ou um sistema radicular mais robusto para as condições do estudo

Para Calêndula, o maior valor ocorreu em ‘média/sem vegetação’, diferindo do conjunto restante (Tukey,  $p < 0,05$ ), embora os contrastes COM×SEM dentro de cada intensidade não tenham sido significativos. A Calêndula, apresentou valores de escoamento mais altos, pode ter uma cobertura menos densa ou um sistema radicular menos eficiente na estabilização do solo para as condições testadas

Em Ornithopus e no Mix não se detectaram diferenças ( $p \geq 0,05$ ). O desempenho do Mix de culturas é particularmente interessante, pois a combinação de diferentes espécies pode oferecer benefícios sinérgicos, como maior diversidade de sistemas radiculares (explorando diferentes profundidades do solo) e cobertura aérea mais completa ao longo do tempo (BLANCO-CANQUI, 2018).

No Controle, as duas simulações não diferiram ( $p \geq 0,05$ ). O que representa o solo nu ou com mínima cobertura, exibe os maiores valores de escoamento. Isso corrobora a vasta literatura que demonstra que solos desprotegidos são altamente suscetíveis ao escoamento superficial e à erosão hídrica (BERTOL et al., 2007). A ausência de interceptação pela parte aérea e a falta de

estabilização do solo pelas raízes resultam em uma menor infiltração e maior volume de água escoada na superfície.

Em suma, a cobertura vegetal atua como uma barreira física que intercepta as gotas de chuva, dissipando sua energia cinética e evitando a desagregação das partículas do solo (SARE, s.d.). Este efeito é conhecido como interceptação e é a primeira linha de defesa contra o impacto direto da precipitação. Ao reduzir o impacto das gotas, a cobertura vegetal minimiza o selamento superficial do solo, um processo que ocorre quando as partículas finas do solo preenchem os poros da superfície, formando uma crosta que impede a infiltração da água (DE MORAIS, 2012). A manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo também contribui para a retenção de água e a redução da erosão (EMBRAPA, s.d.).

O Coeficiente de Escoamento é a relação entre o volume de escoamento superficial e o volume total de precipitação, sendo um indicador crucial da capacidade de uma superfície em gerar escoamento. O estudo compara três culturas específicas (*Lolium*, Calêndula, Ornithopus), um mix dessas culturas e um controle (solo sem plantas), sob três níveis de densidade de semeadura (baixa, média e alta) e em duas condições: com a presença da parte aérea da planta (Com Vegetação) e sem a parte aérea, mas com as raízes presentes (Sem Vegetação), como pode ser observado na Figura 12

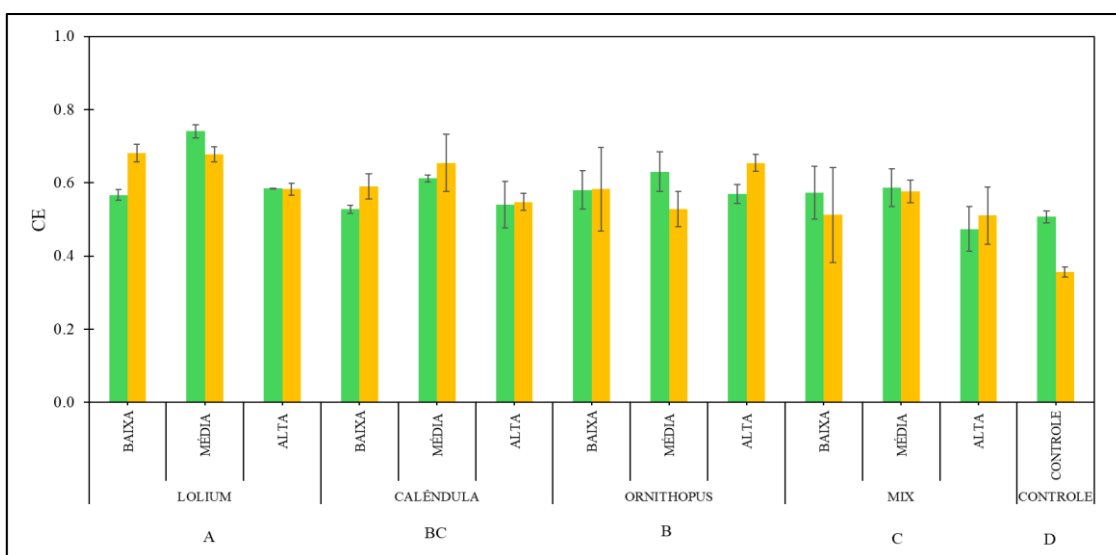


Figura 12 - Coeficiente de escoamento (CE) obtido nas simulações de chuva, comparando tratamentos com e sem cobertura vegetal nas diferentes espécies e densidades de semeadura. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

Em quase todos os cenários, a presença da parte aérea da planta resulta em um escoamento ligeiramente menor ou similar em comparação com a condição onde apenas as raízes estão presentes. A parte aérea reduz a quantidade de água que atinge diretamente o solo, permitindo que mais água se infiltre e diminuindo o volume de escoamento superficial (TUCCI; CLARKE, 1997).

Os padrões observados na Figura 12 estão em consonância com os princípios hidrológicos e agrônômicos que governam o escoamento superficial e a erosão do solo. A presença de cobertura vegetal, seja pela parte aérea ou pelo sistema radicular, é um fator crucial na mitigação desses processos (CARVALHO et al., 2012; AHDB, [s.d.]).

Para as culturas individuais (*Lolium*, Calêndula, *Ornithopus*) e o Mix, a tendência geral é que o escoamento diminua à medida que a densidade de semeadura aumenta de Baixa para Alta. Isso é mais evidente em algumas culturas do que em outras, mas indica que uma maior cobertura vegetal, resultante de maior densidade, tende a ser mais eficaz na redução do escoamento. Mesmo na ausência da parte aérea, o solo coberto por raízes tende a apresentar melhor infiltração e menor escoamento, como também relatado por Yu et al. (2016).

Embora na condição "Sem Vegetação" geralmente mostrem um escoamento maior do que as "Com Vegetação", elas ainda apresentam um escoamento significativamente menor do que o grupo de Controle. Isso demonstra claramente o benefício residual do sistema radicular na melhoria das propriedades hidrológicas do solo e na redução do escoamento, mesmo após a remoção da parte aérea. O sistema radicular das plantas desempenha um papel vital na redução do escoamento. As raízes das plantas criam e estabilizam os agregados do solo, melhorando a estrutura e a porosidade do solo (YU et al., 2016). Isso aumenta a capacidade de infiltração da água e a resistência do solo à erosão. Além disso, as raízes podem criar macroporos e canais que facilitam a percolação da água para camadas mais profundas do solo, reduzindo o escoamento superficial (LOPES et al., 1987).

As variações no escoamento entre as diferentes culturas (*Lolium*, Calêndula, *Ornithopus* e Mix) podem ser atribuídas às suas características morfológicas e fisiológicas distintas. Culturas com maior produção de biomassa aérea e/ou sistemas radiculares mais densos e profundos tendem a ser mais eficazes na redução do escoamento.

Para o tratamento *Lolium*, observou-se efeito significativo da interação intensidade × condição de vegetação. Em Baixa Intensidade, 'sem vegetação' apresentou escoamento superior a 'com vegetação' (19,62 vs 16,32 mm;  $p < 0,05$ ), ao passo que, na intensidade média, o padrão se inverteu (21,34 vs 19,50 mm;  $p < 0,05$ ). Em alta intensidade não houve diferença. É possível observar que o escoamento é relativamente baixo, com uma redução notável da densidade baixa

para a alta, especialmente na condição "Com Vegetação". Apresenta consistentemente menor escoamento, o que pode indicar que oferece uma cobertura mais eficaz ou um sistema radicular mais robusto para as condições do estudo.

Para Calêndula, o maior valor ocorreu em 'média/sem vegetação', diferindo do conjunto restante (Tukey,  $p < 0,05$ ), embora os contrastes COM×SEM dentro de cada intensidade não tenham sido significativos. A Calêndula apresentou valores de escoamento mais altos, possivelmente devido à menor densidade foliar ou a um sistema radicular menos eficiente na estabilização do solo para as condições testadas.

Em Ornithopus e no Mix não se detectaram diferenças ( $p \geq 0,05$ ). O desempenho do Mix de culturas é particularmente interessante, pois a combinação de diferentes espécies pode oferecer benefícios sinérgicos, como maior diversidade de sistemas radiculares (explorando diferentes profundidades do solo) e cobertura aérea mais completa ao longo do tempo (BLANCO-CANQUI, 2018).

No Controle, as duas simulações não diferiram ( $p \geq 0,05$ ). O que representa o solo nu ou com mínima cobertura exibe os maiores valores de escoamento. Isso corrobora a vasta literatura que demonstra que solos desprotegidos são altamente suscetíveis ao escoamento superficial e à erosão hídrica (BERTOL et al., 2007). A ausência de interceptação pela parte aérea e a falta de estabilização do solo pelas raízes resultam em uma menor infiltração e maior volume de água escoada na superfície.

Em suma, a cobertura vegetal atua como uma barreira física que intercepta as gotas de chuva, dissipando sua energia cinética e evitando a desagregação das partículas do solo (SARE, [s.d.]). Este efeito é conhecido como interceptação e é a primeira linha de defesa contra o impacto direto da precipitação. Ao reduzir o impacto das gotas, a cobertura vegetal minimiza o selamento superficial do solo, um processo que ocorre quando as partículas finas do solo preenchem os poros da superfície, formando uma crosta que impede a infiltração da água (DE MORAIS, 2012). A manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo também contribui para a retenção de água e a redução da erosão (EMBRAPA, [s.d.]).

## **6.5 Concentração de Sedimentos global e Concentração de Sedimentos em**

### **Suspensão**

A concentração de solo em suspensão (CSss) resulta do balanço entre produção de partículas (desagregação por impacto das gotas e cisalhamento hidráulico) e capacidade de transporte do escoamento. À medida que o escoamento superficial (ES) aumenta — por maior intensidade de chuva, maior conectividade de fluxo ou menor infiltração — crescem a tensão de cisalhamento e a potência unitária do fluxo, ampliando a mobilização e o carreamento de partículas de diâmetro menor.

É possível observar que os Sedimentos em suspensão são em sua totalidade para ambos os tratamentos inferiores aos valores de Sedimentos globais, isso se deve ao fato de que o carreamento de solo em sua maioria é das partículas da fração terra fina. Contudo, são essas partículas responsáveis pela formação de microporos, a qual resulta na retenção de água no solo e dos nutrientes. Solos com teores elevados de silte e argila muito fina tendem a ser mais suscetíveis à desagregação e ao transporte; por outro lado, arranjos texturais com maior proporção de argila ativa e matéria orgânica favorecem agregação e resistência ao destacamento por impacto e cisalhamento (WISCHMEIER; SMITH, 1978; RENARD et al., 1997; TISDALL; OADES, 1982). Entretanto, nesse tipo de solo com baixa presença de argilas e teor de matéria orgânica baixo, a suscetibilidade à desagregação causa maior escoamento e, em consequência, maior concentração de sedimentos globais. Na Tabela 8 é possível observar a Comparação das concentrações de sedimento tanto para condição com e sem vegetação.

*Tabela 8 - Comparação das médias da concentração de sedimentos global (CSg) e da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) para todos os tratamentos avaliados, sob condições 1ª e 2ª simulação de chuva (com e sem cobertura vegetal).*

		CSg 1ª Simulação	CSss 1ª Simulação	CSg 2ª Simulação	CSss 2ª Simulação
<i>Lolium</i>	Baixa	7.03	3.54	6.23	3.11
	Média	1.25	1.05	2.96	1.78
	Alta	1.50	1.37	3.47	1.99
Calêndula	Baixa	5.79	3.58	9.46	4.63
	Média	5.01	3.20	9.44	5.41
	Alta	4.73	2.59	9.55	4.31
Ornithopus	Baixa	7.60	5.21	14.28	7.47
	Média	7.39	5.11	10.29	6.17
	Alta	6.50	5.23	6.32	4.06
Mix	Baixa	7.84	4.33	13.08	5.67
	Média	6.14	4.70	8.93	4.51
	Alta	6.83	3.88	8.90	4.35
Controle		13.98	6.55	16.29	8.54

De modo geral, a condição "Sem Vegetação" exibe concentrações de sedimentos globalmente mais elevadas do que a condição "Com Vegetação" para a maioria dos tratamentos,

como pode ser observado na Figura 13. Isso reforça o papel protetor da parte aérea das plantas na redução da desagregação e transporte de sedimentos. A cobertura vegetal intercepta a energia das gotas de chuva, minimizando o impacto direto no solo e a subsequente desagregação de partículas, o que resulta em menor concentração de sedimentos no escoamento (MORGAN, 2005; BLANCO-CANQUI, 2018).

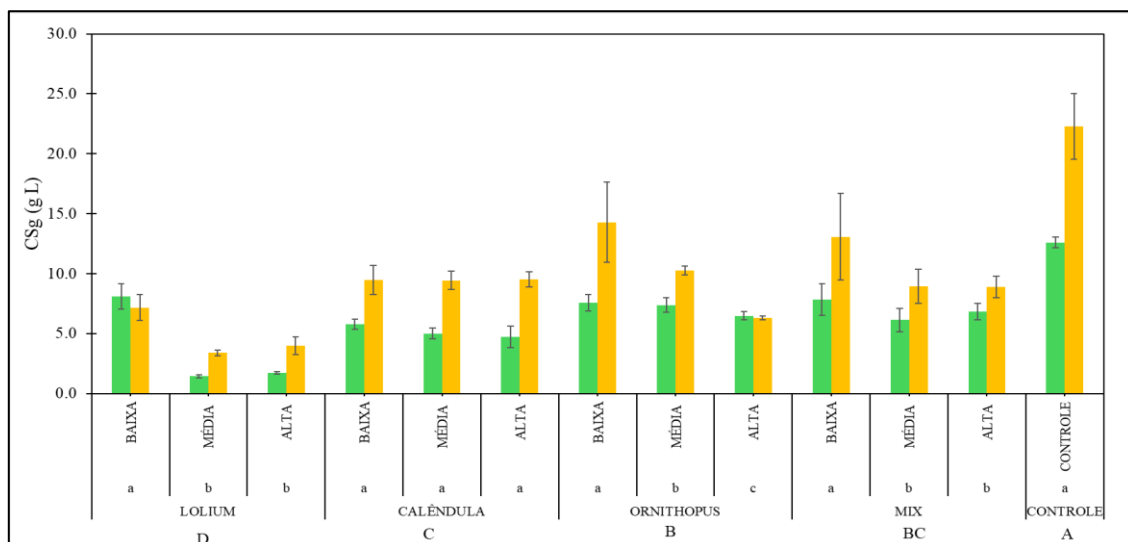


Figura 13 - Concentração de sedimentos global (CSg, g L<sup>-1</sup>) nos diferentes tratamentos, comparando condições com e sem vegetação, para as espécies *Lolium*, *Calêndula*, *Ornithopus* e *Mix*, em diferentes densidades de semeadura. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

Para a maioria das culturas, observa-se uma tendência de diminuição da CSg com o aumento da densidade de semeadura, especialmente na condição "Com Vegetação". Isso é particularmente evidente para o *Lolium*, onde a CSg diminui drasticamente da densidade Baixa para a Média e Alta. Uma maior densidade de plantas proporciona uma cobertura mais densa e eficaz do solo, aumentando a interceptação da chuva e a rugosidade superficial, o que retarda o escoamento e permite maior infiltração, reduzindo a quantidade de sedimentos transportados (BLANCO-CANQUI, 2018).

O *Lolium*, em ambas as condições (Com e Sem Vegetação), apresenta os menores valores de CSg, especialmente nas densidades Média e Alta. Isso sugere que o *Lolium* é altamente eficaz na contenção de sedimentos, tanto pela proteção da parte aérea quanto pela estabilização do solo por suas raízes. A *Calêndula* e o *Ornithopus* também demonstram capacidade de reduzir a CSg em comparação com o Controle, mas em menor grau que o *Lolium*. O Mix de culturas apresenta

valores intermediários, indicando um efeito combinado das espécies presentes (KOUDAHE; ALLEN; DJAMAN, 2022; MUBVUMBA; DELAUNE, 2023).

O grupo de Controle (solo sem plantas) exibe os maiores valores de CSg, tanto na condição "Com Vegetação" (solo nu) quanto "Sem Vegetação". Isso reitera a vulnerabilidade do solo desprotegido à erosão e ao transporte de sedimentos. A ausência de cobertura vegetal permite que as gotas de chuva atinjam o solo diretamente, causando desagregação e facilitando o arraste de partículas (BERTOL et al., 2007).

As tendências observadas para a CSss são muito semelhantes às da CSg, o que é esperado, uma vez que a concentração de sedimentos em suspensão é um componente da concentração global. No entanto, os valores absolutos de CSss são menores que os de CSg, indicando que uma parte dos sedimentos transportados pode ser por arraste ou salpico, e não apenas em suspensão. A presença de vegetação (barras verdes) consistentemente resulta em menor CSss em comparação com a ausência da parte aérea (barras amarelas) (Figura 14). Isso demonstra a eficácia da cobertura vegetal em reduzir a quantidade de partículas finas que são facilmente transportadas em suspensão pela água do escoamento. A interceptação da chuva e a formação de uma camada protetora na superfície do solo são mecanismos-chave para essa redução (MORGAN, 2005; BLANCO-CANQUI, 2018).

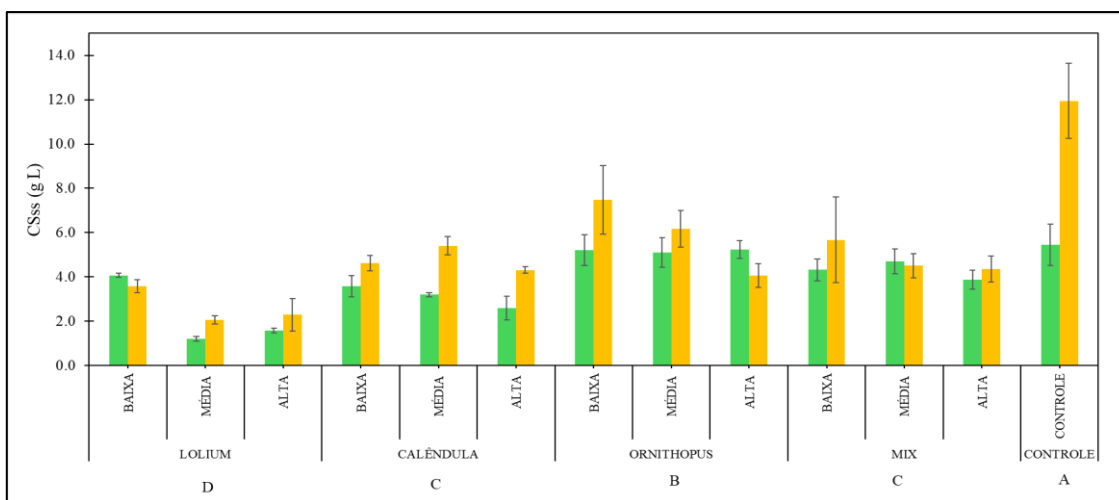


Figura 14 - Concentração de sedimentos em suspensão (CSss,  $g L^{-1}$ ) nos diferentes tratamentos, comparando condições com e sem vegetação, para as espécies Lolium, Calêndula, Ornithopus e Mix, em distintas densidades de sementeira. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

Assim como na CSg, o aumento da densidade de semeadura geralmente leva a uma diminuição da CSss. O *Lolium* novamente se destaca, com valores muito baixos de CSss em densidades Média e Alta. Uma cobertura vegetal mais densa não só reduz a desagregação do solo, mas também diminui a velocidade do escoamento, permitindo que mais partículas se depositem antes de serem transportadas em suspensão (CARVALHO et al., 2012; YU et al., 2016).

O *Lolium* mantém seu desempenho superior na redução da CSss. A Calêndula e o *Ornithopus* também contribuem para a redução, mas o *Lolium* demonstrou ser mais eficiente na retenção de sedimentos finos. O Mix de culturas apresenta um comportamento intermediário, refletindo a combinação das características individuais de cada uma das plantas (MUBVUMBA; DELAUNE, 2023). O grupo de Controle exibe os maiores valores de CSss, confirmando que solos desprotegidos são mais suscetíveis à erosão e ao transporte de sedimentos em suspensão, que são particularmente prejudiciais para a qualidade da água e para os ecossistemas aquáticos (SARE, [s.d.]).

Em suma, os gráficos de CSg e CSss reforçam a importância da cobertura vegetal e da densidade de semeadura como fatores críticos na mitigação da erosão hídrica e na melhoria da qualidade da água do escoamento. A presença da parte aérea e de um sistema radicular robusto, como o do *Lolium*, é fundamental para reduzir a concentração de sedimentos, tanto globalmente quanto em suspensão, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e agrícola.

## 6.6 Perda de solo e Erodibilidade

Para a perda de solo (PS) Com e Sem vegetação os resultados apresentados demonstram, de maneira inequívoca e estatisticamente significativa, o papel preponderante da cobertura vegetal na atenuação da perda de solo. Em todas as combinações de espécies e densidades avaliadas, a presença de vegetação resultou em uma redução substancial da erosão em comparação com as parcelas desprovidas de cobertura vegetal (Figura 15)

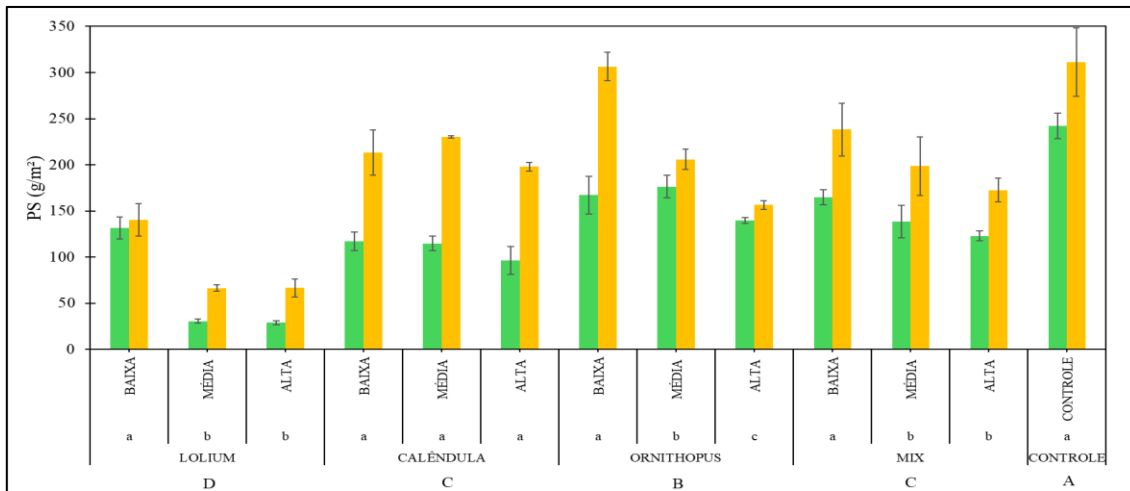


Figura 15 - Perda de solo (PS,  $g\ m^{-2}$ ) nos diferentes tratamentos com e sem cobertura vegetal, considerando as espécies *Lolium*, *Calêndula*, *Ornithopus* e *Mix*, sob diferentes densidades de sementeira. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

É possível observar que no tratamento com *Lolium* em alta densidade, a perda de solo registrou um valor de apenas 25,28  $g/m^2$  na presença de vegetação, enquanto na ausência desta, o valor ascendeu a 57,94  $g/m^2$ , representando uma redução de aproximadamente 56%. Essa disparidade, consistentemente observada em todos os cenários experimentais, corrobora a vasta literatura científica que atesta a eficácia das plantas de cobertura na proteção do solo contra a erosão hídrica (CASTRO et al., 2011; REHAGRO, 2025).

A interceptação da energia cinética das gotas de chuva pela folhagem das plantas e a formação de uma camada protetora de serrapilheira são mecanismos primários que contribuem para essa redução, minimizando a desagregação das partículas do solo e o transporte superficial de sedimentos (BLOG VERDE, 2022).

A análise comparativa entre as espécies de plantas de cobertura revela uma hierarquia de eficácia na mitigação da erosão, com implicações diretas para a seleção de cultivares em programas de conservação do solo. O *Lolium* (*Lolium perenne*) destacou-se como a espécie mais eficiente, apresentando os menores valores de perda de solo em praticamente todas as condições de densidade. Essa notável superioridade pode ser atribuída às características intrínsecas do *Lolium perenne*, incluindo seu sistema radicular fasciculado e denso, que promove a agregação do solo e aumenta sua resistência à desagregação, e sua capacidade de rápido estabelecimento e

formação de uma cobertura densa e uniforme, que protege a superfície do solo do impacto direto das gotas de chuva e do escoamento superficial (ALVARENGA; FERNANDES, 2011).

Tais atributos são cruciais para a estabilização de solos e a redução do transporte de sedimentos, conforme amplamente discutido na literatura sobre fitoestabilização e controle de erosão (ROVEDDER; ELTZ, 2008).

Em contrapartida, o *Ornithopus* (*Ornithopus sativus*) demonstrou ser a espécie menos eficaz entre as testadas, registrando os maiores índices de perda de solo tanto na presença quanto na ausência de vegetação. Embora a presença de *Ornithopus* ainda seja preferível à ausência total de cobertura, sua menor eficácia pode ser correlacionada a um sistema radicular menos robusto, uma cobertura foliar menos densa ou um ciclo de vida que não se alinha otimamente com os períodos de maior risco de erosão.

A Calêndula (*Calendula officinalis*) e o Mix de espécies apresentaram um desempenho intermediário, com valores de perda de solo superiores aos do *Lolium*, mas inferiores aos do *Ornithopus* e do tratamento controle. Isso sugere que, embora ofereçam alguma proteção, suas características morfológicas e fisiológicas podem não ser tão otimizadas para o controle da erosão quanto as do *Lolium* (CARDOSO et al., 2012).

A performance do Mix de espécies, que não superou consistentemente as espécies individuais mais eficazes, ressalta a complexidade da interação entre diferentes espécies em um consórcio e a necessidade de estudos mais aprofundados para otimizar a composição de misturas de plantas de cobertura.

A densidade da cobertura vegetal emergiu como um fator crítico na modulação dos processos erosivos, com implicações diretas para a otimização do manejo. Para a maioria das espécies, observou-se uma tendência clara de redução da perda de solo com o aumento da densidade de plantio (de baixa para alta). Este achado corrobora a premissa de que uma maior cobertura do solo resulta em maior interceptação da chuva, menor energia de impacto sobre o solo e maior rugosidade superficial, o que, por sua vez, diminui a capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento (BLOG VERDE, 2022).

No entanto, a magnitude dessa redução variou entre as espécies, indicando uma interação complexa entre a densidade e as características específicas de cada planta. Por exemplo, o *Lolium* manteve baixos níveis de erosão mesmo em densidades mais baixas, sugerindo que sua eficácia é menos dependente de altas densidades de plantio em comparação

com outras espécies. Em contraste, outras espécies podem necessitar de densidades mais elevadas para alcançar um nível de proteção comparável.

A importância da densidade da cobertura na redução da erosão é um princípio fundamental da conservação do solo, conforme destacado por diversos estudos (CASTRO et al., 2011), e a determinação da densidade ótima para cada espécie é crucial para maximizar os benefícios ambientais e econômicos (Figura 16).

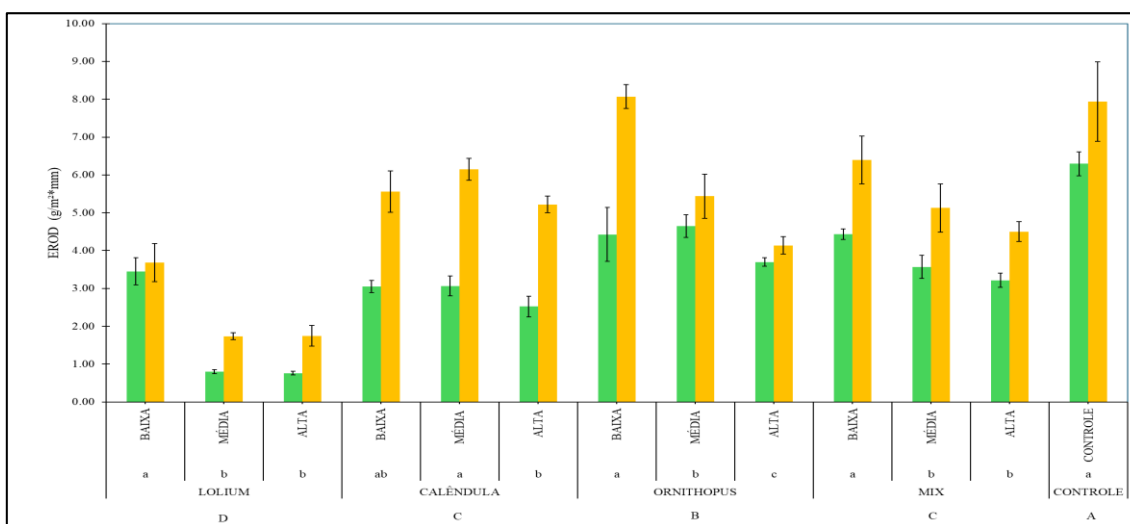


Figura 16 - Erosão do solo (EROD,  $g\ m^{-2}\ mm^{-1}$ ) nos diferentes tratamentos com e sem cobertura vegetal, considerando as espécies *Lolium*, *Calendula*, *Ornithopus* e *Mix*, sob distintas densidades de semeadura. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1<sup>a</sup> simulação e a segunda coluna à 2<sup>a</sup> simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

Para o tratamento *Lolium*, as barras verdes ('Com Vegetação') indicam uma erodibilidade relativamente baixa. A análise das letras minúsculas revela que a densidade 'Baixa' (a) apresenta a maior perda de solo, sendo estatisticamente diferente das densidades 'Média' (b) e 'Alta' (b). As densidades 'Média' e 'Alta', por sua vez, não apresentam diferença estatística significativa entre si, indicando que ambas resultam em menor perda de solo em comparação com a densidade 'Baixa'. Este padrão sugere que, para o *Lolium*, as densidades 'Média' e 'Alta' são mais eficazes na redução da erodibilidade do que a densidade 'Baixa'. Isso pode ser atribuído a uma cobertura do solo mais completa e um sistema radicular mais entrelaçado em densidades mais elevadas, proporcionando maior proteção contra a erosão.

Nas condições 'Sem Vegetação' (barras amarelas), a erodibilidade do solo aumenta significativamente em todas as densidades para *Lolium*. As densidades 'Média' (b) e 'Alta' (b) não apresentaram diferença estatística, mas ambas resultaram em menor perda de solo em comparação

com a 'Baixa' (a). Isso indica que, mesmo na ausência de cobertura vegetal ativa, a densidade inicial da sementeira pode ter um efeito residual na erodibilidade, possivelmente devido à matéria orgânica residual ou a uma estrutura de solo ligeiramente melhorada deixada pelas raízes, que ainda oferece alguma resistência à erosão em comparação com a densidade mais alta.

Para o tratamento Calêndula, sob condições 'Com Vegetação', exibe uma erodibilidade baixa. A análise estatística das densidades de sementeira mostra que a densidade 'Média' (a) apresenta a maior perda de solo, sendo estatisticamente diferente da 'Baixa' (ab) e da 'Alta' (b). A densidade 'Alta' (b) apresenta a menor perda de solo, enquanto a 'Baixa' (ab) está em um grupo intermediário. Este resultado sugere que a Calêndula tem um desempenho variável com a densidade, sendo a densidade alta a mais protetora. A densidade média pode ter levado a uma competição excessiva entre as plantas, resultando em um desenvolvimento menos vigoroso e, conseqüentemente, em uma cobertura do solo menos eficaz. A densidade alta, por outro lado, pode ter proporcionado um equilíbrio ideal para o desenvolvimento da planta e a proteção do solo.

No Ornithopus (serradela), com vegetação, demonstra uma erodibilidade baixa. A análise das letras minúsculas indica que a densidade 'Baixa' (a) apresenta a maior perda de solo, sendo estatisticamente diferente da 'Média' (b) e da 'Alta' (c). A densidade 'Média' (b) resulta em menor perda de solo que a 'Baixa' (a), e a 'Alta' (c) apresenta a menor perda de solo entre as três densidades. Este é um achado significativo, pois sugere que a densidade 'Alta' é a mais eficaz para o Ornithopus, maximizando seu potencial de proteção do solo. A serradela é uma leguminosa valorizada por sua capacidade de fixação de nitrogênio e por formar uma cobertura densa e rasteira que protege eficazmente o solo contra a erosão. A densidade alta pode ter proporcionado o equilíbrio ideal entre cobertura do solo e desenvolvimento radicular, enquanto densidades muito baixas podem não fornecer cobertura suficiente.

Por fim, o tratamento 'Mix', que representa uma mistura de plantas, apresenta uma erodibilidade baixa sob condições 'Com Vegetação'. A análise das letras minúsculas mostra que a densidade 'Baixa' (a) apresenta a maior perda de solo, sendo estatisticamente diferente das densidades 'Média' (b) e 'Alta' (b), que não diferem entre si. Isso sugere que a densidade 'Baixa' é menos eficaz que as densidades 'Média' e 'Alta' para a mistura de plantas, as quais resultam em perdas de solo significativamente menores. Este resultado indica que, embora as misturas de plantas sejam geralmente robustas, a densidade de sementeira ainda desempenha um papel importante na otimização da proteção do solo. Em densidades mais elevadas, a sinergia entre as diferentes espécies pode ser maximizada, proporcionando uma cobertura mais completa e um sistema radicular mais eficaz na redução da erodibilidade.

A comparação entre as famílias de plantas, indicada pelas letras maiúsculas, revela diferenças significativas na eficácia do controle da erodibilidade do solo:

Para o Controle (A): O grupo 'Controle' apresenta a maior erodibilidade, confirmando inequivocamente a importância da vegetação para a estabilidade do solo e a prevenção da erosão. Seus valores servem como linha de base para avaliar a eficácia dos tratamentos com plantas.

Ornithopus (B): O *Ornithopus* demonstra a menor erodibilidade entre todas as famílias de plantas, sugerindo que esta espécie é particularmente eficaz na proteção do solo contra a erosão. Este desempenho superior é visível principalmente nas condições 'Com Vegetação' e corrobora a literatura que destaca a serradela como uma excelente planta de cobertura devido à sua densa cobertura e contribuição para a estrutura do solo.

Calêndula (C) e Mix (C): A Calêndula e o 'Mix' de plantas apresentam erodibilidade intermediária e não são estatisticamente diferentes entre si. Isso indica que ambas as abordagens têm um efeito similar na redução da erodibilidade do solo, sendo eficazes, mas não tão superiores quanto o *Ornithopus*. A similaridade entre a Calêndula e o 'Mix' pode ser atribuída à capacidade da Calêndula de fornecer uma cobertura razoável e melhorar a qualidade do solo, enquanto o 'Mix' se beneficia da diversidade de espécies para uma proteção consistente.

*Lolium* (D): O *Lolium* apresenta a maior erodibilidade entre as famílias de plantas com vegetação, sendo estatisticamente diferente das demais. No entanto, é crucial reiterar que, mesmo com essa maior erodibilidade em comparação com as outras famílias, os valores ainda são significativamente menores do que o controle sem vegetação. Isso significa que o *Lolium* ainda é benéfico para o controle da erosão, mas pode ser menos eficaz do que *Ornithopus*, Calêndula ou uma mistura de plantas em termos de redução da erodibilidade. Suas características de rápido estabelecimento e sistema radicular fibroso ainda o tornam uma opção valiosa, especialmente em contextos onde outras espécies podem não ser tão adaptadas.

## 6.7 Sedimento em suspensão e Sedimento de frente

Após a coleta dos sedimentos de frente e em suspensão, secos a estufa e quantificados, quando somados dão os valores de perda de solo. É possível observar na Figura 17 que em todos os tratamentos com exceção do Calêndula Média densidade começam a medida que aumenta a densidade de plantas nos tabuleiros a concentração de sedimento de rampa e de frente, culminando na perda de solo diminuem.

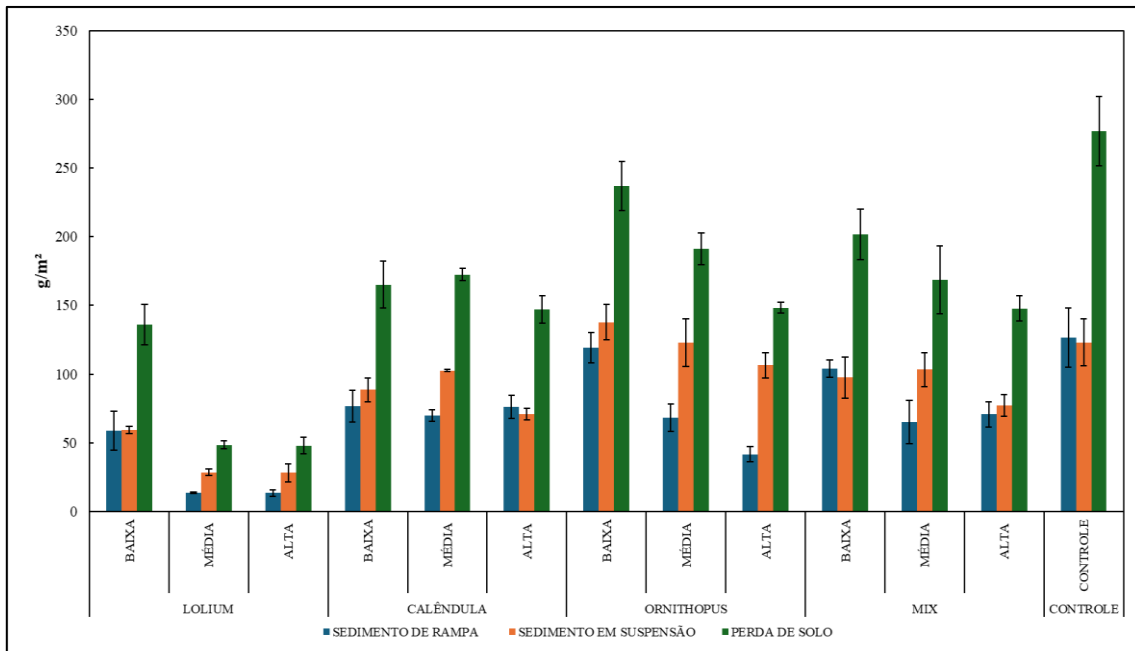


Figura 17 - Comparação entre as frações de sedimentos transportados (sedimento de rampa, sedimento em suspensão e perda total de solo) para as espécies *Lolium*, *Calêndula*, *Ornithopus* e *Mix* sob diferentes densidades de semeadura e no controle.

A análise comparativa das espécies de cobertura vegetal revela uma variação significativa na sua capacidade de mitigar a erosão do solo, conforme evidenciado pelos valores de perda de solo, sedimento de rampa e sedimento em suspensão. O *Lolium* destacou-se como a espécie mais eficiente, apresentando os menores valores de perda de solo (variando de 41.61 a 118.19 g/m²), sedimento de rampa (13.53 a 58.86 g/m²) e sedimento em suspensão (28.08 a 59.33 g/m²). Essa superioridade pode ser atribuída às características intrínsecas do *Lolium* perenne, como seu sistema radicular denso e fibroso, que promove a agregação do solo e aumenta sua resistência à desagregação, e sua rápida capacidade de estabelecimento e formação de uma cobertura densa, que protege a superfície do solo do impacto direto das gotas de chuva (ALVARENGA & FERNANDES, 2011; REHAGRO, 2025). Tais atributos são cruciais para a estabilização de solos e a redução do transporte de sedimentos, conforme amplamente discutido na literatura sobre fitoestabilização e controle de erosão (ROVEDDER & ELTZ, 2008).

Em contraste, o *Ornithopus* demonstrou ser a espécie menos eficaz entre as testadas, com os maiores valores de perda de solo (148.19 a 236.96 g/m²), sedimento de rampa (41.71 a 119.24 g/m²) e sedimento em suspensão (106.49 a 137.77 g/m²). Embora a presença de *Ornithopus* ainda seja preferível à ausência total de cobertura, sua menor eficácia pode estar relacionada a um sistema radicular menos robusto ou a uma cobertura foliar menos densa, que não proporciona a mesma proteção contra a energia do impacto da chuva e a velocidade do escoamento superficial. A *Calêndula* e o *Mix* de espécies apresentaram um desempenho intermediário, com valores de perda de solo e sedimentos superiores aos do *Lolium*, mas inferiores aos do *Ornithopus* e do

controle. Isso sugere que, embora ofereçam alguma proteção, suas características morfológicas e fisiológicas podem não ser tão otimizadas para o controle da erosão quanto as do *Lolium* (CARDOSO et al., 2012).

A densidade da cobertura vegetal demonstrou ser um fator crítico na modulação dos processos erosivos. Para a maioria das espécies, observou-se uma tendência de redução da perda de solo, sedimento de rampa e sedimento em suspensão com o aumento da densidade de plantio (de baixa para alta). Este achado corrobora a premissa de que uma maior cobertura do solo resulta em maior interceptação da chuva, menor energia de impacto sobre o solo e maior rugosidade superficial, o que, por sua vez, diminui a capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento (BLOG VERDE, 2022). No entanto, a magnitude dessa redução variou entre as espécies, indicando uma interação complexa entre a densidade e as características específicas de cada planta. Por exemplo, o *Lolium* manteve baixos níveis de erosão mesmo em densidades mais baixas, enquanto outras espécies necessitaram de densidades mais elevadas para alcançar um nível de proteção comparável. A importância da densidade da cobertura na redução da erosão é um princípio fundamental da conservação do solo, conforme destacado por diversos estudos (CASTRO et al., 2011).

### **6.8 Salpicamento e Destacabilidade**

Na Figura 18 é possível observar que os resultados apresentados demonstram, de maneira inequívoca e estatisticamente significativa, o papel preponderante da cobertura vegetal na atenuação do salpicamento. Em todas as combinações de espécies e densidades avaliadas, a presença de vegetação resultou em uma redução substancial do SP em comparação com as parcelas desprovidas de cobertura vegetal. Por exemplo, no tratamento com *Lolium* em alta densidade, o SP registrou um valor de apenas 13,69 g/m<sup>2</sup> na presença de vegetação, enquanto na ausência desta, o valor ascendeu a 161,67 g/m<sup>2</sup>, representando uma redução drástica de aproximadamente 91,5%. Essa disparidade, consistentemente observada em todos os cenários experimentais, corrobora a vasta literatura científica que atesta a eficácia das plantas de cobertura na proteção do solo contra a erosão hídrica, especialmente no que tange ao salpicamento (RAMOS et al., 2025; REHAGRO, 2025).

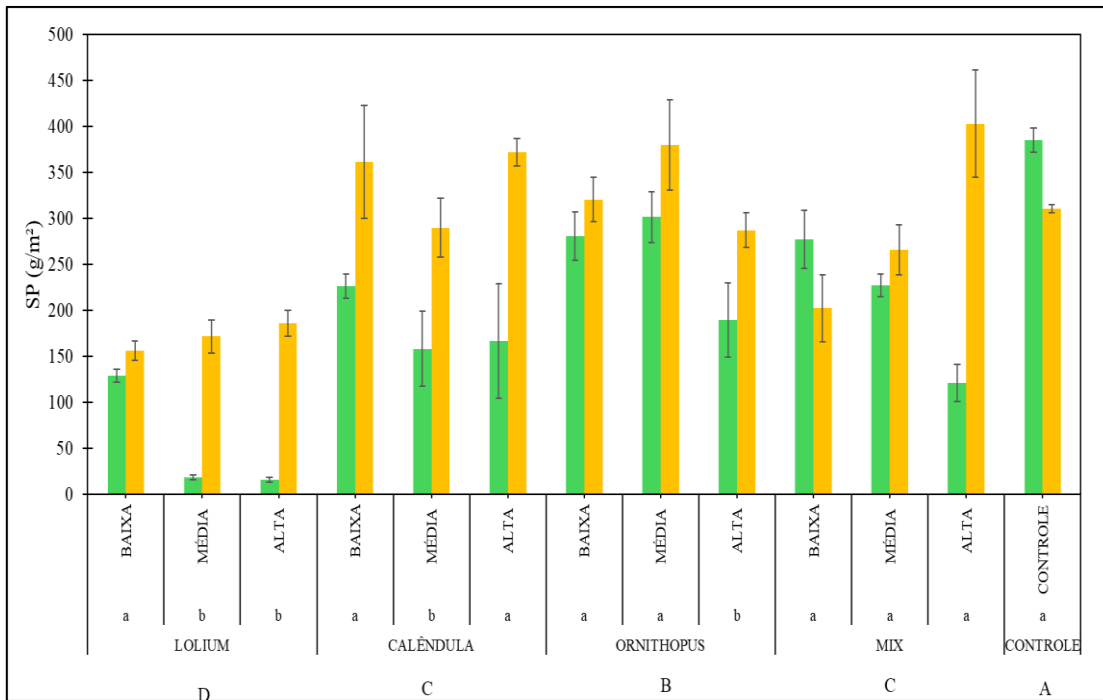


Figura 18 - Salpicamento (SP) em tratamentos com e sem cobertura vegetal (*Lolium*, *Calendula*, *Ornithopus* e *Mix*) sob diferentes densidades de semeadura e controle. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

A análise comparativa entre as espécies de plantas de cobertura revela uma hierarquia de eficácia na mitigação do salpicamento, com implicações diretas para a seleção de cultivares em programas de conservação do solo. O *Lolium* (*Lolium perenne*) destacou-se como a espécie mais eficiente, apresentando os menores valores de SP em praticamente todas as condições de densidade. Essa notável superioridade pode ser atribuída às características intrínsecas do *Lolium perenne*, incluindo seu sistema radicular fasciculado e denso, que promove a agregação do solo e aumenta sua resistência à desagregação, e sua capacidade de rápido estabelecimento e formação de uma cobertura densa e uniforme, que protege a superfície do solo do impacto direto das gotas de chuva e do escoamento superficial (ALVARENGA & FERNANDES, 2011). Tais atributos são cruciais para a estabilização de solos e a redução do transporte de sedimentos, conforme amplamente discutido na literatura sobre fitoestabilização e controle de erosão (ROVEDDER & ELTZ, 2008).

Em contrapartida, o *Ornithopus* (*Ornithopus sativus*) demonstrou ser a espécie menos eficaz entre as testadas na redução do SP, registrando os maiores valores tanto na presença quanto na ausência de vegetação. Embora a presença de *Ornithopus* ainda seja preferível à ausência total de cobertura, sua menor eficácia pode ser correlacionada a um sistema radicular menos robusto,

uma cobertura foliar menos densa ou um ciclo de vida que não se alinha otimamente com os períodos de maior risco de erosão. A Calêndula e o Mix de espécies apresentaram um desempenho intermediário, com valores de SP superiores aos do *Lolium*, mas inferiores aos do *Ornithopus* e do tratamento controle. Isso sugere que, embora ofereçam alguma proteção, suas características morfológicas e fisiológicas podem não ser tão otimizadas para o controle do Salpicamento quanto as do *Lolium* (CARDOSO et al., 2012). A performance do Mix de espécies, que não superou consistentemente as espécies individuais mais eficazes, ressalta a complexidade da interação entre diferentes espécies em um consórcio e a necessidade de estudos mais aprofundados para otimizar a composição de misturas de plantas de cobertura.

No tratamento com *Lolium*, observa-se que as barras verdes (“Com Vegetação”) indicam uma erodibilidade relativamente baixa. A análise estatística revela que a densidade baixa apresenta a maior perda de solo, sendo significativamente diferente das densidades média e alta, que, por sua vez, não diferem entre si. Isso demonstra que, para o *Lolium*, as densidades média e alta são mais eficazes na redução da erodibilidade do que a densidade baixa, resultado que pode ser atribuído à formação de uma cobertura do solo mais uniforme e a um sistema radicular mais entrelaçado em plantios mais densos, fatores que aumentam a resistência à desagregação e o controle da erosão (Figura 19).

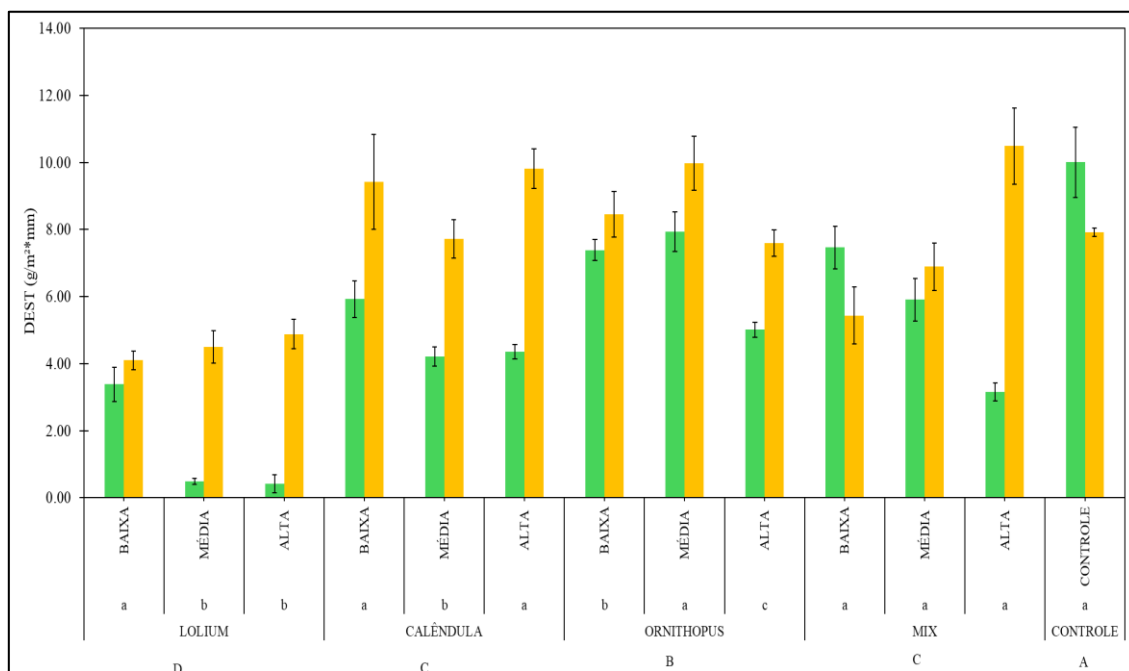


Figura 19- Comparação da Destacabilidade (DEST) entre os tratamentos com e sem cobertura vegetal (*Lolium*, *Calendula*, *Ornithopus* e *Mix*), sob diferentes densidades de semeadura e controle. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

Nas condições “Sem Vegetação” (barras amarelas), a erodibilidade do solo apresentou aumento significativo em todas as densidades de *Lolium*. Ainda assim, as densidades média e alta mantiveram menores perdas de solo quando comparadas à densidade baixa, sugerindo que a densidade inicial de semeadura exerce um efeito residual na estrutura do solo, possivelmente em razão da maior incorporação de matéria orgânica e da melhoria da estabilidade dos agregados deixada pelas raízes, mesmo após a remoção da parte aérea.

No caso da Calêndula, sob condições “Com Vegetação”, a espécie apresentou erodibilidade relativamente baixa, mas com variação conforme a densidade de semeadura. A densidade média resultou na maior perda de solo, diferenciando-se estatisticamente das densidades baixa e alta. Esta última, por sua vez, foi a mais eficiente na proteção do solo, sugerindo que a maior densidade favoreceu um equilíbrio ideal entre desenvolvimento vegetal e cobertura protetora. Em contrapartida, a densidade média pode ter promovido competição excessiva entre as plantas, reduzindo a vitalidade e a cobertura efetiva do solo (CARDOSO et al., 2012; CASTRO et al., 2011).

O *Ornithopus sativus* (serradela) demonstrou ser altamente eficiente na mitigação da erosão, apresentando uma clara tendência de redução da perda de solo à medida que a densidade de semeadura aumentou. As análises estatísticas indicaram que a densidade baixa apresentou a maior erodibilidade, enquanto as densidades média e alta proporcionaram reduções progressivas e significativas, sendo a densidade alta a mais eficaz. Essa superioridade é atribuída à capacidade da serradela de formar uma cobertura densa e rasteira e de contribuir para a estrutura e estabilidade do solo por meio da fixação biológica de nitrogênio e do entrelaçamento radicular (ALVARENGA; FERNANDES, 2011; ROVEDDER; ELTZ, 2008).

O tratamento com o Mix de espécies também apresentou baixos níveis de erodibilidade na condição “Com Vegetação”. A densidade baixa foi novamente a que mais perdeu solo, diferenciando-se estatisticamente das densidades média e alta, que se mostraram semelhantes entre si. Esses resultados indicam que a densidade de semeadura é determinante na eficácia da cobertura mista: em maiores densidades, ocorre uma sinergia entre espécies com diferentes padrões de crescimento, o que resulta em uma cobertura mais completa e em um sistema radicular mais profundo e diversificado, maximizando a proteção do solo contra processos erosivos (BLANCO-CANQUI, 2018; MUBVUMBA; DELAUNE, 2023).

A comparação entre as famílias de plantas, representadas pelas letras maiúsculas nas análises estatísticas, evidencia diferenças expressivas quanto à eficiência no controle da erodibilidade. O grupo controle apresentou, como esperado, os maiores índices de perda de solo, confirmando o papel indispensável da vegetação na estabilidade estrutural e na prevenção da

erosão. Já o *Ornithopus* destacou-se como a espécie mais eficaz, apresentando a menor erodibilidade entre todas, fato que corrobora a literatura especializada sobre sua eficiência como planta de cobertura (ALVARENGA; FERNANDES, 2011; ROVEDDER; ELTZ, 2008).

A *Calêndula* e o *Mix* de espécies apresentaram desempenho intermediário e estatisticamente semelhantes, sugerindo que ambas as abordagens são efetivas na redução da erosão, ainda que não atinjam o mesmo nível de proteção conferido pela serradela. Por fim, o *Lolium* exibiu a maior erodibilidade entre as famílias de plantas com vegetação, embora ainda com valores significativamente inferiores ao controle sem cobertura. Isso indica que, mesmo sendo menos eficaz do que *Ornithopus* e o *Mix*, o *Lolium* continua a ser uma opção valiosa para o controle de erosão, sobretudo por seu rápido estabelecimento, elevada produção de biomassa e sistema radicular fibroso, características que favorecem a estabilização do solo e a recuperação de áreas suscetíveis à degradação (CARDOSO et al., 2012; CASTRO et al., 2011).

### 6.9 Densidade aparente e Porosidade total

Observou-se que os valores de densidade aparente ( $D_{ap}$ ) variam entre as diferentes culturas de cobertura e os níveis de manejo adotados. Conforme apresentado na Tabela 9 e Figura 20 o *Lolium* manteve valores relativamente elevados de  $D_{ap}$  nos níveis de manejo Baixa e Média ( $1,32 \text{ g cm}^{-3}$  em ambos os casos), apresentando uma leve redução no nível Alto ( $1,27 \text{ g cm}^{-3}$ ). A *Calêndula* exibiu comportamento semelhante, com  $D_{ap}$  de  $1,32 \text{ g cm}^{-3}$  no nível Baixo,  $1,30 \text{ g cm}^{-3}$  no nível Médio e  $1,32 \text{ g cm}^{-3}$  no nível Alto, indicando variações discretas entre os tratamentos.

O *Ornithopus* apresentou tendência distinta, com valores de  $D_{ap}$  de  $1,29 \text{ g cm}^{-3}$  (Baixa),  $1,24 \text{ g cm}^{-3}$  (Média) e  $1,24 \text{ g cm}^{-3}$  (Alta), evidenciando uma redução consistente da densidade aparente à medida que o nível de manejo aumentou. Essa diminuição pode estar associada à maior atividade radicular e à melhoria da estrutura do solo promovida pela serradela em densidades mais elevadas, favorecendo a formação e estabilidade de agregados (TISDALL; OADES, 1982; REICHERT et al., 2009).

O tratamento *Mix*, composto por diferentes espécies, apresentou  $D_{ap}$  de  $1,24 \text{ g cm}^{-3}$  (Baixa),  $1,28 \text{ g cm}^{-3}$  (Média) e  $1,27 \text{ g cm}^{-3}$  (Alta). Embora o valor do nível Baixo tenha sido inferior ao do tratamento Controle ( $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ ), observou-se um leve aumento nos níveis Médio e Alto, o que pode estar relacionado às interações competitivas entre espécies na mistura, capazes de modificar a distribuição radicular e o rearranjo das partículas do solo (BLANCO-CANQUI, 2018; SIX et al., 2004).

A influência dos níveis de manejo (Baixa, Média, Alta) na Dap é dependente da cultura de cobertura utilizada. Em alguns casos, como no *Lolium* e na *Calêndula*, a variação da Dap entre os níveis de manejo é menos pronunciada ou não segue uma tendência clara de redução com o aumento do nível de manejo. No entanto, para o *Ornithopus*, há uma clara indicação de que os níveis Média e Alta de manejo resultam em menores valores de Dap em comparação com o nível Baixa. O tratamento Mix também mostra uma redução da Dap no nível Baixa em comparação com o Controle, mas um aumento nos níveis Média e Alta em relação ao nível Baixa.

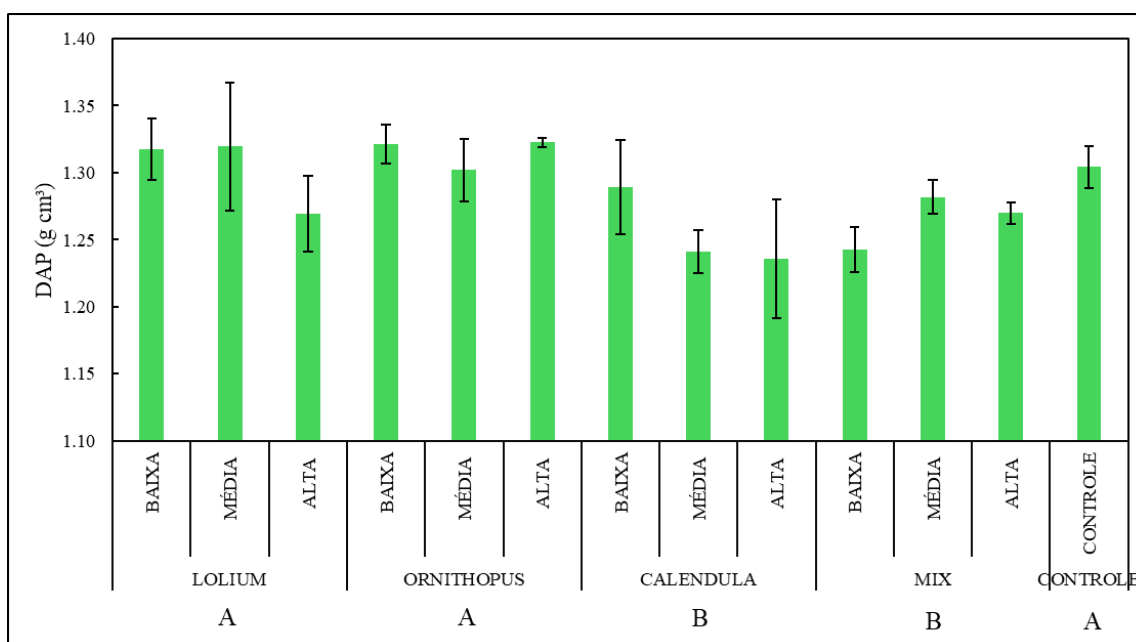


Figura 20 - Valores médios de densidade aparente do solo (DAP) obtidos para os diferentes tratamentos com *Lolium*, *Ornithopus*, *Calendula* e *Mix*, sob distintas densidades de semeadura e controle. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

De modo geral, verifica-se que a influência dos níveis de manejo sobre a densidade aparente depende fortemente da cultura de cobertura utilizada. No *Lolium* e na *Calêndula*, as variações de Dap entre os níveis Baixo, Médio e Alto são pouco expressivas, não apresentando uma tendência definida de redução com o incremento do manejo. Já no *Ornithopus*, a tendência de menores valores de Dap nos níveis Médio e Alto é evidente, o que sugere um efeito benéfico da cobertura mais densa sobre a estrutura do solo. No *Mix*, embora o comportamento seja menos uniforme, o resultado do nível Baixo, inferior ao Controle, indica que mesmo coberturas iniciais podem contribuir para a melhoria da qualidade física do solo em relação às áreas descobertas (REICHERT et al., 2009; BLANCO-CANQUI, 2018).

Esses resultados reforçam a importância do tipo de cobertura vegetal e da intensidade de manejo na modulação das propriedades físicas do solo. Culturas de cobertura com sistemas radiculares bem desenvolvidos e de alta densidade tendem a reduzir a Dap, aumentando a porosidade e, conseqüentemente, a capacidade de infiltração e armazenamento de água no solo, fatores essenciais para a mitigação de processos erosivos e a sustentabilidade do sistema produtivo (TISDALL; OADES, 1982; REICHERT et al., 2009; BLANCO-CANQUI, 2018).

*Tabela 9 -Parâmetros físicos do solo, incluindo densidade aparente ( $\rho$ ), porosidade total ( $\phi_{total}$ ) e densidade das partículas ( $\rho_s$ ), obtidos para os diferentes tratamentos e densidades de semeadura das espécies avaliadas.*

		$\rho$ (g cm <sup>3</sup> )	$\phi_{total}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\rho_s$ (g cm <sup>3</sup> )
<i>Lolium</i>	Baixa	1.32	0.52	2.54
	Média	1.32	0.51	2.55
	Alta	1.27	0.53	2.53
Calêndula	Baixa	1.32	0.52	2.53
	Média	1.30	0.52	2.47
	Alta	1.32	0.54	2.56
Ornithopus	Baixa	1.29	0.52	2.49
	Média	1.24	0.53	2.54
	Alta	1.24	0.53	2.50
Mix	Baixa	1.24	0.52	2.52
	Média	1.28	0.50	2.55
	Alta	1.27	0.52	2.53
Controle		1.30	0.51	2.53

A influência dos níveis de manejo (Baixa, Média, Alta) na  $\phi_{total}$  e Dap é consistente com a relação inversa entre as duas propriedades. Em geral, tratamentos que resultam em menor Dap tendem a apresentar maior  $\phi_{total}$  (Tabela 9). Por exemplo, para o Ornithopus, os níveis Média e Alta de manejo resultam em menores valores de Dap (1.24 g cm<sup>-3</sup>) e maiores valores de  $\phi_{total}$  (0.53 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) em comparação com o nível Baixa (Dap de 1.29 g cm<sup>-3</sup> e  $\phi_{total}$  de 0.52 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>). Isso sugere que o manejo adequado pode promover a descompactação do solo e o aumento do espaço poroso.

Para o *Lolium*, a porosidade total ( $\phi_{total}$ ) variou de 0,51 a 0,53 (Figura 21), enquanto a densidade aparente (Dap) oscilou entre 1,27 e 1,32 g cm<sup>-3</sup>. Observa-se uma relação inversa clara entre essas variáveis, uma vez que o menor valor de Dap (1,27 g cm<sup>-3</sup>) corresponde ao maior valor de  $\phi_{total}$  (0,53 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), e vice-versa, confirmando que o aumento da densidade do solo implica redução da porosidade total. Essa tendência está de acordo com princípios fundamentais da física

do solo, segundo os quais o empacotamento mais denso das partículas reduz o volume de poros disponíveis para o armazenamento de ar e água (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2003).

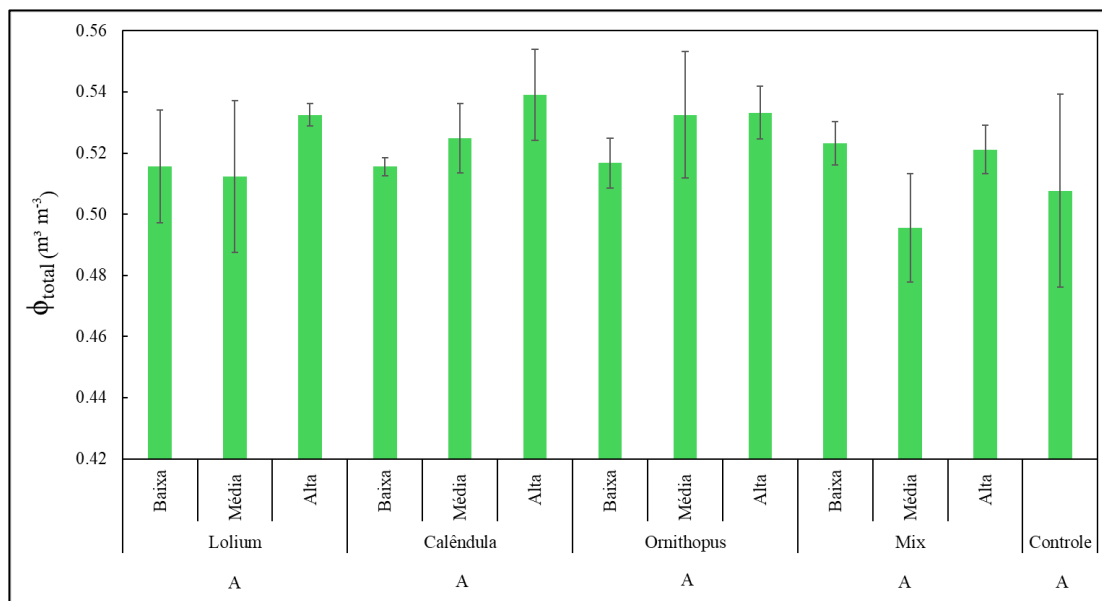


Figura 21 - Porosidade total ( $\phi_{total}$ ) dos solos sob diferentes espécies e densidades de cobertura vegetal. . Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

A Calêndula apresentou valores de  $\phi_{total}$  entre 0,52 e 0,54 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, com Dap variando de 1,30 a 1,32 g cm<sup>-3</sup>. Embora as variações sejam sutis, elas indicam que o manejo e o desenvolvimento radicular da espécie podem exercer influência limitada sobre a estrutura física do solo, mantendo níveis moderados de porosidade.

O Ornithopus, por sua vez, demonstrou valores de  $\phi_{total}$  entre 0,52 e 0,53 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e Dap entre 1,24 e 1,29 g cm<sup>-3</sup>. Notavelmente, os menores valores de Dap (1,24 g cm<sup>-3</sup>) correspondem aos maiores valores de  $\phi_{total}$  (0,53 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), evidenciando a eficiência dessa leguminosa na melhoria da estrutura do solo, possivelmente devido ao seu sistema radicular profundo e ramificado, que favorece a formação de bioporos e a agregação estável (TISDALL; OADES, 1982; BLANCO-CANQUI, 2018).

O tratamento Mix apresentou valores de  $\phi_{total}$  entre 0,50 e 0,52 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e Dap variando de 1,24 a 1,28 g cm<sup>-3</sup>. Apesar de não ter alcançado os maiores valores de porosidade, o Mix demonstrou um equilíbrio entre as características das espécies participantes, refletindo a influência combinada de sistemas radiculares distintos e a possibilidade de sinergias no aumento da rugosidade superficial e na melhoria da estrutura do solo (SIX et al., 2004; BLANCO-CANQUI, 2018).

A análise dos resultados reforça a relevância de monitorar simultaneamente a densidade aparente e a porosidade total como indicadores-chave da qualidade física do solo. Valores de Dap próximos ou superiores a  $1,40 \text{ g cm}^{-3}$  são frequentemente considerados críticos para o crescimento radicular da maioria das culturas, pois indicam níveis de compactação que restringem a penetração das raízes e a circulação de ar e água no perfil do solo (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2003). Ainda que os valores observados neste estudo se mantenham, em sua maioria, abaixo desse limiar, as variações identificadas entre as culturas e níveis de manejo evidenciam o potencial de melhoria estrutural do solo mediante o uso adequado de plantas de cobertura. Em especial, o *Ornithopus* e o *Lolium* mostraram-se promissores para aumentar a porosidade e reduzir a compactação, reforçando sua importância em estratégias de conservação e manejo sustentável do solo (TISDALL; OADES, 1982; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2003; BLANCO-CANQUI, 2018).

### 6.10 Micro e Macroporosidade

Na Tabela 10 apresenta os valores de micro e macroporosidade ( $\phi_{\text{micro}}$  e  $\phi_{\text{macro}}$ , respectivamente) para diferentes tratamentos, incluindo as culturas de *Lolium*, Calêndula, *Ornithopus*, e um Mix de culturas, cada uma em três níveis de manejo (Baixa, Média, Alta), além de um tratamento controle. A análise desses dados permite observar as variações na distribuição dos poros e inferir sobre a qualidade estrutural do solo sob diferentes condições.

*Tabela 10 - Microporosidade ( $\phi_{\text{micro}}$ ) e macroporosidade ( $\phi_{\text{macro}}$ ) do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) nos diferentes tratamentos e densidades de semeadura.*

		$\phi_{\text{micro}} (\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$	$\phi_{\text{macro}} (\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$
<i>Lolium</i>	Baixa	0.45	0.02
	Média	0.46	0.02
	Alta	0.48	0.02
Calêndula	Baixa	0.46	0.02
	Média	0.46	0.03
	Alta	0.45	0.03
<i>Ornithopus</i>	Baixa	0.46	0.03
	Média	0.48	0.02
	Alta	0.49	0.02
Mix	Baixa	0.48	0.03
	Média	0.47	0.03
	Alta	0.47	0.03
Controle		0.46	0.02

*Nota: A microporosidade ( $\phi_{\text{micro}}$ ) corresponde ao volume de poros com diâmetro equivalente  $\leq 0,05 \text{ mm}$ , enquanto a macroporosidade ( $\phi_{\text{macro}}$ ) representa os poros  $> 0,05 \text{ mm}$ .*

Para o *Lolium*, a microporosidade ( $\phi_{\text{micro}}$ ) varia de 0.45 a 0.48  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , enquanto a macroporosidade ( $\phi_{\text{macro}}$ ) permanece constante em 0.02  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Isso sugere que, para esta cultura, a maior parte do volume poroso é composta por microporos, indicando uma alta capacidade de retenção de água, mas potencialmente uma menor aeração e drenagem rápida. A Calêndula apresenta  $\phi_{\text{micro}}$  entre 0.45 e 0.46  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , e  $\phi_{\text{macro}}$  entre 0.02 e 0.03  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Observa-se um ligeiro aumento na macroporosidade em alguns níveis de manejo para a Calêndula, o que pode indicar uma pequena melhoria na aeração e drenagem em comparação com o *Lolium*.

O *Ornithopus* demonstra  $\phi_{\text{micro}}$  entre 0.46 e 0.49  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , e  $\phi_{\text{macro}}$  entre 0.02 e 0.03  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . É notável que o *Ornithopus* atinge o maior valor de microporosidade (0.49) no nível de manejo Alta, enquanto mantém uma macroporosidade razoável. O tratamento Mix exhibe  $\phi_{\text{micro}}$  entre 0.47 e 0.48  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , e  $\phi_{\text{macro}}$  entre 0.02 e 0.03  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . O tratamento controle apresenta  $\phi_{\text{micro}}$  de 0.46  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  e  $\phi_{\text{macro}}$  de 0.02  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , servindo como base de comparação para os efeitos das culturas de cobertura e manejos.

Na Figura 22 é possível observar a influência dos níveis de manejo (Baixa, Média, Alta) na micro e macroporosidade varia entre as culturas. Para o *Lolium*, o aumento do nível de manejo de Baixa para Alta parece estar associado a um pequeno aumento na microporosidade, enquanto a macroporosidade permanece inalterada. Para a Calêndula, a macroporosidade aumenta ligeiramente nos níveis Média e Alta em comparação com o nível Baixa, sugerindo que o manejo pode ter um efeito positivo na formação de macroporos. O *Ornithopus* e o Mix também mostram variações sutis, com o *Ornithopus* apresentando a maior microporosidade no nível Alta.

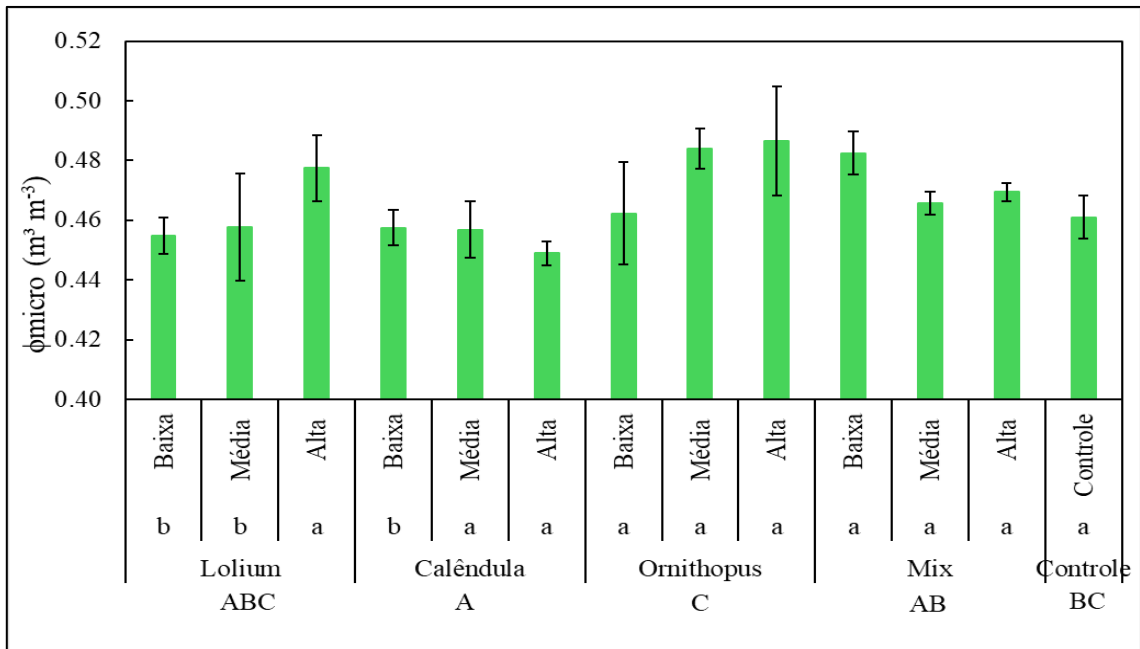


Figura 22 - Microporosidade do solo ( $\phi_{micro}$ ,  $m^3 m^{-3}$ ) nos diferentes tratamentos e densidades de semeadura. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

Em geral, a macroporosidade, por ser mais sensível a alterações na estrutura do solo causadas por práticas de manejo e compactação, é um indicador crucial da qualidade física do solo (STOLF; THURLER; BACCHI, 2011). Valores de macroporosidade abaixo de  $0,10 m^3 m^{-3}$  (ou 10%) (Figura 23) são frequentemente considerados limitantes para a aeração adequada do solo e o crescimento radicular (GRABLE, 1966). Nos dados apresentados, os valores de macroporosidade são relativamente baixos ( $0,02$  a  $0,03 m^3 m^{-3}$ ), o que pode indicar que, mesmo com as culturas de cobertura, a aeração e a drenagem rápida podem ser fatores limitantes em alguns casos. No entanto, pequenas variações na macroporosidade podem ter impactos significativos na condutividade hidráulica e na capacidade de infiltração do solo (BOUMA, 1991).

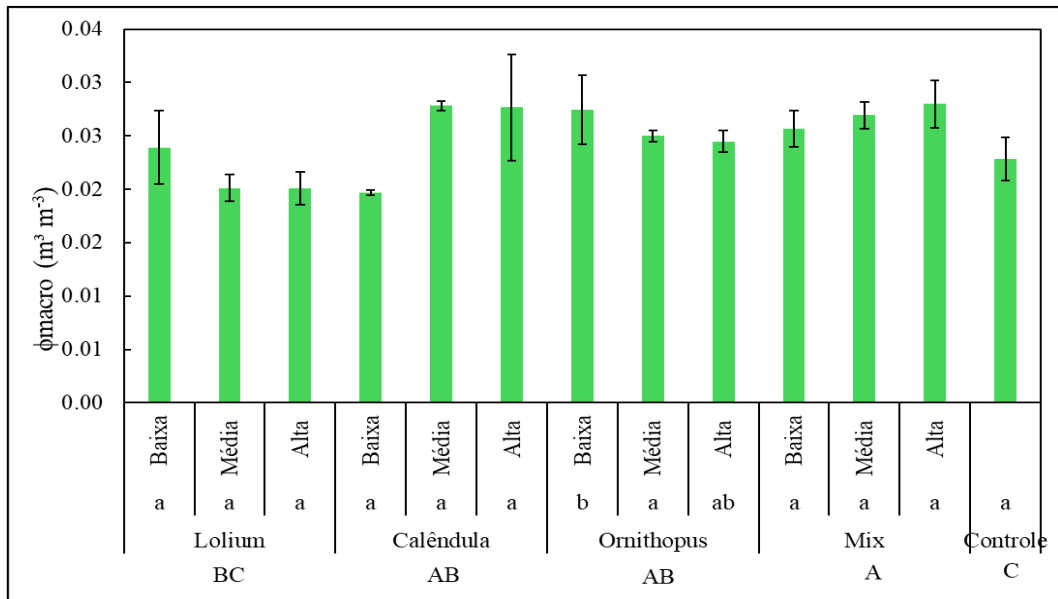


Figura 23 - Variação da macroporosidade ( $\phi_{macro}$ ) em função das espécies e densidades de cobertura vegetal. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

A micro e macroporosidade são atributos essenciais da qualidade física do solo, refletindo diretamente sua capacidade de reter água, permitir a aeração e facilitar o desenvolvimento radicular. A análise dos dados apresentados demonstra que as culturas de cobertura e os níveis de manejo influenciam a distribuição desses poros, embora a macroporosidade geral nos tratamentos estudados seja relativamente baixa, indicando a necessidade de atenção contínua à aeração e drenagem.

### 6.11 Capacidade máxima de água e Capacidade de campo

A Tabela 11 de Capacidade Máxima de Água (CMA) e Capacidade de Campo (CC) revela uma característica marcante, a diferença entre elas é consistentemente pequena em todos os tratamentos e níveis avaliados. Essa observação é crucial, pois a diferença entre CMA e CC representa a água gravitacional, que ocupa os macroporos e é rapidamente drenada do perfil do solo. Uma diferença reduzida, como a observada, sugere que a fração de macroporos é limitada, dados que já foram apresentados na Figura 23 (figura da seção anterior).

Tabela 11 - Valores médios de capacidade de máxima de água (CMA), capacidade de campo (CC) e macroporosidade ( $\phi_{macro}$ ) do solo nos diferentes tratamentos.

		CMA ( $m^3 m^{-3}$ )	CC ( $m^3 m^{-3}$ )	$\phi_{macro}$ ( $m^3 m^{-3}$ )
<i>Lolium</i>	Baixa	0.39	0.37	0.02
	Média	0.39	0.37	0.02
	Alta	0.42	0.40	0.02
Calêndula	Baixa	0.39	0.37	0.02
	Média	0.40	0.38	0.03
	Alta	0.41	0.38	0.03
Ornithopus	Baixa	0.40	0.38	0.03
	Média	0.43	0.41	0.02
	Alta	0.43	0.41	0.02
Mix	Baixa	0.42	0.40	0.03
	Média	0.39	0.37	0.03
	Alta	0.41	0.39	0.03
Controle		0.39	0.37	0.02

A Tabela 11 demonstra que os valores de macroporosidade variam entre 0.02 e 0.03  $m^3 m^{-3}$ , o que corresponde a 2% a 3% do volume total do solo. Estes valores são consideravelmente baixos, especialmente quando comparados com solos em condições naturais ou com manejo otimizado, onde a macroporosidade pode atingir 15% a 25% (EMBRAPA, 2018). A baixa macroporosidade tem implicações diretas na dinâmica da água no solo. Primeiramente, limita a taxa de infiltração, aumentando o risco de escoamento superficial e erosão (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Em segundo lugar, restringe a aeração do solo, o que pode prejudicar o desenvolvimento radicular das plantas e a atividade microbiana (PASSIOURA, 2002).

Mais pertinentemente para este estudo, a baixa macroporosidade explica a pequena diferença entre CMA e CC. Com poucos macroporos para a drenagem rápida da água, a maior parte da água retida no solo está em microporos e mesoporos, onde as forças capilares são mais fortes. Embora esses poros contribuam para a capacidade total de armazenamento de água (CMA e CC), a água neles retida pode não estar prontamente disponível para as plantas, especialmente em condições de estresse hídrico (CASSEL; NIELSEN, 1986). Portanto, a baixa macroporosidade não apenas limita a drenagem, mas também a disponibilidade de água para as plantas, mesmo que os valores absolutos de CMA e CC possam parecer razoáveis (Figura 24).

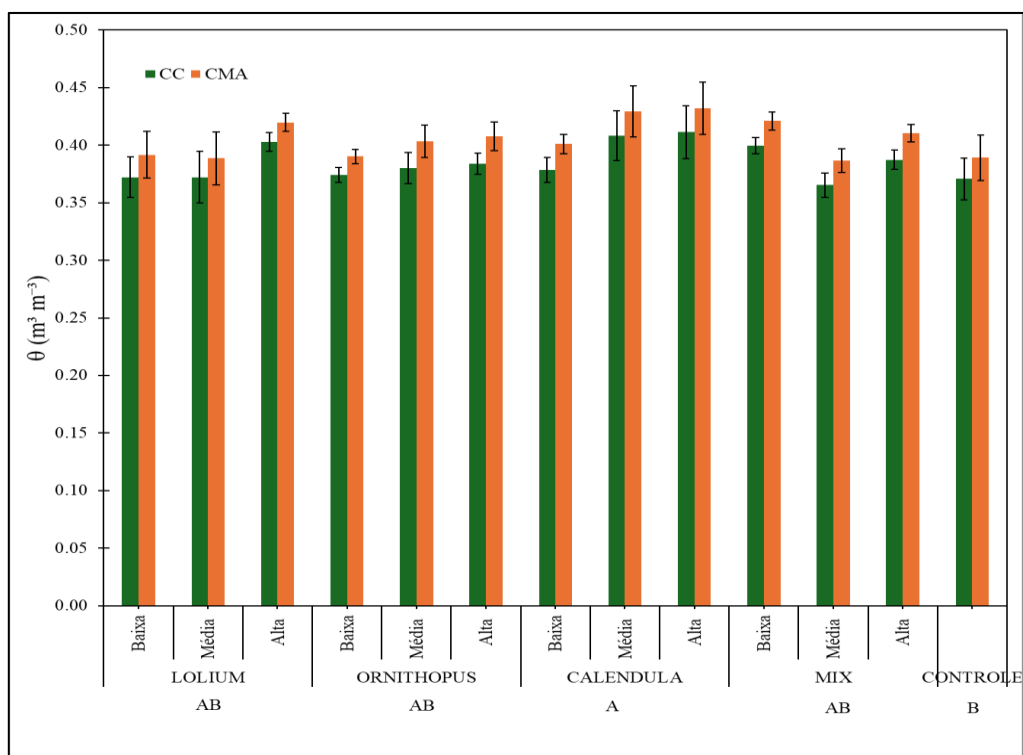


Figura 24 - Comparação dos valores médios de capacidade de campo (CC) e capacidade de máxima armazenagem (CMA) para os diferentes tratamentos. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

O tratamento com Calêndula destaca-se como o único tratamento que se diferiu estatisticamente do controle. Este resultado sugere que a Calêndula possui características agronômicas que favorecem a formação de agregados estáveis e o aumento do teor de matéria orgânica, mesmo em solos com baixa macroporosidade inicial. A matéria orgânica é um componente chave na melhoria da capacidade de retenção de água, pois possui alta capacidade de adsorção e contribui para a formação de microporos e mesoporos que retêm água disponível para as plantas (SIX et al., 2002). A biomassa radicular da Calêndula pode ter contribuído para a estabilização da estrutura do solo, otimizando a retenção de água nos poros existentes.

Os tratamentos *Lolium*, *Ornithopus* e *Mix* são agrupados como 'AB', indicando uma capacidade intermediária de retenção de água. Isso significa que, embora não se comportem como a Calêndula, são significativamente melhores que o Controle em algumas situações e não diferem da Calêndula em outras. O *Lolium*, conhecido por seu sistema radicular fibroso e denso, pode contribuir para a agregação do solo e a formação de canais radiculares, que, embora não aumentem drasticamente a macroporosidade, podem melhorar a conectividade dos poros e a retenção de água (CHEN; WEIL, 2011).

O *Ornithopus*, assim como o *Lolium* e o Mix, demonstra uma capacidade intermediária de retenção de água. Sua contribuição para a matéria orgânica e a estrutura do solo pode ser similar à do *Lolium*, resultando em benefícios moderados para a capacidade hídrica do solo.

### 6.12 Permeabilidade inicial e final

A permeabilidade inicial ( $K_i$ ) do solo é um atributo físico-hídrico fundamental que governa a taxa de infiltração de água e, conseqüentemente, a suscetibilidade do solo à erosão e a sua capacidade de reabastecer os aquíferos. A Figura 25 demonstra uma ampla variação nos valores de permeabilidade inicial entre os tratamentos e seus níveis, variando de valores próximos a zero no Controle até aproximadamente 10 cm/h no tratamento *Lolium* em Alta densidade.

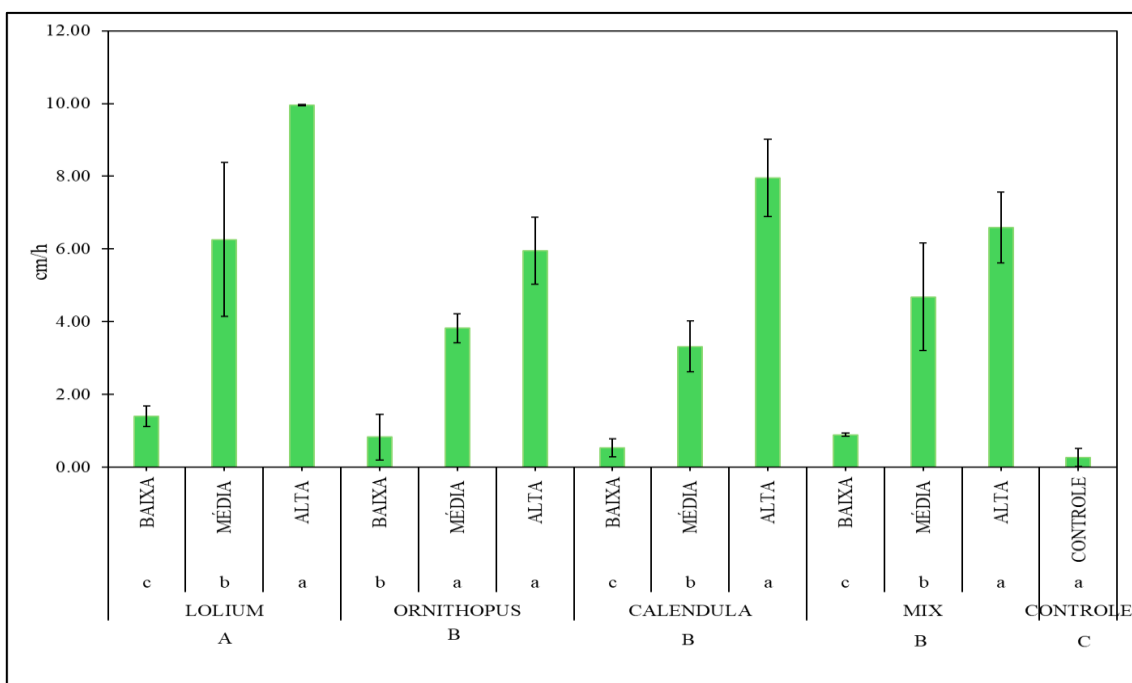


Figura 25 - Condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) inicial dos diferentes tratamentos sob distintas densidades de cobertura vegetal. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

O tratamento com *Lolium* (azevém) destaca-se como o mais eficaz na promoção da permeabilidade inicial do solo, evidenciado pelo resultado estatístico 'A'. Seus valores de  $K_i$ , especialmente nos níveis MÉDIA e ALTA (6 a 10 cm/h), são notavelmente superiores aos demais. Esta superioridade pode ser atribuída ao seu sistema radicular, que tem a capacidade de criar e estabilizar macroporos, mesmo em solos com baixa macroporosidade geral. A rápida cobertura do solo e a produção de biomassa pelo *Lolium* também contribuem para a melhoria da agregação do solo, formando uma estrutura mais estável e favorável à infiltração de água.

Os tratamentos Ornithopus, Calêndula e Mix são estatisticamente similares 'B', indicando uma capacidade intermediária de melhorar a permeabilidade inicial. Embora sejam significativamente mais eficazes que o Controle (C), não atingem o nível do *Lolium* (A). Os valores de Ki nesses tratamentos são variáveis, com picos em níveis MÉDIA ou ALTA, mas com valores muito baixos em BAIXA. Isso sugere que, embora essas espécies ou misturas possam promover alguma melhoria na estrutura do solo e na formação de poros, sua eficácia na criação de macroporos condutivos é inferior à do *Lolium*. A variabilidade dentro desses tratamentos (especialmente entre os níveis BAIXA e ALTA) indica que a intensidade do tratamento ou as condições específicas podem influenciar a formação de macroporos, mas de forma menos consistente ou pronunciada que o *Lolium*.

Similar ao Ornithopus, o tratamento com Calêndula demonstrou ser eficaz na retenção de água (conforme análise anterior), sua contribuição para a permeabilidade inicial, que depende mais diretamente dos macroporos, é intermediária. Isso pode indicar que, apesar de melhorar a agregação e a capacidade de retenção de água nos microporos, a Calêndula pode não ser tão eficiente quanto o *Lolium* na criação de uma rede de macroporos que favoreça o fluxo rápido de água

O tratamento Mix, o qual possui uma diversidade de espécies levou a uma exploração mais eficiente do volume do solo, com diferentes sistemas radiculares contribuindo para a formação de poros e a estabilização de agregados. No entanto, a eficácia geral do mix na permeabilidade inicial é limitada pela baixa macroporosidade predominante, impedindo que atinja o desempenho superior do *Lolium*.

O tratamento Controle, que representa a ausência de qualquer manejo específico, apresenta os menores valores de permeabilidade inicial, sendo estatisticamente inferior a todos os outros tratamentos. Este resultado é esperado, pois a ausência de cobertura vegetal e de práticas de manejo que promovam a melhoria da estrutura do solo leva à degradação estrutural e à compactação, resultando numa rede porosa pouco conectada e, conseqüentemente, numa Ki muito baixa (MONTGOMERY, 2007). A baixa Ki no controle, combinada com a baixa macroporosidade, indica um solo com alta propensão ao escoamento superficial e à erosão, reforçando a importância da intervenção humana para a conservação do solo.

A Figura 26 mostra uma variação nos valores de permeabilidade final entre os tratamentos e seus níveis, variando de aproximadamente 2.2 cm/h no Controle até mais de 10 cm/h em alguns tratamentos com cobertura vegetal.

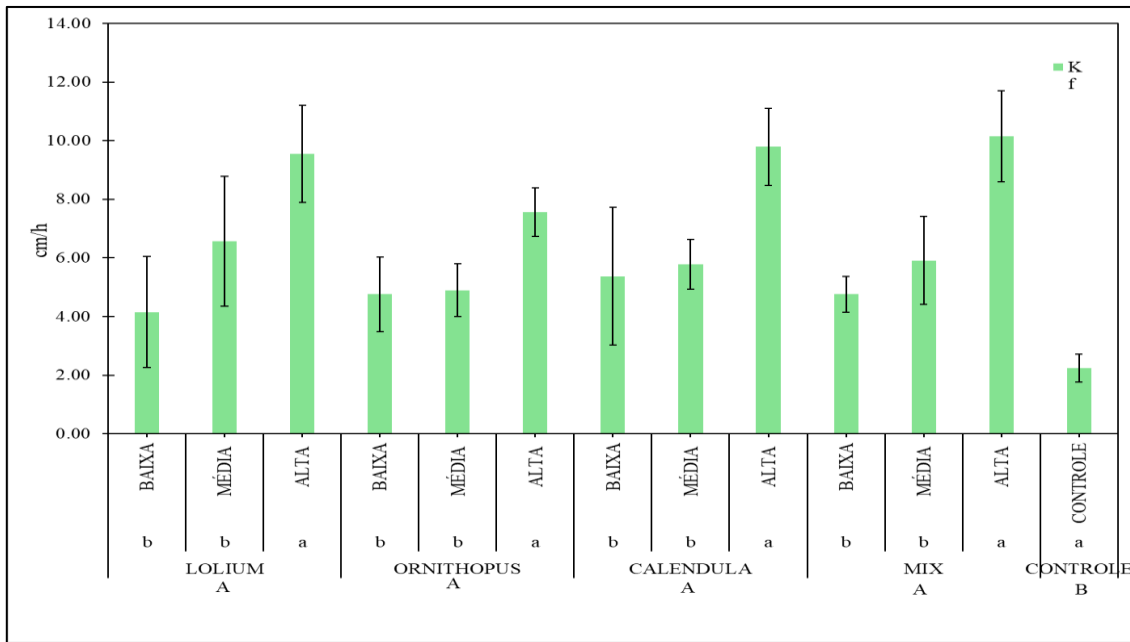


Figura 26 - Condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) final dos diferentes tratamentos sob distintas densidades de cobertura vegetal. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

O tratamento com *Lolium* (azevém) demonstra uma das maiores permeabilidades finais, com valores que atingem cerca de 9.7 cm/h em ALTA. Indicando que é superior ao Controle e comparável aos outros tratamentos com cobertura vegetal.

O *Ornithopus*, assim como o *Lolium*, *Calêndula* e *Mix*, apresenta valores de  $K_f$  que chegam a aproximadamente 7.5 cm/h em ALTA. Isso sugere que esta espécie também contribui efetivamente para a melhoria da estrutura do solo e da condutividade hidráulica em condições de saturação.

A *Calêndula*, com valores de  $K_f$  que alcançam cerca de 9.8 cm/h em ALTA, reforça a eficácia da *Calêndula* na melhoria das propriedades hídricas do solo, não apenas na retenção de água (conforme análise anterior), mas também na sua capacidade de condução em saturação.

O tratamento *Mix*, que atingindo mais de 10 cm/h em ALTA devido a diversidade de espécies pode levar a uma exploração mais eficiente do volume do solo, com diferentes sistemas radiculares contribuindo para a formação de poros e a estabilização de agregados, resultando em uma  $K_f$  elevada e comparável aos tratamentos de espécie única.

O tratamento Controle, apresenta os menores valores de permeabilidade final, com aproximadamente 2.2 cm/h. Este resultado é esperado, pois a ausência de cobertura vegetal e de práticas de manejo que promovam a melhoria da estrutura do solo leva a uma degradação da

estrutura e à compactação, resultando em uma rede porosa pouco conectada e, conseqüentemente, em uma Kf muito baixa. A baixa Kf no controle indica um solo com alta propensão à saturação prolongada e à drenagem deficiente.

Na Figura 27 pode-se observar a evolução da permeabilidade ( $K_i \rightarrow K_f$ ). A figura mostra que  $K_i$  (condutividade hidráulica inicial) e  $K_f$  (final) tendem a aumentar com a densidade de cobertura (BAIXA  $\rightarrow$  MÉDIA  $\rightarrow$  ALTA) em todas as espécies, enquanto o CONTROLE apresenta os menores valores – padrão consistente com o papel das coberturas na melhoria da estrutura e no acréscimo de macroporos funcionais (BRADY; WEIL, 2008; BRONICK; LAL, 2005). O *Lolium* (sistema radicular fibroso) e os mixes (maior diversidade radicular) destacam-se em densidades altas, refletindo maior conectividade da rede porosa, sob condições próximas da saturação (CHEN; WEIL, 2011; SNAPP et al., 2005). Em contraste, o CONTROLE mantém  $K_i$  muito baixa, coerente com estrutura degradada/compactada e macroporosidade limitada, o que favorece escoamento superficial e risco de erosão (LAL, 2006; WISCHMEIER; SMITH, 1978; MONTGOMERY, 2007).

Em vários tratamentos observa-se  $K_f \geq K_i$ , comportamento que contraria a forma clássica de Horton (decréscimo ao longo do tempo), mas é plausível em solos com repelência inicial, selagem superficial reversível ou reativação de bioporos à medida que o perfil se humedece (HILLEL, 2004; LIBARDI, 2005). Esse incremento de condutividade durante o ensaio é compatível com aumento da continuidade de macroporos preenchidos por água e redução de barreiras hidráulicas iniciais (REYNOLDS; GREGORICH; CULLEY, 2002). A elevada variabilidade (barras de erro maiores em alguns tratamentos, p.ex., MIX) é típica de meios porosos com heterogeneidade espacial de bioporos e agregação (DEXTER, 2004; BRONICK; LAL, 2005).

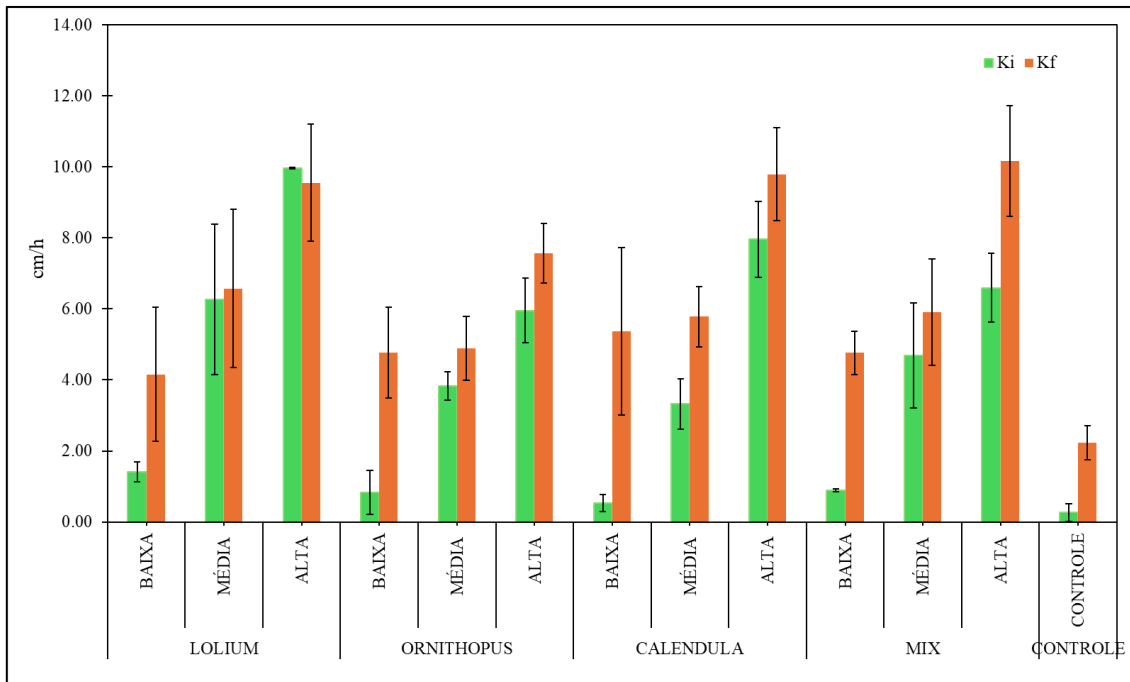


Figura 27 – Condutividade hidráulica inicial (Ki) e final (Kf) nos diferentes tratamentos e níveis de cobertura vegetal.

Do ponto de vista funcional, coberturas – sobretudo densidade ALTA e misturas – tendem a elevar Ki e Kf via formação/estabilização de agregados e incremento de matéria orgânica (SIX et al., 2002), melhorando infiltração, aeração e resiliência hídrica (GRABLE, 1966; PASSIOURA, 2002). Já a condição de CONTROLE (solo descoberto) reforça o cenário de menor condutividade e maior suscetibilidade à erosão, evidenciando o papel conservacionista das coberturas vegetais (WISCHMEIER; SMITH, 1978; MONTGOMERY, 2007).

### 6.13 Cobertura vegetal x Perda de solo

As observações experimentais de perda de solo foram relacionadas à porcentagem de cobertura da superfície. Para cada espécie ajustou-se  $y = y_0 e^{-kx}$ , em que  $y_0$  representa a perda prevista a 0% de cobertura e  $k$  (por ponto percentual de cobertura) mede a rapidez com que a perda decai quando a cobertura aumenta. A qualidade do ajuste é expressa por  $R^2$ . Para interpretação comparativa derivaram-se:

- (i) cobertura para reduzir 50% ( $x_{50} = \ln 2/k$ )
- (ii) cobertura para reduzir 75% ( $x_{75} = \ln 4/k$ );
- (iii) redução esperada ao acrescentar +10 pontos percentuais de cobertura ( $1 - e^{-10k}$ ).

A forma exponencial é consistente com a literatura sobre o fator C (USLE/RUSLE) e com revisões que mostram decréscimos não lineares de erosão com o aumento de cobertura e de resíduos superficiais (RENARD et al., 1997; NRCS, 2008).

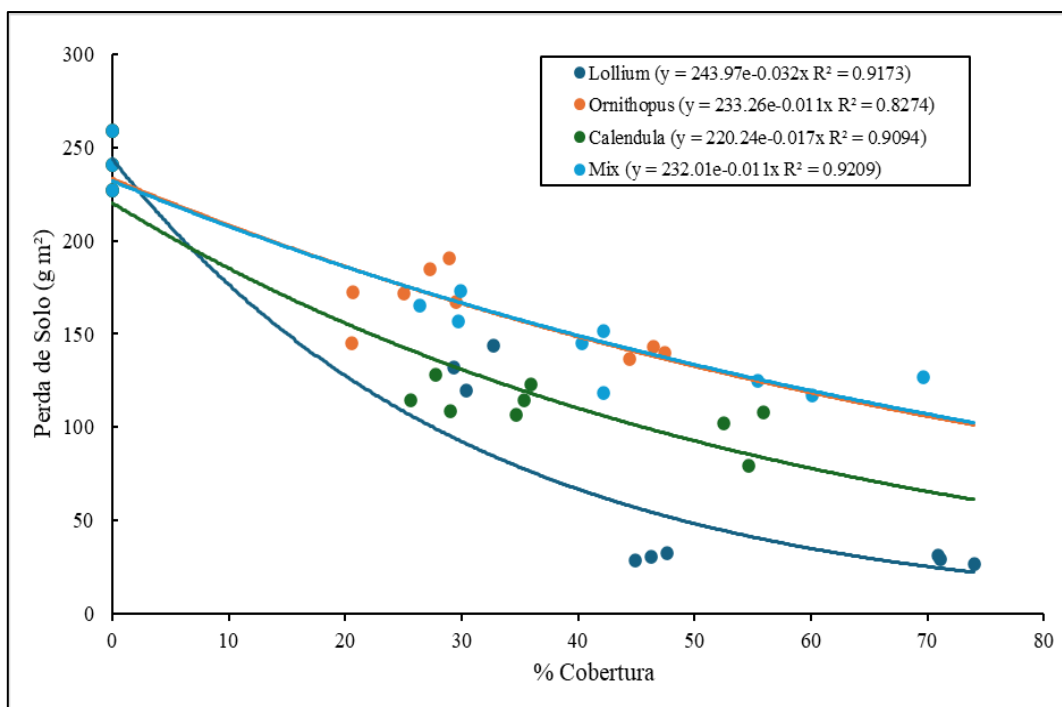


Figura 28 - Influência da cobertura vegetal na redução da perda de solo sob chuva simulada para diferentes espécies de cobertura.

Na Figura 28 exibe quatro curvas exponenciais com alto poder explicativo ( $R^2=0,8274-0,9209$ ). O padrão é inequívoco: pequenos ganhos de cobertura produzem quedas mais que proporcionais de perda. Entre as espécies, *Lolium* apresenta o maior k (0,032), seguido de Calêndula (0,017), Mix e Ornithopus (0,011). Em termos práticos, cada +10 p.p (pontos percentuais) de cobertura reduz a perda esperada em 27,4% (*Lolium*), 15,6% (Calendula), 10,4% (Mix) e (Ornithopus). As coberturas necessárias para metadados operacionais de controle também diferem: para cortar a perda à metade ( $x_{50}$ ), requerem-se 21,7% (*Lolium*), 40,8% (Calendula), 63% (Mix) e (Ornithopus); para 75% de redução ( $x_{75}$ ): 43,3%, 81,5%,  $\approx 126\%$  (ou seja, **não atingível** dentro do intervalo 0–100% de cobertura para estas duas últimas), respectivamente (Tabela 12). Esses números reforçam a prioridade de estabelecer cobertura o quanto antes, pois os primeiros 20–30% geram os maiores retornos (RENARD et al., 1997; NRCS, 2008).

Tabela 12 - Parâmetros do ajuste exponencial e métricas derivadas para a relação Perda de Solo × Cobertura Vegetal (%).

Espécie	$y_0$ (g m <sup>-2</sup> )	$k$ (% cob.)	R <sup>2</sup>	$x_{50}$ (%)	$x_{75}$ (%)	Redução por +10 p.p. (%)
<i>Lolium</i>	244,0	0,032	0,9173	21,7	43,3	27,4
<i>Ornithopus</i>	233,3	0,011	0,8274	60,3	126,0	10,4
<i>Calendula</i>	220,2	0,017	0,9094	40,8	81,5	15,6
Mix	232,0	0,011	0,9209	60,3	126,0	10,4

Nota:  $x_{50}=\ln 2/k$ ;  $x_{75}=\ln 4/k$ ; Redução por +10 p.p.  $100(1-e^{-10k})$ .

A superioridade de *Lolium* (maior  $k$  e menores perdas para a mesma cobertura) é coerente com uma arquitetura de dossel mais contínua e resíduo superficial que atenuam o salpicamento e elevam a rugosidade do escoamento raso; adicionalmente, o enraizamento denso aumenta macroporosidade e estabilidade de agregados, reforçando a resistência ao destacamento (GYSSSELS et al., 2005; VANNOPPEN et al., 2015). *Calendula* e *Mix* ocupam posição intermediária: exigem mais cobertura para atingir as mesmas metas, o que sugere dossel menos contínuo e maior heterogeneidade espacial. *Ornithopus* apresenta o menor  $k$ , indicando que precisa de mais cobertura para alcançar reduções equivalentes—padrão compatível com literatura que destaca a dependência da eficácia à arquitetura do dossel e ao padrão de cobertura (TANG et al., 2021). Em termos de serviço ecossistêmico, a redução de perdas por cobertura vegetal tem co-benefícios para qualidade da água e para o orçamento de carbono, ao mitigar exportação de C particulado e preservar estoques de MOS (LAL, 2004; SARE, 2025).

Em síntese, o conjunto confirma o papel da cobertura vegetal como controle de primeira ordem da erosão em escala de parcela, com ganhos marginais decrescentes bem descritos pelo modelo exponencial. Para manejo, recomenda-se perseguir metas mínimas de 40–60% de cobertura ao longo da estação chuvosa (priorizando gramíneas ou combinações que maximizem o  $k$ ), ciente de que eventos de alta intensidade podem reduzir o benefício relativo da cobertura e demandar estratégias complementares microterraceamento, faixas em contorno, manejo de resíduos (NRCS, 2008; PROSDOCIMI; CERDÀ; TAROLLI, 2016).

As previsões para coberturas de referência (0, 20, 40, 60, 80%) estão na Tabela 13 e mostram, por exemplo, que a 60% de cobertura a Perda de solo previsto é de aproximadamente 35,8 g m<sup>-2</sup> em *Lolium*, 79,4 g m<sup>-2</sup> em *Calêndula*, e 120,6 m<sup>-2</sup> em *Ornithopus* e *Mix*.

Tabela 13 - Perda de solo prevista ( $\text{g m}^{-2}$ ) pelo modelo exponencial  $y0^{-kx}$  em função da cobertura vegetal (%)

	0	20%	40%	60%	80%
<i>Lolium</i>	244,0	128,6	67,8	35,8	18,9
<i>Ornithopus</i>	233,3	187,2	150,2	120,6	96,8
<i>Calendula</i>	220,2	156,8	111,6	79,4	56,6
Mix	232,0	187,2	150,2	120,6	96,8

Modelo usado:  $y = y0^{-kx}$

### 6.14 Cobertura vegetal x Salpicamento

Para a comparação entre a Cobertura de solo e Perda de solo seguiu o mesmo modelo exponencial anteriormente citado ( $y = y0^{-kx}$ ). Onde  $y0$  é a perda por salpicamento prevista a 0% de cobertura e (por ponto percentual, p.p.) representa o decaimento da resposta com o aumento da cobertura. A qualidade de ajuste é expressa por  $R^2$ . Seguindo o exemplo anterior foi feita a comparação para redução de 50% ( $x_{50}$ ), 75% ( $x_{75}$ ) e a redução a cada 10 p.p de cobertura.

A escolha da forma exponencial é consistente com a teoria do **Fator C** (USLE/RUSLE) e com revisões que mostram decréscimos não lineares do salpicamento com cobertura e resíduos (RENARD et al., 1997; NRCS, 2008).

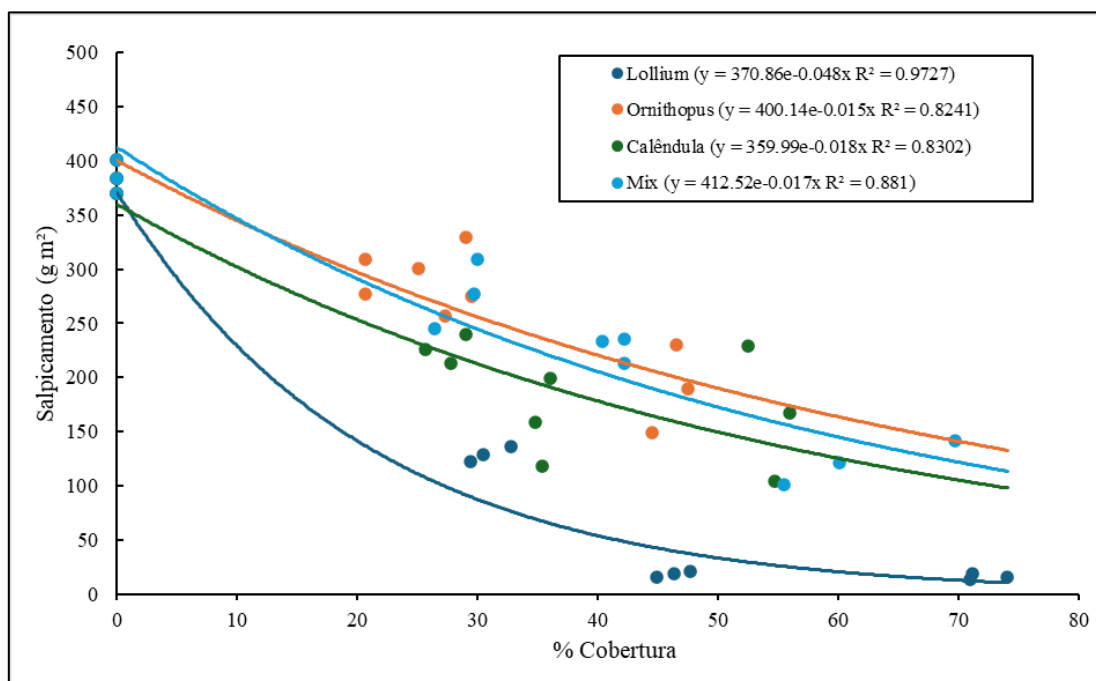


Figura 29 - Ajuste exponencial da relação entre salpicamento do solo ( $\text{g m}^{-2}$ ) e cobertura vegetal (%) para *Lolium*, *Ornithopus*, *Calendula* e Mix

A Figura 29 apresenta curvas ajustadas com bom poder explicativo ( $R^2=0,8302-0,9727$ ). A ordem de  $k$  (indicador de quão rápido a resposta cai com a cobertura) foi: *Lolium* (0,048) > *Calendula* (0,018) > *Mix* (0,017) > *Ornithopus* (0,015). Em termos práticos, +10 p.p. de cobertura reduzem o salpicamento em aproximadamente 38,1% para *Lolium*, 16,5% para *Calêndula*, 15,6 para o *Mix*, e 13,9% para *Ornithopus*. As metas operacionais também divergem: para cortar o salpicamento à metade são necessários aproximadamente 14,4% de cobertura em *Lolium*, 38,5% em *Calêndula*, 40,8% para o *Mix* e 46,2% em *Ornithopus*; para 75% de redução, as metas passam a 28,9%, 77,0% e 81,5–92,4%, respectivamente (Tabela 14).

Tabela 14 - Parâmetros do ajuste exponencial e métricas derivadas para a relação Salpicamento  $\times$  Cobertura Vegetal (%).

Espécie	$y_0$ (g m <sup>-2</sup> )	k (% cob.)	R <sup>2</sup>	x <sub>50</sub> (%)	x <sub>75</sub> (%)	Redução por +10 p.p. (%)
<i>Lolium</i>	370,86	0,048	0,973	14,4	28,9	40,0
<i>Ornithopus</i>	400,14	0,015	0,824	46,2	81,5	14,8
<i>Calêndula</i>	359,99	0,018	0,830	38,5	77,0	16,5
<i>Mix</i>	412,52	0,017	0,881	40,8	92,4	16,5

As previsões para coberturas de referência (0, 20, 40, 60, 80%) estão na Tabela 15 e mostram, por exemplo, que a 60% de cobertura o salpicamento previsto é de aproximadamente 20,8 g m<sup>-2</sup> em *Lolium*,  $\approx 85-106$  g m<sup>-2</sup> em *Calendula* e *Mix*, e  $\approx 120,5$  g m<sup>-2</sup> em *Ornithopus*.

Tabela 15 - Salpicamento previsto (g m<sup>-2</sup>) pelo modelo exponencial  $y_0^{-kx}$  em função da cobertura vegetal (%).

	0	20%	40%	60%	80%
<i>Lolium</i>	370,9	142,0	54,4	20,8	8,0
<i>Ornithopus</i>	400,1	296,4	219,6	162,7	120,5
<i>Calêndula</i>	360,0	251,2	175,2	122,3	85,3
<i>Mix</i>	412,5	293,6	209,0	148,8	105,9

Modelo usado:  $y = y_0^{-kx}$

## 6.15 Cobertura vegetal x Erodibilidade

Seguindo o mesmo modelo exponencial citados anteriormente, na Figura 30 apresenta a relação entre cobertura do solo (%) e perda de solo com Erodibilidade (EROD,  $\text{g m}^{-2}$ ) para as quatro coberturas vegetais.

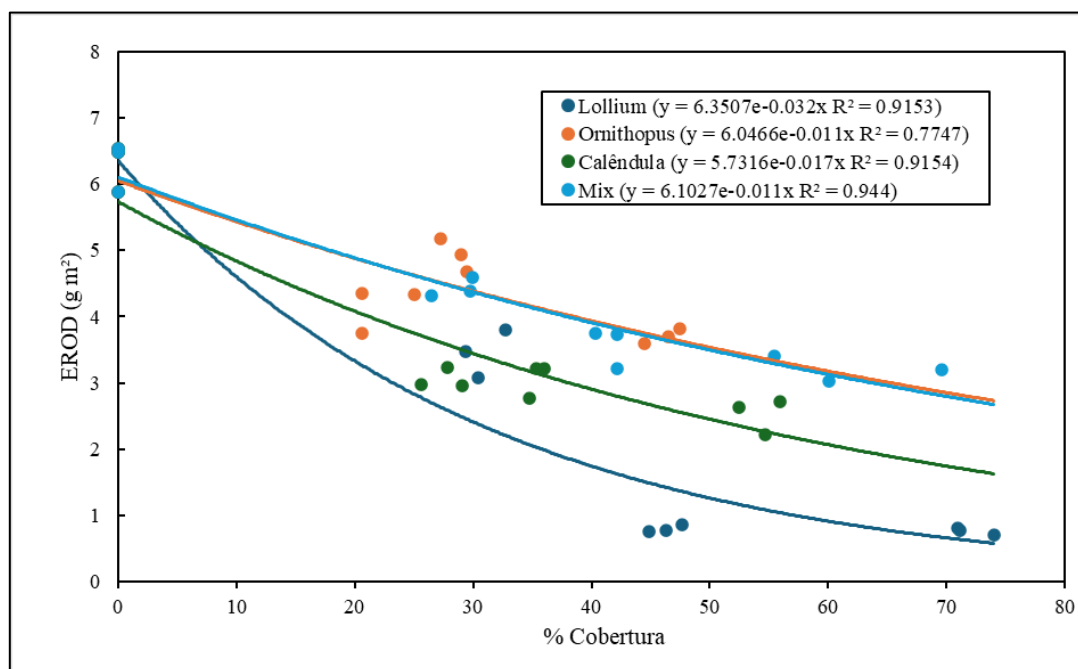


Figura 30 - Ajuste exponencial da relação entre a erodibilidade (EROD,  $\text{g m}^{-2}$ ) e o percentual de cobertura vegetal para *Lolium*, *Ornithopus*, *Calêndula* e *Mix*.

As quatro curvas exibem alto poder explicativo ( $R^2$  entre 0,775 e 0,944), com o padrão inequívoco de forte redução inicial da EROD para pequenos incrementos de cobertura e ganhos marginais decrescentes à medida que a cobertura se aproxima de valores elevados (Tabela 16). Os parâmetros estimados a partir da própria figura são:

Tabela 16 - Parâmetros do ajuste exponencial e métricas derivadas para a relação Erodibilidade  $\times$  Cobertura Vegetal (%).

Espécie	$y_0$ ( $\text{g m}^{-2}$ )	$k$ (% cob.)	$R^2$	$x_{50}$ (%)	$x_{75}$ (%)	Redução por +10 p.p. (%)
<i>Lolium</i>	6,3507	0,032	0,9153	21,7	43,3	27,4
<i>Ornithopus</i>	6,0466	0,011	0,7747	63	126,0	10,4
<i>Calêndula</i>	5,7316	0,017	0,9145	40,8	81,5	15,6
Mix	6,1027	0,011	0,944	63	126,0	10,4

A superioridade de *Lolium* (maior  $k$ , menores EROD para a mesma cobertura) é coerente com:

- (i) Dossel mais contínuo que atenua a energia cinética das gotas (controle de splash).
- (ii) Maior rugosidade superficial e retenção de resíduos, que reduz velocidade e poder de transporte do escoamento raso.
- (iii) Sistema radicular denso que eleva estabilidade de agregados e condutividade/macroporosidade, diminuindo a geração de escoamento (GYSSSELS et al., 2005; VANNOPPEN et al., 2015).

Calêndula ocupa posição intermediária: exige mais cobertura para metas equivalentes, sugerindo descontinuidade do dossel e heterogeneidade espacial das touceiras.

Ornithopus e o Mix) apresentam  $k$  baixo (Tabela 17): mesmo grandes coberturas não alcançam 75% de redução prevista, padrão compatível com literatura que destaca a dependência da eficácia à arquitetura do dossel, altura e distribuição espacial da cobertura (PROSDOCIMI et al., 2016; TANG et al., 2021).

Tabela 17 - Valores estimados de erodibilidade (EROD,  $g\ m^{-2}$ ) em função do aumento percentual da cobertura vegetal para diferentes espécies.

	0	20%	40%	60%	80%
<i>Lolium</i>	6,351	3,349	1,766	0,931	0,491
Ornithopus	6,047	4,853	3,894	3,125	2,508
Calêndula	5,732	4,080	2,904	2,067	1,471
Mix	6,103	4,898	3,930	3,154	2,531

Modelo de ajuste:  $y = y_0 e^{-kx}$ , onde  $y$  representa a erodibilidade (EROD),  $y_0$  é a erodibilidade inicial (sem cobertura) e  $x$  é o percentual de cobertura vegetal.

Para metas rápidas de mitigação, *Lolium* é a aposta mais eficiente: com apenas ~22% de cobertura já se corta a perda à metade; com ~43%, atinge-se 75% de redução. Calêndula requer ~41% (50%) e ~82% (75%). Ornithopus/Mix demandariam coberturas impraticáveis para 75%; nesses casos, combinações com gramíneas, manutenção de resíduos/mulch, faixas em contorno e microterraceamento tornam-se essenciais para enfrentar eventos de alta intensidade (NRCS, 2008; PROSDOCIMI et al., 2016).

Em termos de serviços ecossistêmicos, a redução de EROD preserva estoques de C orgânico e qualidade da água (redução de P e sedimentos finos exportados), com benefícios cumulativos para MOS e produtividade (LAL, 2004).

## 6.16 Cobertura vegetal x Destacabilidade

A resposta exponencial é clássica na literatura do fator C (USLE/RUSLE) e em revisões sobre controle de salpicamento e escoamento por dossel e resíduo superficial: reduções iniciais fortes, seguidas de ganhos marginais decrescentes à medida que a cobertura se aproxima de valores altos (RENARD et al., 1997; NRCS, 2008; PROSDOCIMI; CERDÀ; TAROLLI, 2016; KINNELL, 2005; GYSSELS et al., 2005; VANNOPPEN et al., 2015). A Figura 31 mostra a relação entre cobertura do solo (%) e destacabilidade (DEST,  $\text{g m}^{-2}$ ).

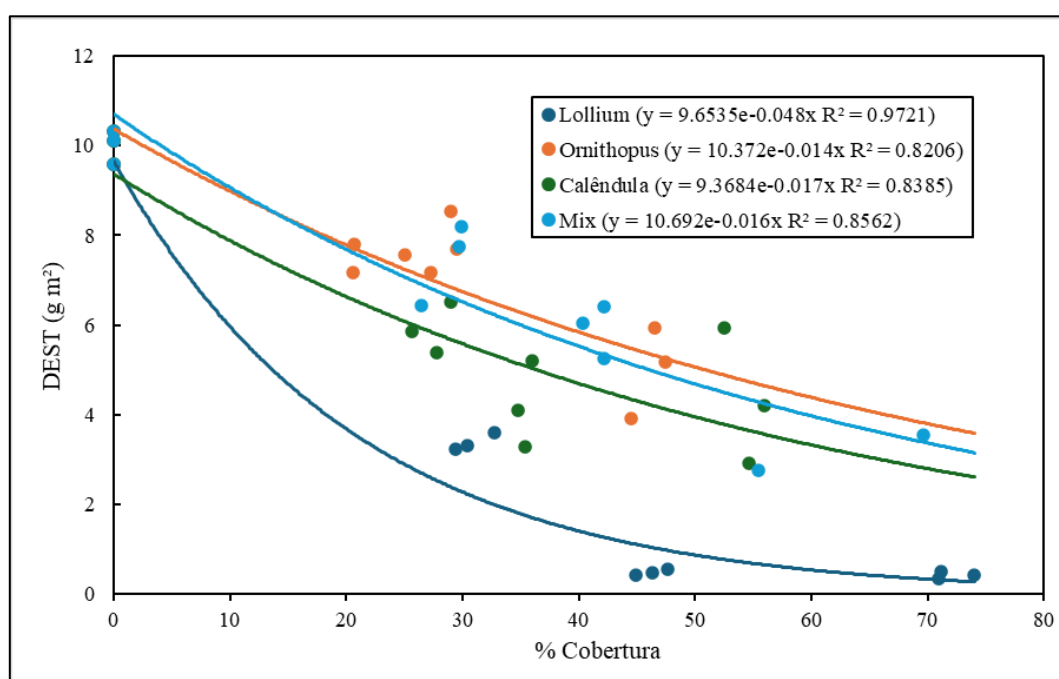


Figura 31 – Ajuste exponencial entre a cobertura vegetal e a destacabilidade do sol (DEST) observada para diferentes espécies em condições controladas de erosão hídrica..

As quatro curvas exibem alto poder explicativo ( $R^2$  entre 0,821 e 0,972), confirmando que a cobertura é um controle de primeira ordem da destacabilidade. Os parâmetros estimados a partir da própria figura são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Parâmetros do ajuste exponencial e métricas derivadas da Destacabilidade do Solo (DEST) em função da cobertura vegetal (%)

Espécie	$y_0$ ( $\text{g m}^{-2}$ )	$k$ (% cob.)	$R^2$	$x_{50}$ (%)	$x_{75}$ (%)	Redução por +10 p.p. (%)
<i>Lolium</i>	9,653	0,048	0,9721	14,4	28,9	38,1
Ornithopus	10,372	0,014	0,8206	49,5	99,0	13,1
Calêndula	9,368	0,017	0,8385	40,8	81,5	15,6
Mix	10,692	0,016	0,8562	43,3	86,6	14,8

A superioridade de *Lolium* (maior  $k$ , menor DEST para a mesma cobertura) é consistente com: intercessão e fragmentação do impacto das gotas por um dossel mais contínuo, reduzindo salpicamento; resíduo superficial e maior rugosidade, que amortecem a lâmina de escoamento e diminuem o poder de transporte (GYSSELS et al., 2005; VANNOPPEN et al., 2015). Calêndula e o Mix ocupam posição intermediária, sugerindo dossel menos contínuo e heterogeneidade espacial; Ornithopus apresenta  $k$  mais baixo e  $R^2$  menor, coerente com maior irregularidade e sensibilidade ao estágio fenológico e à intensidade das chuvas (PROSDOCIMI et al., 2016). Na Tabela 19 é possível observar os valores estimados para diferentes níveis de cobertura através do modelo.

Tabela 19 - Valores estimados da Destacabilidade do Solo (DEST) em diferentes níveis de cobertura vegetal (%).

	0	20%	40%	60%	80%
<i>Lolium</i>	9,7	3,7	1,4	0,5	0,2
Ornithopus	10,4	7,8	5,9	4,5	3,4
Calêndula	9,4	6,7	4,7	3,4	2,4
Mix	10,7	7,8	5,6	4,1	3,0

Modelo de ajuste:  $y = y_0 e^{-kx}$ , onde  $y$  representa a Destacabilidade do Solo (DEST),  $y_0$  é a destacabilidade inicial (sem cobertura) e  $x$  é o percentual de cobertura vegetal.

### 6.17 Densidade aparente x Porosidade

A Figura 32 relação entre a densidade aparente do solo ( $D_{ap}$ ) e os atributos de porosidade evidencia distintos padrões de resposta estrutural. Observa-se que a porosidade total apresentou uma tendência negativa em relação ao aumento da  $D_{ap}$  ( $P (\%) = -0,0956x + 0,6437$ ), ainda que com baixo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,0416$ ), indicando que a variação nesse atributo não é explicada prioritariamente pela densidade, mas por fatores como a organização dos agregados e o teor de matéria orgânica do solo (STOLF; THURLER; BACCHI, 2011).

A microporosidade, por sua vez, apresentou uma relação inversa altamente significativa com a densidade aparente ( $\phi_{micro} (\%) = -0,3824x + 0,9583$ ;  $R^2 = 0,9444$ ). Esse resultado demonstra que o aumento da compactação compromete fortemente os poros de menor diâmetro, os quais são fundamentais para a retenção de água no solo. Tal comportamento é coerente com a

literatura, que associa o incremento da densidade à redução da fração de microporos devido à reorganização da matriz sólida e à perda da estabilidade dos agregados (STOLF; THURLER; BACCHI, 2011).

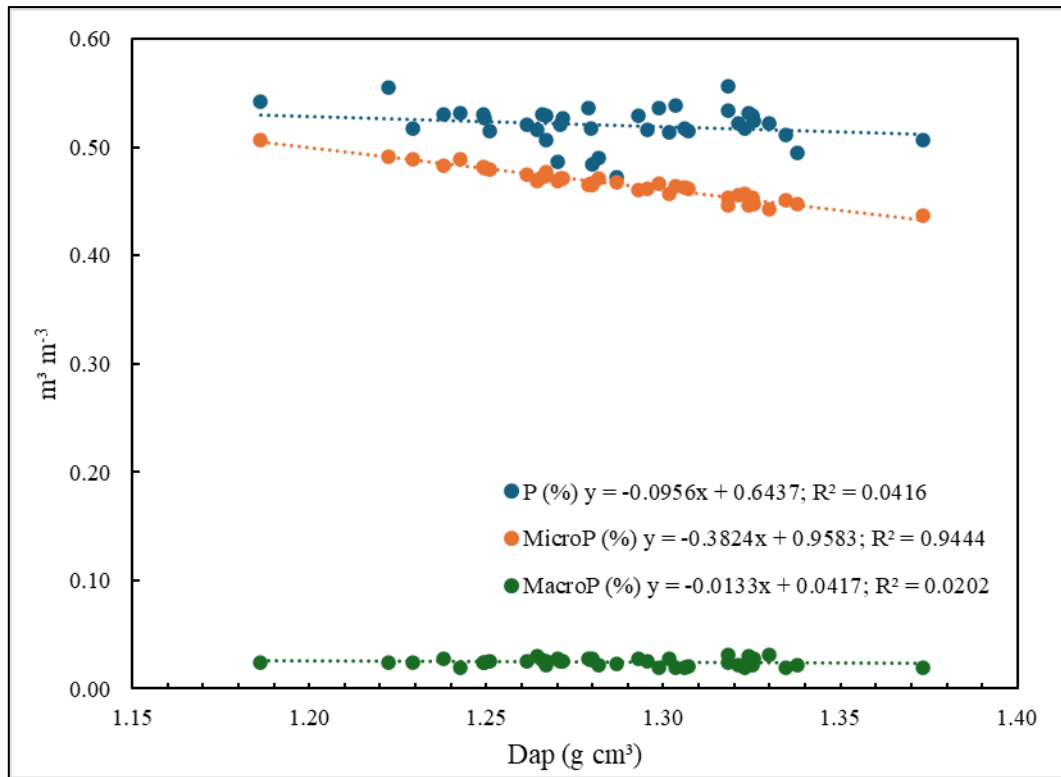


Figura 32 - Relação entre a densidade aparente do solo (*Dap*) e a porosidade total, micro e macroporosidade.

Por outro lado, a macroporosidade manteve-se em valores muito baixos (0,02–0,03), sem relação estatisticamente significativa com a densidade aparente ( $\phi_{\text{macro}} (\%) = -0,0133x + 0,0417$ ;  $R^2 = 0,0202$ ). Esse padrão indica uma condição de degradação estrutural avançada, na qual os macroporos funcionais já foram eliminados e pequenas variações na densidade não se traduzem em alterações detectáveis neste atributo. De acordo com Grable (1966) e Bouma (1991), valores de macroporosidade inferiores a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (10%) limitam severamente a difusão de oxigênio, a aeração e a drenagem do solo, restringindo o crescimento radicular e, conseqüentemente, a produtividade das culturas.

Assim, embora a densidade aparente, isoladamente, não indique níveis críticos em todos os casos, a combinação com as frações de micro e macroporosidade revela limitações físicas severas. A análise conjunta desses atributos demonstra que o solo avaliado apresenta restrições marcantes à aeração e à infiltração, mesmo sob a presença de culturas de cobertura, corroborando a necessidade de se considerar múltiplos indicadores físicos para a avaliação da qualidade estrutural do solo.

## CAPITULO VII

### 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO - ENSAIO SEMEADO

#### 7.1 Estatística – Teste de Normalidade e teste F

Os dados obtidos nas simulações e laboratório foram submetidos a um Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov, onde constatou-se que as séries apresentavam uma distribuição normal.

*Tabela 20 - Resultado do teste de normalidade Kolmogorov (5%), Ensaio – Semeado).*

Parâmetro	p-valor
E (mm)	0.550
Sed susp. (g m <sup>-2</sup> )	0.143
Sed rampa (g m <sup>-2</sup> )	0.249
PS (g m <sup>-2</sup> )	0.154
SP (g m <sup>-2</sup> )	0.373
CE (%)	0.126
CSg (g L <sup>-1</sup> )	0.147
CSss (g L <sup>-1</sup> )	0.317
EROD (g m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	0.110
DEST (g m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	0.537

Nota: valores destacados em negrito não apresentaram normalidade.

Na Tabela 5 é apresentado a síntese da análise de variância ANOVA fator duplo com repetições, a um nível de significância de 5% para o ensaio espontâneo, onde os valores os quais dados pelo teste F e a ANOVA como significantes destacados em negrito.

*Tabela 21 - Valores de p do teste F (ANOVA bifatorial) para o Ensaio Semeado. Efeito fixo: Cobertura (com vs. sem vegetação); Tratamento (espécie × densidade); Interação: Cobertura × Tratamento.*

Parâmetros	p-valor (0.05)		
	Cobertura (A)	Tratamento (B)	Interação
E (mm)	<b>0.025</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
Sed susp. (g m <sup>-2</sup> )	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
Sed rampa (g m <sup>-2</sup> )	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
PS (g m <sup>-2</sup> )	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
SP (g m <sup>-2</sup> )	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
CE (%)	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
CSg (g L <sup>-1</sup> )	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
CSss (g L <sup>-1</sup> )	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
EROD (g m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
DEST (g m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>

## 7.2 Cobertura do solo

Para os resultados obtidos no experimento conduzido com as espécies semeadas pelos agricultores de Trás-os-Montes, a Figura 33 apresenta o percentual de cobertura do solo determinado semanalmente para cada tratamento. Observa-se que o alcance das coberturas desejadas ocorreu em um intervalo de tempo mais curto em comparação ao primeiro ensaio. No entanto, após a avaliação realizada em 22/05/2025, verificou-se uma estabilização no percentual de cobertura para os tratamentos de Baixa e Média densidades. Nesse momento, tornou-se necessária a intervenção no número de plantas nos tabuleiros correspondentes a esses tratamentos, uma vez que as condições térmicas favoráveis promoveram um crescimento acelerado das plantas, ultrapassando os percentuais de cobertura inicialmente estabelecidos para representar cada tratamento nas simulações de chuva. Por outro lado, o tratamento referente à Alta densidade ainda não havia atingido o valor desejado de cobertura para o mesmo período.

Em comparação com o primeiro ensaio, observa-se um crescimento mais gradual da cobertura vegetal, com incremento expressivo apenas próximo à data da simulação, o que reflete um estabelecimento mais lento das plantas, condicionado por temperaturas mais baixas e menor fotoperíodo, características típicas de um ciclo de outono-inverno. Já no segundo ensaio, o aumento da cobertura foi mais rápido desde as primeiras semanas, evidenciando condições ambientais mais favoráveis ao crescimento das culturas, como temperaturas mais elevadas e maior disponibilidade de radiação solar, próprias de um ciclo primavera-verão. Além disso, a Figura 33 revela valores máximos de cobertura mais elevados e homogêneos entre as espécies no segundo

ciclo, sugerindo melhor desempenho vegetativo e maior competição por espaço em relação ao primeiro experimento.

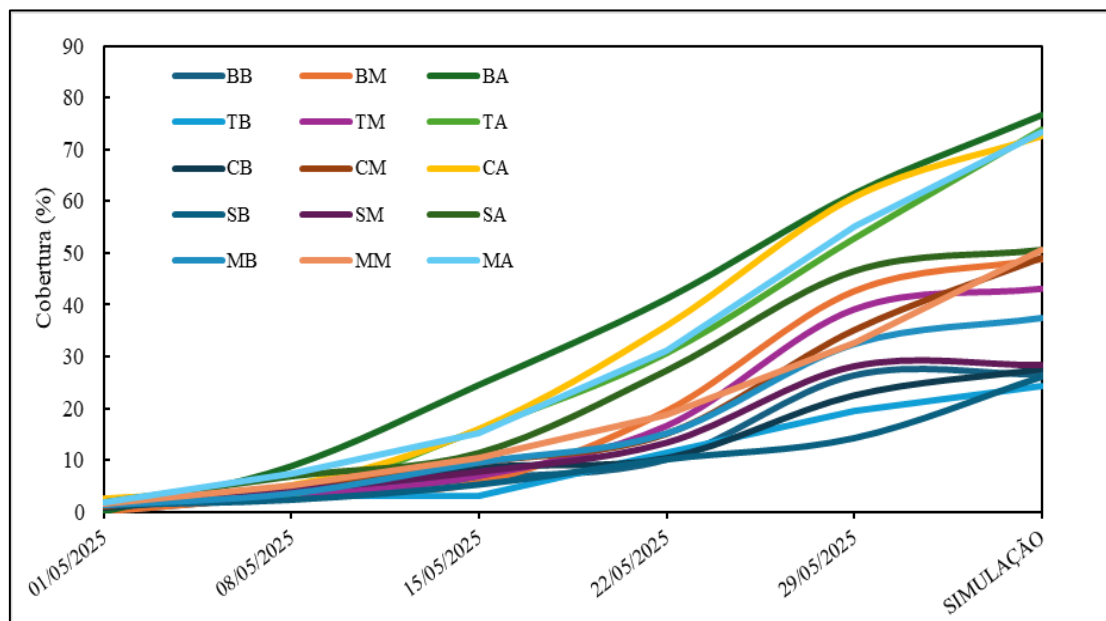


Figura 33 - Evolução da cobertura vegetal (%) ao longo do período experimental no segundo ensaio, para as espécies *Brachypodium distachyon*, *Trifolium subterraneum*, *Centaurea cyanus*, *Silene gallica* e o tratamento Mix, sob diferentes densidades de semeadura (baixa – B, média – M, alta – A)..

De modo geral, as curvas indicam que os tratamentos de Alta densidade (A) — representados pelas linhas de tonalidades mais intensas — atingiram os maiores percentuais de cobertura do solo, superando 70% em alguns casos. Isso confirma a influência positiva da densidade de semeadura sobre a taxa de fechamento do dossel e a consequente cobertura superficial, em consonância com a literatura que associa maiores densidades à redução do espaço entre plantas e à interceptação mais eficiente da radiação solar.

O comportamento das curvas demonstra, portanto, que o desenvolvimento das coberturas foi fortemente condicionado pelas condições ambientais e pela densidade de semeadura, com respostas diferenciadas entre as espécies. O ciclo mais recente (primavera-verão) proporcionou um crescimento mais rápido e uniforme entre os tratamentos, ao contrário do ciclo anterior (outono-inverno), no qual o avanço da cobertura foi mais lento. Esses resultados evidenciam que o manejo adequado da densidade e o ajuste do calendário de semeadura são determinantes para o sucesso das coberturas vegetais como estratégia de conservação do solo.

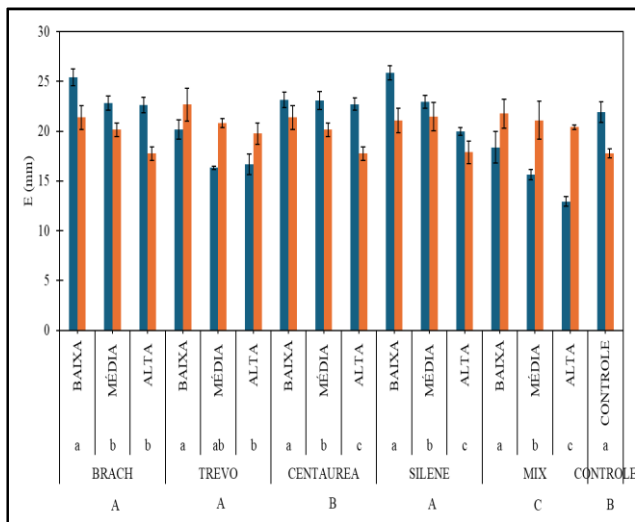


Figura 34- Escoamento médio (E, mm) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de sementeira no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

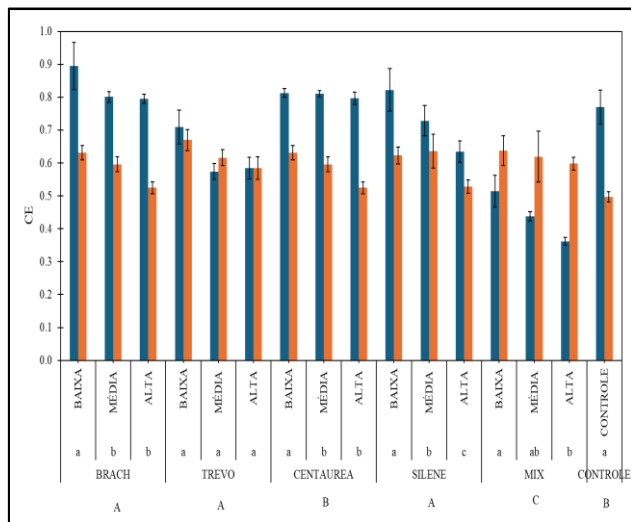


Figura 35 – Coeficiente de escoamento (CE) médio da água sob diferentes coberturas vegetais e densidades de sementeira no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

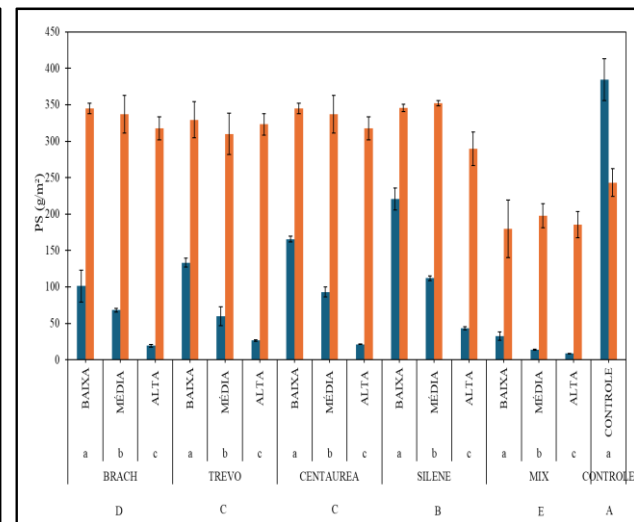


Figura 36 - Perda de solo (PS) média sob diferentes coberturas vegetais e densidades de sementeira no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

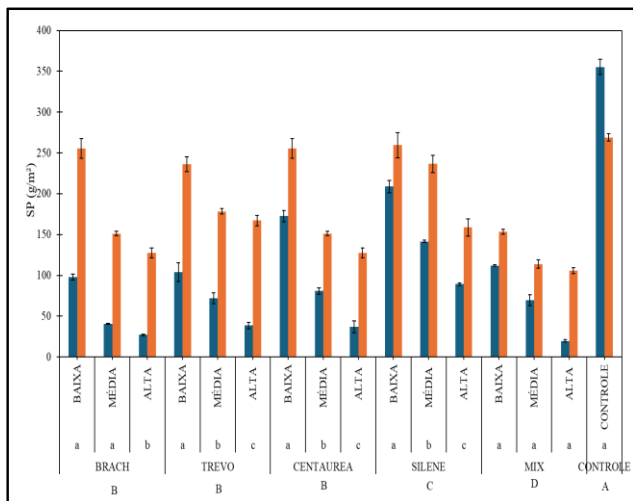


Figura 37- Salpicamento (SP) médio sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

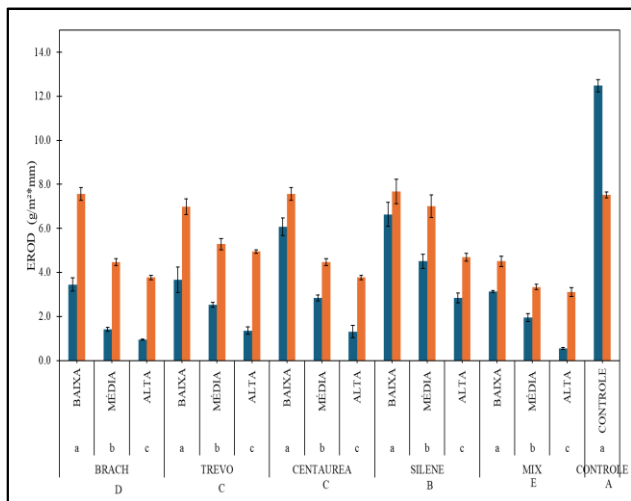


Figura 38 -Erodibilidade (EROD,  $g m^{-2} mm^{-1}$ ) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

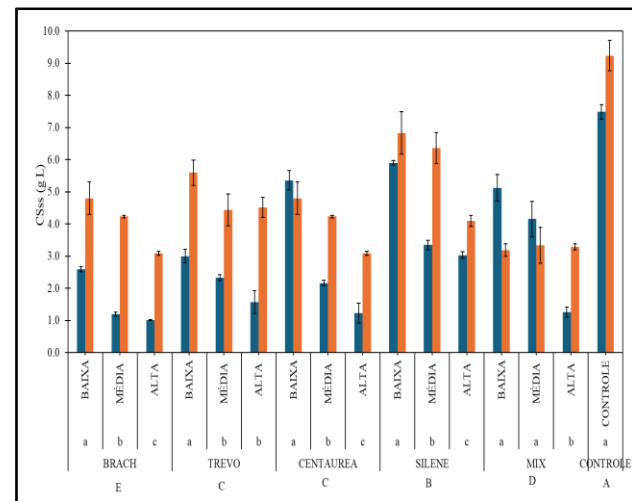


Figura 39 - Concentração de sedimentos em suspensão (CSss,  $g L^{-1}$ ) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

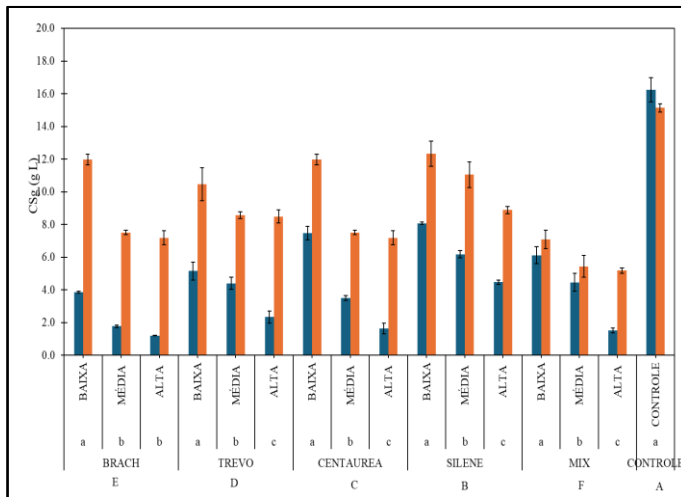


Figura 40 - Concentração global de sedimentos ( $CSg, g L^{-1}$ ) sob diferentes coberturas vegetais e intensidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

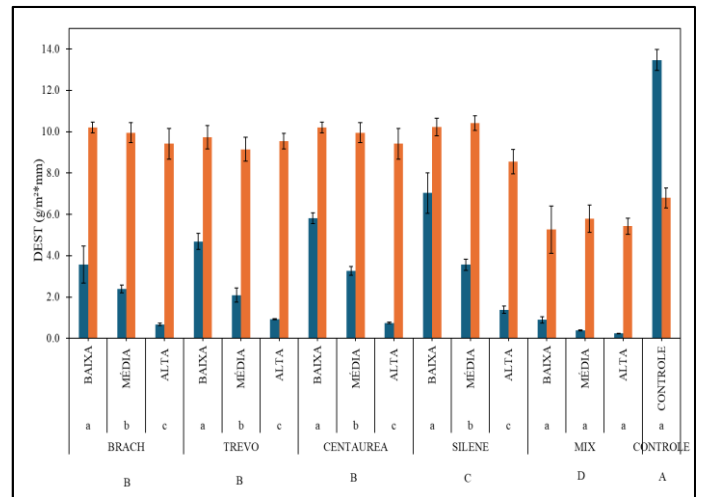


Figura 41 - Destacabilidade de solo ( $DEST, g m^{-2} mm^{-1}$ ) sob diferentes coberturas vegetais e intensidades de semeadura no segundo ensaio. Em cada tratamento, a primeira coluna corresponde à 1ª simulação e a segunda coluna à 2ª simulação. Letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre simulações dentro de um mesmo tratamento, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

### 7.3 Intensidade de Precipitação

A intensidade e precipitação para o segundo ensaio foram condizentes com o do primeiro ensaio, seguindo a mesma metodologia e parâmetros.

### 7.4 Escoamento e Coeficiente de escoamento

A Figura 34 evidencia um padrão mais pronunciado de distinção entre as condições com e sem vegetação, sobretudo nas espécies *Brach*, *Centaurea*, *Silene* e *Mix*, nas quais os valores de E (mm) são significativamente menores quando há cobertura vegetal. Essa diferença sugere que o conjunto de espécies do segundo experimento apresenta maior capacidade de interceptação da chuva, dissipação da energia cinética das gotas e aumento da rugosidade superficial — mecanismos amplamente descritos por Morgan (2005) e Gyssels et al. (2005) como determinantes na redução da erosão hídrica. Além disso, a presença de raízes mais profundas e estruturas vegetais perenes pode ter promovido maior coesão entre as partículas do solo, reduzindo a mobilização de sedimentos e o escoamento superficial. O agrupamento estatístico das espécies (A, B, C) reforça a hipótese de que a funcionalidade ecológica da cobertura vegetal — especialmente em misturas e espécies com morfologia diversa — desempenha papel sinérgico na estabilização física do solo.

Quando comparado a Figura 11 observa-se que o segundo ensaio apresenta uma resposta mais consistente e marcada ao fator vegetação. No primeiro ensaio, a diferença entre os tratamentos é mais tênue, sugerindo que as espécies *Lolium*, Calêndula e *Ornithopus* possuem efeito menos expressivo na mitigação do escoamento, possivelmente por apresentarem sistemas radiculares mais superficiais e menor densidade de biomassa. Assim, o segundo conjunto de espécies demonstra uma eficiência ecológica superior na regulação hidrológica do solo, evidenciando que não apenas a presença da vegetação, mas sua qualidade funcional e diversidade estrutural, é determinante no controle da perda de água e sedimentos. Esse contraste reforça o princípio defendido por Tilman et al. (1997) e De Baets et al. (2006): comunidades vegetais com maior diversidade funcional exibem maior resiliência e eficácia nos processos ecossistêmicos de estabilização do solo.

A Figura 35, em comparação a Figura 12, revela uma maior eficiência da vegetação em manter elevados os valores de CE, indicando melhor capacidade de infiltração e menor escoamento superficial nas espécies avaliadas (*Brach*, *Centaurea*, *Silene* e *Mix*). Essa superioridade funcional é coerente com os resultados previamente discutidos para a variável  $E$  (mm), reforçando que essas espécies, ou suas combinações, proporcionam um controle hidrológico mais efetivo. Na Figura 12, as diferenças entre os tratamentos com e sem vegetação são menos expressivas, sugerindo que espécies como *Lolium* e Calêndula possuem menor impacto na condutividade efetiva, possivelmente devido a sistemas radiculares menos densos e menor cobertura superficial. Assim, o primeiro conjunto de espécies evidencia um desempenho hidrológico mais robusto e estável, alinhando-se ao princípio de que a complexidade funcional e a diversidade estrutural da vegetação ampliam a capacidade do solo em regular fluxos hídricos, conforme discutido por Gyssels et al. (2005) e Tilman et al. (1997).

### **7.5 Concentração de Sedimentos global e Concentração de Sedimentos em suspensão**

Ao contrário do primeiro ensaio, o controle do segundo ensaio (Figura 40), apresenta, de forma robusta e esperada, os valores de CSg mais elevados de todo o estudo, atingindo aproximadamente  $22 \text{ g L}^{-1}$  na ausência de vegetação e  $12,5 \text{ g L}^{-1}$  na segunda bateria de simulação. Este resultado é crucial, pois estabelece uma linha de base validada que quantifica o cenário de maior perda, permitindo aferir com maior confiança a eficácia dos restantes tratamentos. Fica assim demonstrado que todas as coberturas vegetais semeadas (B, BC, C e D) foram significativamente eficazes na redução das perdas de CSg quando comparadas com a parcela de Controle. Esta conclusão alinha-se com a literatura focada na gestão de solo, que identifica o uso de coberturas vegetais como uma prática fundamental para reduzir drasticamente o escoamento superficial e a erosão em sistemas agrícolas, como olivais ou vinhas (Gómez et al., 2009).

A Figura 39 revela um cenário substancialmente mais complexo e, por vezes, contraditório. Embora o tratamento CONTROLE (A) funcione como uma linha de base robusta, apresentando os valores mais elevados de CSss (aprox. 9,1 g L<sup>-1</sup> para a condição “1ª Simulação”), o comportamento das espécies vegetadas não é uniforme. Em particular, os tratamentos Centaurea (C) e Mix (D), sobretudo nas condições BAIXA e MÉDIA, apresentam resultados inesperados, nos quais as parcelas COM VEGETAÇÃO (barras azuis) registaram concentrações de sedimentos superiores às parcelas SEM VEGETAÇÃO (barras laranja).

Esta inversão sugere que, para estas espécies específicas e nas condições testadas, a cobertura vegetal não atuou como barreira eficaz ao transporte de sedimentos. Existem vários mecanismos que podem explicar este fenómeno. Primeiro, a estrutura morfológica das plantas pode ter aumentado a turbulência do escoamento superficial, concentrando a água em microcanais entre tufo ou lacunas na cobertura, o que facilita o arrastamento de partículas, especialmente quando a densidade da vegetação ainda é reduzida ou heterogênea. Segundo sistemas radiculares pouco desenvolvidos ou superficiais podem não ter proporcionado resistência suficiente ao cisalhamento, permitindo que o solo fosse mobilizado apesar da presença de vegetação. Por fim, em espécies como Centaurea, a deposição de material orgânico particulado (folhas, fragmentos ou raízes finas destacadas) pode ter contribuído para o aumento aparente dos sólidos suspensos, interferindo nas medições gravimétricas.

A literatura reconhece esta variabilidade, mostrando que a eficácia da vegetação no controlo da erosão depende fortemente do tipo de planta, da densidade da cobertura, da arquitetura radicular, do estágio de crescimento e da interação com as propriedades físico-hídricas do solo (Gyssels et al., 2005). Assim, estes resultados não invalidam o papel estabilizador da vegetação, mas evidenciam que nem todas as espécies respondem da mesma forma e que coberturas iniciais ou descontínuas podem, temporariamente, não reduzir até aumentar a mobilização de sedimentos.

## **7.6 Perda de solo e Erodibilidade.**

Os tratamentos envolvendo *Lolium*, Calêndula, Ornithopus e o Mix (Ensaio Espontâneo) apresentaram uma diferença menos acentuada entre as condições com vegetação e sem vegetação na variável PS (g m<sup>-2</sup>). Em todos estes tratamentos, a presença de plantas reduziu a perda de solo, mas apenas de forma moderada, indicando que estas espécies exerceram capacidade limitada de reforço superficial e estabilização do solo. Essa resposta contrasta com os tratamentos do Ensaio Semeado (*Brachypodium*, Trevo, *Centaurea*, *Silene* e o Mix correspondente), nos quais a vegetação promoveu uma redução muito mais expressiva da perda de solo, evidenciando maior eficiência antierosiva (Figura 36).

Na prática, isso significa que o primeiro conjunto de espécies (*Lolium*, *Calêndula*, *Ornithopus* e *Mix*) apresentou maior perda de solo, quando comparado ao segundo conjunto. A diferença entre os dois ensaios sugere que a eficácia no controle da erosão não depende apenas da presença de vegetação, mas sim das características morfofuncionais das espécies, sobretudo da densidade, profundidade e arquitetura do sistema radicular, atributos fundamentais para o reforço mecânico da matriz do solo, aumento da infiltração e dissipação da energia cinética das gotas de chuva (WANG et al., 2023; ZHANG et al., 2021).

Enquanto os tratamentos do Ensaio Semeado demonstraram elevado potencial antierosivo, refletido na forte diminuição dos valores de PS nas condições com vegetação, os tratamentos do Ensaio Plantado revelaram uma resposta mais limitada. Nestes, a vegetação atuou parcialmente na redistribuição do escoamento e na infiltração, porém teve menor capacidade de promover coesão superficial, resultando em maior exportação de sedimentos. Assim, a comparação entre os dois grupos reforça que a eficácia da cobertura vegetal depende não apenas da sua presença, mas da diversidade funcional, vigor radicular e capacidade de estabelecer uma malha estrutural resistente à erosão, corroborando evidências recentes que destacam a diversidade funcional como elemento chave na estabilidade estrutural do solo e nos serviços ecossistêmicos associados (CHEN et al., 2024; ZHANG et al., 2021).

Esta conclusão é reforçada pelos resultados obtidos para o conjunto de tratamentos semeados *Brachypodium* (D), *Trevo* (C), *Centaurea* (C), *Silene* (B) e *Mix* (E) (Figura 38). Em todos estes tratamentos, os valores de Erodibilidade (EROD) foram sistematicamente inferiores nas parcelas COM VEGETAÇÃO em comparação às parcelas SEM VEGETAÇÃO, demonstrando de forma clara que a presença de cobertura vegetal reduz consistentemente a suscetibilidade do solo ao destacamento e transporte de partículas. Em outras palavras, estes resultados evidenciam que a vegetação estabelecida a partir de sementeira aumentou de forma significativa a resistência superficial do solo, diminuindo o impacto das gotas de chuva e a energia do escoamento, o que confirma a sua elevada eficácia antierosiva.

O ponto de maior destaque, e que diferencia de forma marcante o Ensaio Espontâneo do Ensaio Semeado, encontra-se no comportamento do tratamento CONTROLE (A). Ao contrário do padrão observado nos demais tratamentos, verifica-se aqui uma inversão da tendência geral: a parcela 1ª Simulação apresentou valor de Erodibilidade muito superior ( $\approx 12,3 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}$ ) ao da parcela 2ª Simulação ( $\approx 7,5 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}$ ). Este resultado é atípico e contrasta tanto com os outros tratamentos do mesmo ensaio quanto com o comportamento do controle, onde a maior erosão ocorreu na condição da 2ª Simulação.

A interpretação mais plausível para esta anomalia relaciona-se às condições físicas do tabuleiro durante as simulações. No tratamento CONTROLE, a primeira simulação mobilizou uma

quantidade elevada de sedimentos na condição da 1ª Simulação, criando um desnível na borda inferior do tabuleiro. Esse rebaixamento formou uma pequena acumulação de solo junto à saída de escoamento, que impediu parte dos sedimentos produzidos na segunda simulação de alcançar a rampa de recolha, conduzindo assim a uma subestimação artificial dos valores de Erodibilidade nesta fase.

A literatura confirma que, apesar da vegetação ser um dos principais fatores de redução da erosão hídrica, a sua eficácia depende não só da sua presença, mas também da densidade, homogeneidade e arquitetura funcional da cobertura (Cerdà et al., 2009). Assim, este desvio observado no tratamento CONTROLE não invalida a tendência geral dos resultados, mas reflete uma limitação experimental associada à redistribuição física do solo no tabuleiro.

### 7.7 Salpicamento e Destacabilidade

A eficácia das coberturas vegetais semeadas: em todos os tratamentos (B, C, D) e para todas as condições (BAIXA, MÉDIA, ALTA), pode ser observada na Figura 37. As parcelas "COM VEGETAÇÃO" (azul) apresentaram valores de salpicamento drasticamente inferiores aos das parcelas "SEM VEGETAÇÃO" (laranja). Este resultado confirma o papel crucial do dossel vegetal na interseção da precipitação, dissipando a energia cinética das gotas antes que estas atinjam e desagreguem a superfície do solo.

O achado mais significativo e complexo, no entanto, reside no comportamento do tratamento CONTROLE (A). Neste caso, ocorre uma inversão total da tendência comparado a Erodibilidade, a parcela "1ª Simulação" (aprox. 360g m<sup>2</sup>) a registar um salpicamento muito superior ao da parcela "2ª Simulação" (aprox. 265 gm<sup>2</sup>). Este fenómeno também foi observado no controle do Ensaio Espontâneo (Figura 18), demonstrando que um solo exposto estar suscetível mesmo após perder a primeira camada de solo, os valores da perda de solo por salpicamento não apresentam o comportamento de diminuição já que o tamanho do tabuleiro não favorece a compensação que há naturalmente em campo, dessa forma as partículas que são destacadas pelo impacto da gota são levadas a estrutura de coleta onde por fim são determinadas a massa assim não subestimando os resultados.

Os tratamentos do Ensaio Semeado, *Brachypodium* (B), *Trevo* (B), *Centaurea* (C), *Silene* (C) e *Mix* (D), apresentaram diferenças expressivas entre as condições com vegetação e sem vegetação na variável DEST, evidenciando uma forte capacidade da cobertura vegetal em reduzir a densidade de erosão do solo (Figura 41). Em todos estes tratamentos, os valores de DEST foram consistentemente elevados e relativamente homogêneos na condição SEM VEGETAÇÃO, enquanto a presença de plantas resultou numa redução substancial da exportação de sedimentos. Este padrão

demonstra que as espécies estabelecidas a partir de sementeira promoveram uma estabilização superficial eficaz, reduzindo de forma marcada a destacabilidade do solo.

Essa resposta sugere que as espécies deste ensaio apresentam uma combinação mais favorável de traços funcionais radiculares (maior densidade e profundidade de raízes finas) e cobertura de dossel (maior interceptação das gotas de chuva), atributos reconhecidamente determinantes para o controlo da erosão (Dahanayake et al., 2024). Assim, ao contrário do que se observou no Ensaio Plantado, no qual a vegetação reduziu a perda de solo apenas de forma moderada, o conjunto de espécies semeadas superou claramente o limiar funcional necessário para alterar significativamente a dinâmica de destacabilidade.

Este padrão é coerente com a literatura, que demonstra que comunidades vegetais com maior diversidade funcional, maior biomassa radicular e maior complexidade estrutural tende a apresentar reduções mais consistentes na erosão hídrica (Zhu et al., 2015; Wu et al., 2020). Resultados semelhantes foram também obtidos por Li et al. (2024), que verificaram reduções significativas da erosão em sistemas restaurados com vegetação estruturalmente complexa, confirmando o papel central da arquitetura radicular e da cobertura do dossel na mitigação da erosão.

Assim, a comparação entre os dois ensaios evidencia que o Ensaio Semeado representa um cenário de controlo erosivo mais eficiente, no qual a vegetação exerceu um efeito antierosivo robusto e consistente. A vegetação deste grupo não apenas reduziu os valores de DEST, como também o fez de forma sistemática entre espécies e intensidades de chuva, demonstrando que comunidades funcionalmente mais diversas e estruturalmente mais densas são fundamentais para a mitigação da erosão hídrica.

Nesta seção são apresentadas as comparações entre as características físicas do solo obtidas no presente ensaio e aquelas observadas no experimento anteriormente descrito. Essa análise comparativa tem como objetivo identificar possíveis semelhanças e divergências nos atributos físicos, como densidade do solo, porosidade e capacidade de retenção de água, buscando compreender de que forma as condições experimentais e o manejo aplicado influenciaram a estrutura e o comportamento físico do solo. A relação entre os dois conjuntos de dados permite uma avaliação mais abrangente do efeito dos tratamentos sobre a qualidade física do solo, contribuindo para consolidar a interpretação dos resultados e ampliar a compreensão dos processos envolvidos.

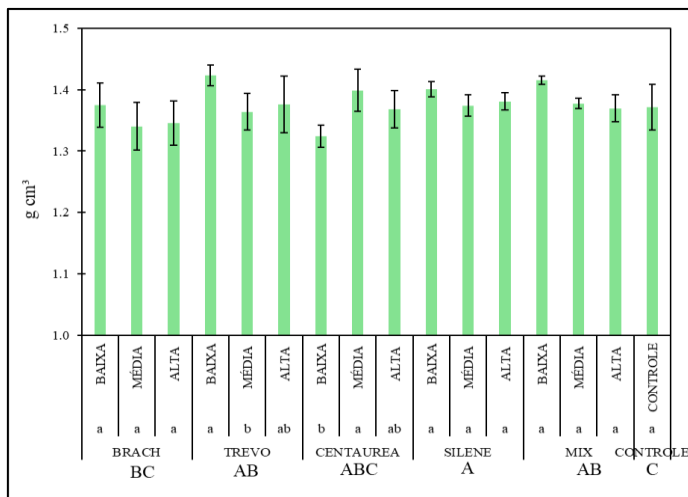


Figura 42 - Densidade aparente do solo (DAP, g cm<sup>-3</sup>) sob diferentes coberturas vegetais e intensidades de semeadura no segundo ensaio. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

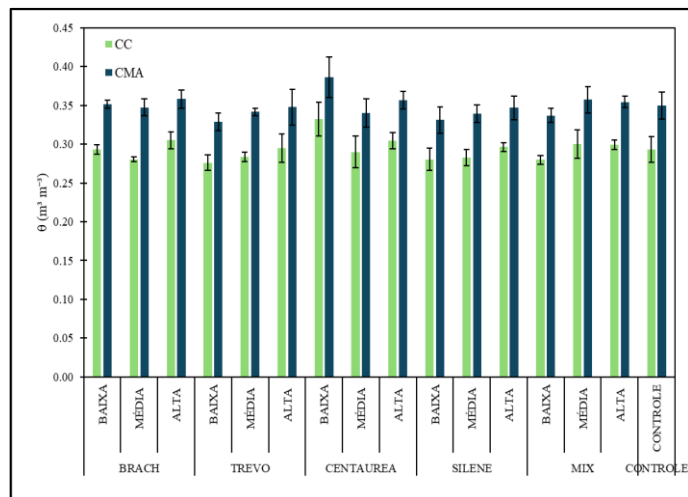


Figura 43 Variação da umidade volumétrica ( $\theta$ ) sob CC e CMA nos tratamentos com diferentes espécies vegetais. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

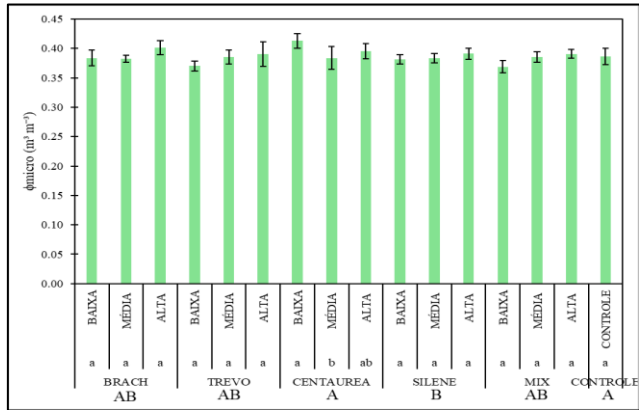


Figura 44 - Microporosidade ( $\phi_{micro}$ ,  $m^3 m^{-3}$ ) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

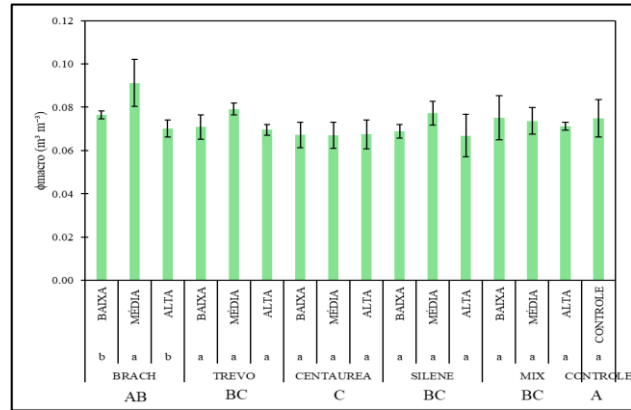


Figura 45- Macroporosidade ( $\phi_{macro}$ ,  $m^3 m^{-3}$ ) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

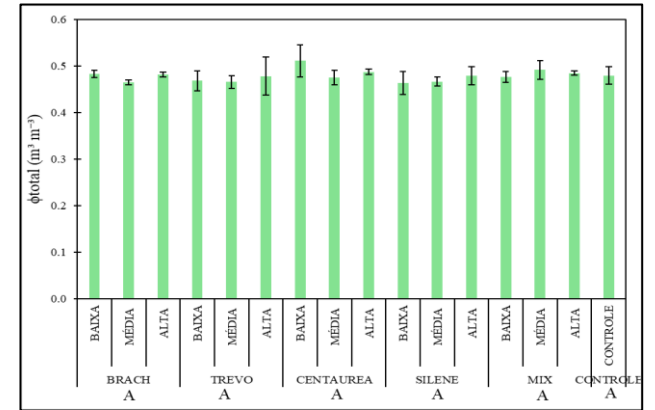


Figura 46 - Porosidade total ( $\phi_{total}$ ,  $m^3 m^{-3}$ ) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

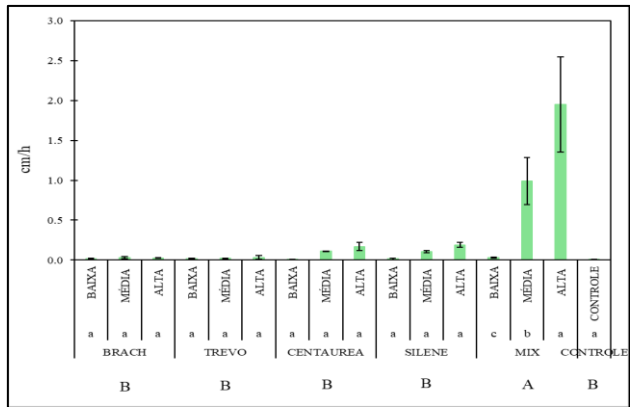


Figura 47 - Condutividade hidráulica do solo saturado inicial ( $K_{sat}$ ,  $cm h^{-1}(K_i)$ ) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

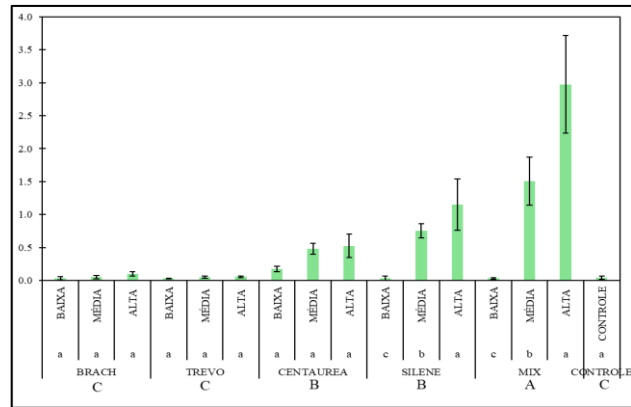


Figura 48 - Condutividade hidráulica do solo saturado final ( $K_{sat}$ ,  $cm h^{-1}(K_f)$ ) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

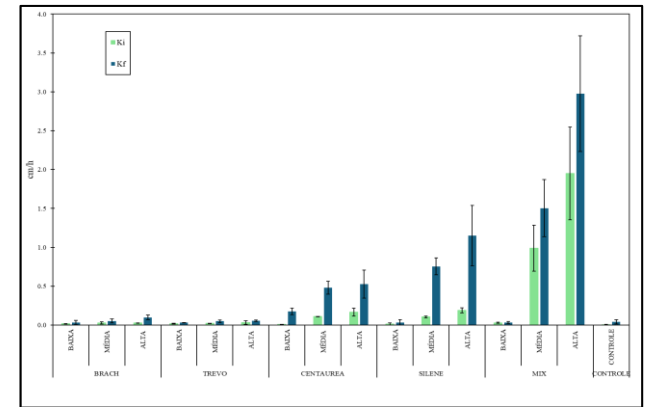


Figura 49 - Condutividade hidráulica inicial ( $K_i$ ) e final ( $K_f$ ) do solo ( $cm h^{-1}$ ) sob diferentes coberturas vegetais e densidades de semeadura no segundo ensaio. Letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos distintos, de acordo com o teste estatístico aplicado. As barras representam o erro padrão da média.

## 7.8 Densidade aparente e Porosidade total

Nos dois ensaios, os valores de densidade aparente (DAP) variaram entre aproximadamente 1,25 e 1,40 g cm<sup>-3</sup>, mas essa amplitude não pode ser interpretada como uma faixa estreita. Pelo contrário, trata-se de uma variação relativamente elevada quando considerada a textura franco-arenosa do solo utilizado (Tabela 1), caracterizado por altos teores de areia (665 g kg<sup>-1</sup>), baixo teor de argila (120 g kg<sup>-1</sup>) e uma proporção expressiva de fragmentos grosseiros (41,2%), que naturalmente conferem baixa coesão e maior porosidade à matriz. Em solos com essas características, valores de DAP tendem a ser menores e mais sensíveis a pequenas alterações estruturais; por isso, diferenças de 0,10–0,15 g cm<sup>-3</sup> podem refletir modificações físicas relevantes.

Ainda assim, os valores obtidos em ambos os ensaios não atingiram níveis considerados críticos para o desenvolvimento vegetal. Mesmo os valores mais elevados (~1,40 g cm<sup>-3</sup>) permanecem abaixo dos limiares de compactação que, segundo a literatura, restringem significativamente o crescimento radicular em solos arenosos e franco-arenosos, geralmente situados acima de 1,55–1,60 g cm<sup>-3</sup> (Hillel, 2004; Jones et al., 2012).

A ligeira elevação da DAP no segundo ensaio (média de 1,37 g cm<sup>-3</sup>, contra 1,29 g cm<sup>-3</sup> no primeiro) pode estar associada ao umedecimento prévio realizado antes das simulações de chuva, processo que favoreceu a reconsolidação natural do solo, reduzindo sua altura no tabuleiro. Essa redução exigiu o complemento do volume de solo, aumentando a massa total contida no tabuleiro e resultando em valores de DAP ligeiramente superiores. Assim, embora a diferença entre os ensaios seja real e fisicamente justificável, ela não comprometeu a funcionalidade estrutural do solo nem interferiu de forma limitante na implantação das espécies vegetais avaliadas.

No segundo ensaio, que inclui *Brachypodium*, *Trevo*, *Centaurea*, *Silene* e Mix, a DAP apresenta comportamento mais homogêneo entre os tratamentos e espécies, com valores médios entre 1,30 e 1,40 g cm<sup>-3</sup> (Figura 42). Essa estabilidade sugere um solo estruturalmente mais consolidado, possivelmente devido à presença de espécies com sistemas radiculares mais agressivos, como a *Centaurea* e *Silene* e ao efeito cumulativo da cobertura vegetal contínua na manutenção dos macroporos e da agregação. A presença de leguminosas, como o *Trevo*, pode ainda ter contribuído para a melhoria da estrutura, via aumento de matéria orgânica e agregação biogênica. Assim, o segundo conjunto de resultados indica uma condição de equilíbrio físico mais avançada, na qual a influência das espécies sobre a compactação é mitigada pela maior estabilidade estrutural do solo, em consonância com os mecanismos descritos por Dexter (2004) e Blanco-Canqui & Ruis (2018), que destacam o papel das coberturas vegetais diversificadas na recuperação e conservação da qualidade física do solo.

Os resultados obtidos nos dois ensaios indicaram valores médios de  $\phi_{total}$  variando entre 0,48 e 0,53  $m^3 m^{-3}$  (Figura 46), faixa considerada adequada para solos de textura média e consistente com o equilíbrio entre os espaços porosos e a massa sólida do solo. Essa constância entre tratamentos e espécies, confirmada pela ausência de diferenças estatísticas significativas ( $p > 0,05$ ), demonstra que o manejo experimental e a cobertura vegetal foram eficazes na preservação da estrutura porosa do solo, prevenindo a ocorrência de compactação ou colapso dos agregados.

A análise da porosidade total ( $\phi_{total}$ ) revela um comportamento estável em ambos os ensaios. No primeiro ensaio, os valores situaram-se aproximadamente entre 0,49 e 0,54  $m^3 m^{-3}$ , com média geral próxima de 0,52  $m^3 m^{-3}$ , apresentando pequenas diferenças entre tratamentos e entre intensidades de chuva. No segundo ensaio, a variação manteve-se igualmente reduzida, com valores entre 0,46 e 0,53  $m^3 m^{-3}$  e média de 0,50  $m^3 m^{-3}$ . Assim, quando se afirma que os valores oscilaram “em torno” de um valor médio, trata-se de variações reais inferiores a 0,05  $m^3 m^{-3}$ , amplitude considerada pequena para solos de textura franco-arenosa, como o utilizado no experimento.

Essa baixa variação indica que a estrutura porosa do solo não sofreu alterações significativas durante o período experimental. A porosidade permaneceu elevada e estável, compatível com as propriedades físicas originais do solo, que inclui altos teores de areia (665  $g kg^{-1}$ ), baixo teor de argila (120  $g kg^{-1}$ ) e expressiva proporção de fragmentos grosseiros (41,2%). Solos com essas características tendem a apresentar elevada porosidade não estruturada e grande estabilidade frente a pequenas perturbações, razão pela qual oscilações inferiores a 0,05  $m^3 m^{-3}$  não representam modificações estruturais relevantes.

A estabilidade observada também reflete a atuação dos diferentes sistemas radiculares presentes nos tratamentos vegetados. Espécies com raízes fasciculadas, como *Lolium* e *Brachypodium*, favorecem a agregação superficial e a formação de bioporos finos por meio da contínua renovação de raízes e da produção de exsudados. Já espécies de raízes pivotantes, como *Centaurea* e *Silene*, contribuem para a criação e manutenção de canais mais profundos e conexões verticais entre poros. Essa combinação de arquiteturas radiculares complementares promoveu a manutenção da proporção entre macro e microporos, permitindo que a estrutura física do solo se mantivesse próxima ao seu estado inicial mesmo após a instalação das plantas e a realização das simulações de chuva.

Dessa forma, os resultados evidenciam que, embora o solo apresente leve reorganização associada ao uso experimental, especialmente no segundo ensaio, tal reorganização não se traduziu em compactação, colapso estrutural ou qualquer alteração que pudesse comprometer o desenvolvimento vegetal ou influenciar de forma significativa os processos erosivos avaliados. A porosidade total permaneceu dentro de um intervalo esperado para solos franco-arenosos, confirmando a estabilidade físico-estrutural do material ao longo dos dois ensaios.

A relação inversa entre  $\phi_{total}$  e DAP é um dos princípios fundamentais da física do solo: à medida que a densidade aparente aumenta, o volume de poros tende a diminuir, refletindo maior compactação e menor espaço disponível para o ar e a água.

Essa relação foi claramente observada, ainda que de forma sutil. O segundo experimento apresentou valores de DAP ligeiramente superiores ( $1,37 \text{ g cm}^{-3}$ ) em comparação ao primeiro ( $1,29 \text{ g cm}^{-3}$ ), o que se refletiu em uma leve redução média da  $\phi_{total}$ , aproximadamente  $0,01$  a  $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Embora essa diferença não tenha sido estatisticamente significativa, ela sugere que pequenas variações na densidade do solo podem afetar discretamente o volume total de poros, especialmente quando associadas a ajustes físicos decorrentes do processo de reconsolidação durante o umedecimento e preparo dos tabuleiros experimentais.

### 7.9 Micro e Macroporosidade

Nos dois ensaios conduzidos, os valores de  $\phi_{micro}$  permaneceram dentro de uma faixa estreita, variando entre  $0,40$  e  $0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , o que caracteriza um solo de textura média e boa capacidade de retenção hídrica. No primeiro ensaio, as médias variaram levemente entre os tratamentos, com ligeiro aumento sob o tratamento de alta densidade de *Lolium* ( $\sim 0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), mas sem diferenças significativas ( $p > 0,05$ ). Já no segundo experimento, os valores apresentaram comportamento ainda mais uniforme, variando entre  $0,38$  e  $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 44), também sem diferenças estatísticas detectáveis. Essa constância demonstra que, apesar das variações naturais entre espécies e densidades, a estrutura interna dos agregados do solo manteve-se estável, refletindo um equilíbrio físico consolidado.

A menor variação observada no segundo experimento pode estar relacionada à melhor organização estrutural do solo após o período de reconsolidação, conforme evidenciado pelos resultados de Densidade aparente e  $\phi_{total}$ , que indicaram ligeira redução da porosidade total, sem comprometer a funcionalidade dos poros menores. Esse comportamento sugere que a reorganização dos agregados e a compactação moderada podem ter redistribuído o volume poroso, reduzindo levemente os macroporos e aumentando a fração de microporos funcionais.

No primeiro ensaio, observou-se uma variação mais restrita, com valores entre  $0,02$  e  $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Essa condição sugere um solo com estrutura estável, mas de menor aeração relativa, possivelmente associada ao estágio inicial de consolidação dos agregados e à menor influência biológica sobre os poros estruturais.

Enquanto no segundo ensaio, mostrou-se mais elevada e heterogênea, com valores de macroporosidade variando entre  $0,06$  e  $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 45), o que representa um incremento médio superior a 100% em relação ao primeiro experimento. Esse aumento reflete a ação cumulativa

das raízes e da bioturbação, que favorecem a reabertura de poros e a reconexão do sistema estrutural. A combinação de espécies com sistemas radiculares, provavelmente contribuiu para esse resultado, uma vez que raízes fibrosas promovem a agregação superficial, enquanto raízes profundas e mais espessas formam canais permanentes que aumentam a continuidade vertical dos macroporos.

Esse incremento pode ser explicado, em grande parte, pelo maior número inicial de plantas emergidas durante o estabelecimento do segundo ensaio. Mesmo após o desbaste, o efeito físico da emergência, associado à penetração inicial de um grande número de raízes finas, permaneceu perceptível na estrutura do solo. Essas raízes efêmeras criaram bioporos e canais de pequeno diâmetro, que, ao se desintegrarem com o tempo, deixaram espaços estruturais que foram posteriormente mantidos e ampliados pelas plantas que permaneceram instaladas. Esse processo de formação e preservação de poros primários e secundários é amplamente descrito na literatura como um dos principais mecanismos de auto-organização estrutural do solo (Dexter, 2004; Horn et al., 2007).

### **7.10 Capacidade máxima de água e Capacidade de campo**

A Figura 43 mostra que a diferença entre os valores de umidade na capacidade de campo (CC) e na condição de máxima absorção (CMA) foi relativamente pequena em todos os tratamentos, com a CC variando aproximadamente entre 0,27 e 0,31 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e a CMA entre 0,33 e 0,37 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Essa proximidade entre os dois parâmetros indica que o solo apresentou baixa perda de água por drenagem gravitacional, refletindo uma estrutura porosa capaz de reter água de forma eficiente após a saturação inicial. Esse comportamento é coerente com os valores de porosidade total e microporosidade, que se mantiveram estáveis entre os tratamentos, sugerindo uma distribuição consistente entre macro e microporos ao longo do experimento.

No primeiro ensaio, verificou-se uma discreta variação entre as espécies, com *Ornithopus* e *Calêndula* apresentando valores ligeiramente superiores tanto de CC ( $\approx 0,30\text{--}0,31\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ ) quanto de CMA ( $\approx 0,36\text{--}0,37\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ ). Essa diferença pode estar associada à presença de sistemas radiculares mais profundos e estruturantes, que tendem a favorecer maior conectividade entre poros e a infiltração de água, contribuindo para uma maior retenção hídrica após a drenagem inicial. As demais espécies, como *Brachypodium*, *Trevo* e *Silene*, apresentaram valores mais homogêneos, com CC em torno de 0,28–0,30 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e CMA entre 0,34–0,36 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, demonstrando comportamento hídrico semelhante.

No segundo ensaio, os valores permaneceram próximos aos observados no primeiro, embora com uma ligeira tendência de aumento na CMA, especialmente nos tratamentos com *Mix* e no Controlo, onde os valores atingiram aproximadamente 0,36–0,37 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Essa tendência acompanha

o aumento marginal da macroporosidade registrado neste ensaio, sugerindo que a maior proporção de poros drenáveis contribuiu para uma absorção inicial mais elevada antes da estabilização na CC. Apesar dessas diferenças, a proximidade entre os valores de CC e CMA ao longo de todos os tratamentos confirma que o solo manteve uma estrutura física estável e funcional, garantindo boa capacidade de infiltração e retenção de água independentemente da espécie presente.

Esse incremento na capacidade máxima de água pode ser explicado pelo efeito estrutural residual do maior número inicial de plantas no segundo experimento. Mesmo após o desbaste, a emergência densa das plântulas gerou uma rede inicial de bioporos e canais e fêmeros que, ao se desintegrarem, contribuíram para a formação de um sistema poroso mais conectado e contínuo. Dessa forma, o solo passou a apresentar maior capacidade de saturação (CMA), sem prejuízo à retenção de água em CC.

A relação entre os valores de CC, CMA e DAP evidencia uma condição de estabilidade funcional do solo. Embora o segundo ensaio tenha apresentado densidade aparente ligeiramente superior ( $1,37 \text{ g cm}^{-3}$ , em comparação a  $1,29 \text{ g cm}^{-3}$  no primeiro), essa diferença não se traduziu em redução da capacidade de retenção de água, uma vez que os valores de CC permaneceram dentro do mesmo intervalo observado anteriormente. Essa resposta indica que o aumento de densidade não resultou em perda de poros efetivos para armazenamento de água, sugerindo que houve reorganização da estrutura interna do solo, com manutenção da proporção entre macro e microporos, mesmo após a reconsolidação decorrente do umedecimento prévio.

Nesse contexto, o “equilíbrio” refere-se justamente à coerência entre os três parâmetros, isto é, ao fato de que um leve aumento da densidade aparente não provocou diminuição correspondente da CC ou da CMA. Em solos franco-arenosos, pequenas variações de DAP podem ser compensadas pela formação e preservação de bioporos criados pelas raízes, bem como pela estabilidade dos agregados superficiais, o que mantém a conectividade porosa necessária para infiltração e retenção hídrica. Assim, a relação observada entre DAP, CC e CMA demonstra que o solo manteve uma condição física resiliente, capaz de absorver pequenas alterações estruturais sem comprometer sua capacidade de armazenamento e redistribuição de água.

### **7.11 Permeabilidade inicial e final**

No primeiro ensaio, os valores de condutividade hidráulica foram mais elevados, variando entre 1 e  $10 \text{ cm h}^{-1}$ , com destaque para os tratamentos de maior densidade de plantas, especialmente *Lolium*, *Ornithopus* e *Calêndula*. Esses resultados indicam uma estrutura do solo mais porosa e bem conectada, caracterizada por uma maior presença de macroporos funcionais, que favoreceram o fluxo de água.

No segundo ensaio (Figura 47), os valores de condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) situaram-se entre 0,1 e 2,0  $\text{cm h}^{-1}$ , refletindo uma permeabilidade substancialmente menor do que aquela observada no primeiro ensaio. Tal redução indica uma menor continuidade dos macroporos responsáveis pela drenagem rápida, sugerindo que o solo se encontrava estruturalmente mais consolidado e com menor capacidade de transmitir água sob condições de saturação. Essa limitação hidráulica é coerente com os valores mais elevados de densidade aparente (DAP) registrados neste ensaio, que atingiram em média 1,37  $\text{g cm}^{-3}$ , em contraste com 1,29  $\text{g cm}^{-3}$  no primeiro. Solos franco-arenosos são particularmente sensíveis a variações de DAP, sobretudo porque sua porosidade depende em grande medida da presença de macroporos formados por raízes e pela atividade da macrofauna. Assim, mesmo diferenças aparentemente pequenas podem exercer impactos relevantes no fluxo de água.

A menor  $K_{sat}$  observada no segundo ensaio reforça a hipótese de que houve redução da atividade biológica estruturante, especialmente da atuação radicular. A presença de plantas em menor densidade e com sistemas radiculares menos desenvolvidos tende a limitar a formação de bioporos contínuos — canais estruturais fundamentais para a percolação da água — além de reduzir a agregação biológica que contribui para a estabilidade dos poros maiores. Estudos clássicos de Hom et al. (1995) e Dexter (2004) demonstram que a compactação, associada à ausência de raízes ativas, provoca o colapso dos macroporos e a desconexão da rede porosa, o que resulta em quedas acentuadas na condutividade hidráulica. Os resultados obtidos aqui estão totalmente alinhados a esses mecanismos: a reconsolidação estrutural, somada à menor exploração radicular, favoreceu a predominância de microporos e poros intermediários, restringindo o fluxo saturado.

Adicionalmente, a maior variabilidade entre tratamentos — com valores mais elevados de  $K_{sat}$  apenas nas espécies com raízes profundas, como *Centaurea*, *Silene* e especialmente o *Mix* — indica que a contribuição das plantas para a manutenção da condutividade ocorreu de forma dependente do tipo de sistema radicular. Espécies dotadas de raízes pivotantes ou altamente ramificadas foram capazes de preservar parte da conectividade porosa vertical, resultando em  $K_{sat}$  moderadamente superior aos demais tratamentos. Essa resposta diferenciada entre espécies evidencia que, em condições estruturais mais restritivas, a eficácia hidrológica da vegetação depende fortemente da arquitetura radicular e da capacidade das plantas em gerar e manter caminhos preferenciais de fluxo — condição essencial para evitar o funcionamento hidráulico dominado exclusivamente pela matriz porosa, característico de solos mais consolidados.

Assim, a comparação entre os dois ensaios revela não apenas diferenças físicas no solo, mas também a interação direta entre estrutura, atividade radicular e funcionamento hidrológico. Enquanto o primeiro ensaio apresentou maior continuidade de macroporos e maior capacidade de transmissão de água, o segundo mostrou um sistema físico mais fechado, dominado por poros menores e por uma

condutividade hidráulica reduzida. Esses resultados reforçam que a presença e o vigor da vegetação desempenham papel central na dinâmica estrutural e hidrológica dos solos mediterrânicos, condicionando sua capacidade de infiltração, drenagem e resiliência frente à compactação.

A análise comparativa mostra que a condutividade hidráulica está inversamente relacionada à densidade aparente, enquanto a porosidade total ( $\phi_{total}$ ) e a microporosidade ( $\phi_{micro}$ ) variaram pouco entre os ensaios, sugerindo que as diferenças ocorreram principalmente na organização interna da estrutura, e não na quantidade total de poros. Assim, o primeiro ensaio representa um solo mais funcional do ponto de vista hidráulico, com maior capacidade de transmissão e infiltração de água, enquanto o segundo ensaio caracteriza um solo estruturalmente mais denso, mesmo possuindo maior percentual de macroporos, os quais podem estar concentrados na camada superficial do solo, devido ao desenvolvimento inicial das plantas, dessa forma não formando poros conectados pelo perfil do solo, consequentemente resultando numa menor condutividade hidráulica inicial.

No primeiro ensaio, apesar dos menores valores de macroporosidade ( $\phi_{macro}$ ), a  $K_{sat}$  foi superior, com médias variando entre 4 e 12  $cm\ h^{-1}$  (Figura 49), especialmente nos tratamentos de maior densidade de plantas e nas espécies *Lolium*, *Calendula* e *Mix*. Esse resultado indica que, embora o volume total de macroporos tenha sido reduzido, houve uma maior continuidade e interconexão dos poros condutores de água, formando canais preferenciais mais funcionais. Esse tipo de resposta é comum em solos onde a estrutura é dominada por bioporos formados por raízes ativas, os quais, mesmo representando pequena fração volumétrica, possuem grande eficiência hidráulica (Jarvis, 2007). Assim, a condutividade elevada reflete mais a qualidade geométrica e conectiva dos poros do que seu volume absoluto (Pagliai & Vignozzi, 2002).

Em contrapartida, o segundo ensaio apresentou maior macroporosidade, porém menores valores de  $K_{sat}$ , situando-se entre 0,1 e 2  $cm\ h^{-1}$ . Essa aparente contradição pode ser explicada pela distribuição espacial dos poros e pela localização dos bioporos gerados pela emergência inicial das plantas. O maior número de plântulas no início do segundo experimento provavelmente promoveu a formação de inúmeros canais radiculares, entretanto, muitos desses bioporos permaneceram restritos às camadas superficiais, não estabelecendo conexão hidráulica efetiva com as porções mais profundas do perfil. Como resultado, houve um aumento do volume de macroporos superficiais, mas sem continuidade vertical suficiente para sustentar fluxos de drenagem intensos. Essa condição é coerente com o padrão descrito por Dexter (2004), no qual solos com porosidade superficial elevada, porém desconectada, exibem condutividade reduzida sob saturação.

A relação inversa entre  $K_{sat}$  e  $\phi_{macro}$  observada entre os ensaios reforça a noção de que a condutividade hidráulica depende mais da conectividade dos poros do que de seu volume total (Hom et al., 1995). Assim, enquanto o primeiro ensaio apresenta um sistema de poros menos abundante,

mas bem conectado e funcional, o segundo demonstra maior volume, porém com poros predominantemente isolados e concentrados na superfície.

A condutividade hidráulica inicial ( $K_i$ ) e final ( $K_f$ ) evidencia a evolução do comportamento de infiltração ao longo do tempo e complementa as interpretações apresentadas anteriormente sobre a estrutura porosa do solo. Nota-se que, em praticamente todos os tratamentos, a  $K_f$  supera a  $K_i$ , indicando uma estabilização positiva do fluxo de água à medida que a infiltração prossegue, reflexo da presença de poros estruturais contínuos e da capacidade de drenagem efetiva do solo. Essa tendência é mais pronunciada nos tratamentos com mistura de espécies (*Mix*) e nos níveis de alta densidade, que exibem os maiores incrementos entre  $K_i$  e  $K_f$ , sugerindo um sistema poroso mais interconectado e hidráulicamente funcional. Já as menores condutividades, observadas em *Brach* e *Trevo*, confirmam a menor continuidade dos poros condutores e reforçam o caráter mais denso do solo nesses tratamentos. Assim, a comparação entre  $K_i$  e  $K_f$ , associada às diferenças entre os dois ensaios, reforça a conclusão de que a eficiência hidráulica do solo depende menos do volume total de macroporos e mais da sua conectividade e persistência estrutural, especialmente quando associada à ação radicular e à distribuição vertical dos bioporos formados pelas plantas.

As Figuras apresentadas abaixo demonstram a relação entre o percentual de cobertura vegetal e diferentes variáveis associadas aos processos erosivos e hidrológicos do solo, incluindo perda de solo, salpicamento, erodibilidade (EROD) e destacabilidade (DEST). Observa-se, de maneira geral, uma tendência decrescente exponencial, indicando que o aumento da cobertura superficial pelas espécies vegetais está diretamente associado à redução das perdas de solo e dos processos de desagregação superficial.

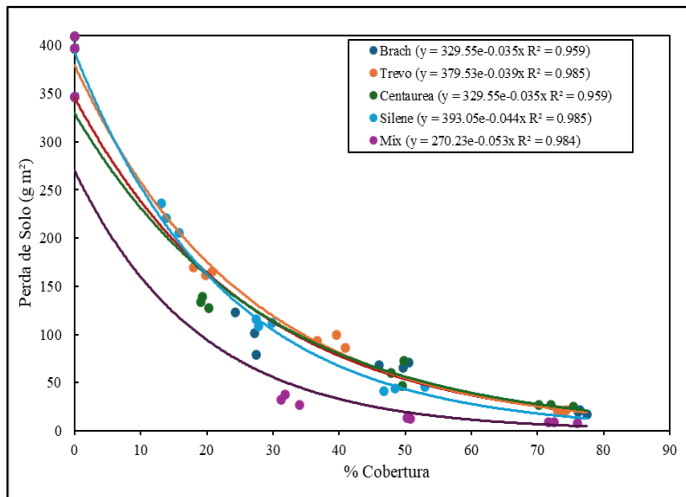


Figura 50 - Relação entre a perda de solo ( $\text{g m}^{-2}$ ) e a cobertura vegetal (%) no segundo ensaio.

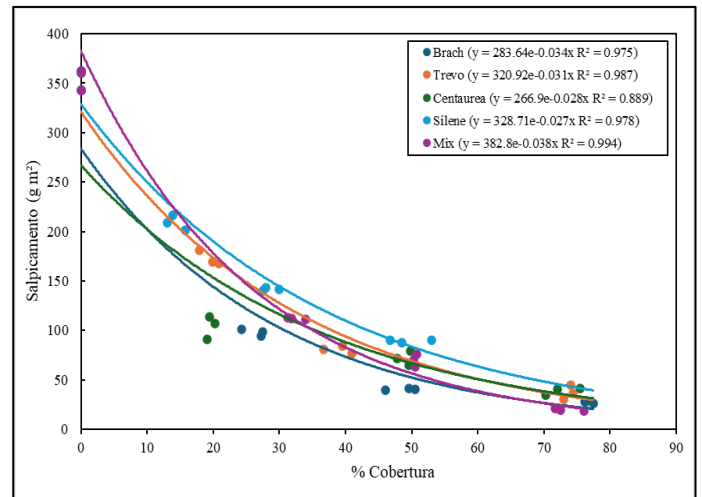


Figura 51 - Relação entre o salpicamento ( $\text{g m}^{-2}$ ) e a cobertura vegetal (%) no segundo ensaio.

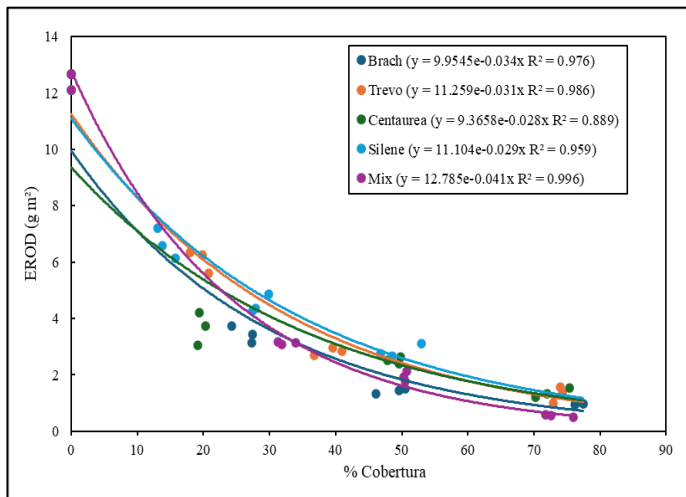


Figura 52 - Relação entre a erodibilidade do solo EROD ( $\text{g m}^{-2}$ ) e a cobertura vegetal (%) no segundo ensaio.

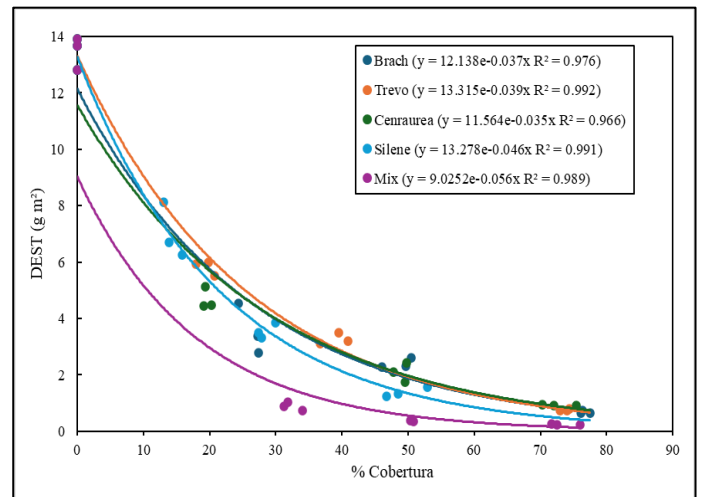


Figura 53 - Relação entre o Destacabilidade do solo DEST ( $\text{g m}^{-2}$ ) e a cobertura vegetal (%) no segundo ensaio.

## 7.12 Cobertura vegetal x Perda de solo

No Figura 50 (com Brach, *Trevo*, Centaurea, Silene e Mix) apresenta os valores de ajuste ( $R^2$ ) mais elevados, todos superiores a 0.95, indicando que o modelo exponencial descreve a relação neste ensaio com uma precisão excepcional. Centrando a análise neste ensaio, é evidente que as condições de erosão inicial (a 0% de cobertura) foram mais severas, com valores de perda de solo a variar entre  $346,54 \text{ g m}^{-2}$  e um máximo de  $409,66 \text{ g m}^{-2}$ . Esta magnitude é consideravelmente superior à observada no segundo ensaio (com *Lolium*, etc.), que partiu de valores basais entre  $220\text{-}244 \text{ g m}^{-2}$ . A descoberta mais significativa deste Figura é a eficácia superior do Mix (E), que apresenta a curva roxa com o decaimento mais acentuado (expoente  $b = -0.053$ ). Isto indica que a mistura de espécies foi a estratégia que promoveu a redução mais rápida da erosão por cada incremento percentual de

cobertura, atingindo perdas de solo muito baixas com níveis de cobertura relativamente moderados (cerca de 50%). Esta eficácia superior do Mix contrasta fortemente com o Mix do primeiro ensaio, que, pelo contrário, apresentou a curva mais plana e a menor eficácia protetora ( $b = -0.011$ ). Esta constatação reforça a ideia de que, embora o aumento da cobertura vegetal reduza invariavelmente a erosão, a composição dessa cobertura é determinante para a taxa dessa redução (Zuazo & Pleguezuelo, 2008).

### 7.3.2 Cobertura vegetal x Salpicamento

Em ambos os ensaios, o aumento da cobertura leva a uma diminuição acentuada do salpicamento, confirmando o papel protetor da vegetação contra o impacto direto das gotas de chuva. Contudo, o segundo ensaio (com Brach, *Trevo*, *Centaurea*, *Silene* e Mix) apresenta esta relação com uma clareza estatística muito superior. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para este ensaio são excepcionalmente elevados, com quatro dos cinco tratamentos a apresentarem  $R^2 > 0.97$  (e o quinto com  $R^2 = 0.889$ ), indicando um ajuste quase perfeito ao modelo exponencial e uma baixa variabilidade dos dados.

Focando a análise na Figura 51 observa-se que todas as espécies testadas demonstraram uma elevada e relativamente similar eficácia na redução do salpicamento, com curvas de decaimento acentuadas (expoentes  $b$  entre  $-0.027$  e  $-0.038$ ). O resultado mais notável é o desempenho superior do Mix (E), que, com um expoente de  $b = -0.038$ , apresentou a curva de decaimento mais rápida, provando ser a cobertura mais eficiente na dissipação da energia da precipitação. Este facto contrasta diretamente com o Mix do primeiro ensaio, que foi uma das coberturas menos eficazes ( $b = -0.017$ ). Esta comparação sublinha que, embora a cobertura vegetal seja o fator dominante, a arquitetura e a composição específica do dossel vegetal são críticas para a eficácia da interceção da chuva e para a redução da erosão por salpicamento (Morgan, 2005).

### 7.13 Cobertura vegetal x Erodibilidade

O segundo ensaio (com Brach, *Trevo*, *Centaurea*, *Silene* e Mix) destaca-se por várias razões cruciais. Primeiramente, a erosão basal é substancialmente mais elevada, situando-se entre  $9,3 \text{ g/m}^2$  e  $12,7 \text{ g/m}^2$  (Figura 52), o que sugere condições de maior erodibilidade do solo ou erosividade da precipitação em comparação com o primeiro ensaio (que partiu de  $5,7-6,3 \text{ g/m}^2$ ). A análise detalhada do segundo ensaio revela não só um ajuste estatístico quase perfeito ao modelo (com a maioria dos  $R^2 > 0.95$ ), mas também um desempenho notável do tratamento Mix (E). A mistura de espécies (curva roxa) demonstrou a relação mais acentuada, com o maior expoente negativo ( $b = -0,041$ ) e o  $R^2$  mais elevado (0.996). Isto indica, inequivocamente, que o Mix foi a cobertura mais eficaz neste ensaio,

proporcionando a redução de erosão mais rápida por cada incremento percentual de cobertura. Este resultado é particularmente significativo pois representa o comportamento oposto ao observado no primeiro ensaio, onde o Mix (com *Lolium*, etc.) foi uma das coberturas menos eficazes ( $b = -0.011$ ). Esta inversão de desempenho entre os dois tipos de Mix sublinha que, embora a cobertura vegetal seja um fator dominante, a composição específica dessa cobertura é um fator crítico que determina a sua eficácia real no controlo da erosão (Gyssels et al., 2005).

#### 7.14 Cobertura vegetal x Destacabilidade

A Figura 53 demonstra uma relação exponencial negativa mais acentuada entre a percentagem de cobertura vegetal e a Destacabilidade do solo (DEST), quando comparado ao primeiro, evidenciando uma eficiência superior das espécies em reduzir o desprendimento e o transporte de partículas à medida que a cobertura aumenta. As altas correlações ( $R^2 > 0,96$  para todas as espécies) indicam que a variação da cobertura vegetal explica quase totalmente o comportamento da erosão, sugerindo forte controle biológico dos processos erosivos. No conjunto de espécies da Figura 53 (especialmente no tratamento Mix) é possível observar o declínio mais expressivo da DEST, indicando que a combinação de espécies funcionalmente diversas exerce efeito sinérgico sobre a estabilidade do solo. Esse resultado corrobora os achados de Zhu et al. (2015), que demonstraram que a diversidade funcional aumenta a eficiência no controle da erosão em ecossistemas restaurados, e de Dahanayake et al. (2024), que destacam a importância dos traços radiculares e da estrutura da copa na redução da energia de impacto das gotas de chuva.

Em contraste o primeiro ensaio, apresenta declives menos pronunciados e coeficientes de determinação ligeiramente menores, o que sugere que as espécies analisadas (*Lolium*, Calêndula, Ornithopus e Mix) possuem menor capacidade de modular a erosão em função da cobertura, provavelmente por apresentarem sistemas radiculares mais rasos e menor densidade de biomassa. Essa diferença entre os dois conjuntos de dados é coerente com observação.

Estudos recentes de Li et al. (2024), que verificaram que a eficiência da restauração vegetal na contenção da erosão está diretamente associada à complexidade estrutural e à diversidade funcional das comunidades. Assim, o comportamento observado no segundo ensaio (Plantas Semeadas) representa um padrão de controle hidrossedimentológico mais eficiente, em que a vegetação alcança um limiar ecológico de cobertura capaz de reduzir substancialmente a Destacabilidade. Um resultado consistente com experimentos de campo que evidenciam o papel determinante das interações entre espécies e traços ecológicos na mitigação de processos erosivos (WU et al., 2020 e DAHANAYAKE et al., 2024).

## CAPITULO VII

O presente estudo permitiu compreender, de forma detalhada e integrada, a influência da cobertura vegetal e das propriedades físicas do solo sobre os processos hidrológicos e erosivos, sob condições controladas de simulação de chuva. Os resultados obtidos evidenciaram o papel central da vegetação na modulação da resposta física e hidráulica do solo, bem como as inter-relações complexas entre as variáveis estruturais, de infiltração e de perda de solo.

De modo geral, as culturas de cobertura analisadas demonstraram elevada eficácia na proteção do solo, confirmando que a presença de vegetação, independentemente da densidade de semeadura, reduz de forma expressiva as perdas de solo e a exportação de sedimentos. Contudo, a magnitude dessa proteção variou entre espécies e ensaios, refletindo diferenças morfofisiológicas, de densidade radicular e de arquitetura do dossel. O *Lolium perenne*, especialmente em alta densidade, destacou-se como a espécie mais eficiente, reduzindo em até 56% a perda de solo em relação às parcelas sem vegetação. Essa superioridade está associada à combinação de um sistema radicular denso e superficial, que estabiliza a camada superficial do solo, e a um dossel fechado, capaz de dissipar a energia cinética das gotas de chuva antes que atinjam o solo.

A mistura de espécies (Mix) também demonstrou desempenho relevante, embora com diferenças marcantes entre os ensaios. No primeiro ensaio (Ensaio Espontâneo), a mistura apresentou a menor eficácia entre os tratamentos, enquanto no segundo ensaio (Ensaio Semeado) foi o sistema mais eficiente, alcançando coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,99 nas relações entre cobertura e erosão. Essa inversão de desempenho evidencia que a eficácia de uma cobertura mista depende fortemente da composição funcional das espécies, da interação entre seus sistemas radiculares e do nível de cobertura alcançado durante o ciclo vegetativo.

Os resultados referentes às propriedades físicas do solo indicaram que, embora a densidade aparente (DAP) tenha variado entre 1,25 e 1,40 g cm<sup>-3</sup>, amplitude considerada significativa para um solo franco-arenoso e estruturalmente sensível como o utilizado neste estudo, esses valores permaneceram abaixo dos limiares críticos de compactação geralmente reportados para essa classe textural ( $\geq 1,55$  g cm<sup>-3</sup>). Assim, mesmo com a tendência de DAP ligeiramente superior no segundo ensaio, possivelmente decorrente da reconsolidação promovida pelos ciclos de umedecimento e secagem, não se observaram alterações funcionais relevantes na dinâmica hídrica do solo. A estabilidade dos valores de capacidade de campo (CC) e capacidade máxima de água (CMA) entre os tratamentos confirma que a reorganização estrutural não comprometeu a proporção de poros efetivos nem a retenção de água, evidenciando uma condição

física resiliente na qual pequenas mudanças na densidade foram absorvidas sem afetar negativamente o comportamento hidráulico do solo.

A relação entre Densidade aparente, Capacidade de campo e Capacidade máxima de água revelou que o aumento moderado da densidade aparente foi compensado por melhorias na agregação e pela manutenção de bioporos criados pelas raízes. Dessa forma, o solo conservou um equilíbrio funcional entre infiltração e retenção hídrica, preservando a disponibilidade de água e a drenagem adequada. Essa observação confirma que a atividade radicular exerce papel estrutural fundamental, promovendo a autorregulação da porosidade e da conectividade interna.

A análise da macroporosidade ( $\phi_{macro}$ ) e microporosidade ( $\phi_{micro}$ ) revelou um padrão característico de solos cultivados sob cobertura: baixos valores absolutos de macroporos ( $0,02-0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), com efeito marcante sobre a condutividade hidráulica. O primeiro ensaio, apesar da menor macroporosidade, apresentou  $K_{sat}$  mais elevada ( $4-12 \text{ cm h}^{-1}$ ), resultado de uma rede de poros mais contínua e interligada. Já o segundo ensaio apresentou maior macroporosidade, porém menor condutividade ( $0,1-2 \text{ cm h}^{-1}$ ), evidenciando que a quantidade de poros não é, isoladamente, determinante da eficiência hidráulica. Essa inversão entre volume e funcionalidade reflete a diferença de conectividade vertical dos bioporos, uma vez que, no segundo ensaio, a maior emergência inicial de plantas produziu canais radiculares concentrados na superfície, sem continuidade suficiente para sustentar fluxos profundos.

Esse contraste reforça que a condutividade hidráulica depende mais da conectividade e orientação dos poros do que de seu volume total (Horn et al., 1995; Jarvis, 2007). A presença de macroporos superficiais desconectados resulta em condutividade limitada, enquanto bioporos verticais contínuos mesmo em menor número, asseguram fluxos mais eficientes. Essa constatação é fundamental para a compreensão da dinâmica hídrica em sistemas agrícolas, sugerindo que práticas que promovam raízes profundas e diversidade funcional tendem a otimizar simultaneamente a infiltração e a estabilidade estrutural.

As análises de  $K_i$  e  $K_f$  (condutividade inicial e final) corroboram esse comportamento, evidenciando que, à medida que o fluxo se estabiliza, a  $K_f$  tende a superar a  $K_i$ , refletindo a reorganização dos canais hidráulicos ativos. Essa tendência é mais acentuada nos tratamentos com maior cobertura e diversidade, especialmente no *Mix* e no *Lolium Alta*, indicando solos estruturalmente mais funcionais. Em contraste, espécies como *Brach* e *Trevo* apresentaram menores valores de condutividade, associando-se a solos mais densos e menos conectados.

No contexto dos processos erosivos, observou-se que o aumento da cobertura vegetal produziu reduções exponenciais nas variáveis perda de solo, salpicamento, erodibilidade (EROD) e destacabilidade (DEST). As elevadas correlações estatísticas ( $R^2 > 0,95$  em vários modelos) confirmam que a cobertura é um fator controlador dominante da erosão. Entretanto, a composição

da cobertura determinou a taxa de decaimento da erosão: misturas funcionais e espécies com arquitetura de copa densa apresentaram as reduções mais rápidas. O *Mix* no segundo ensaio destacou-se como a cobertura mais eficiente, atingindo perdas mínimas com níveis de cobertura intermediários (~50%).

As análises de salpicamento e destacabilidade reforçaram o papel protetor da vegetação na dissipação da energia cinética das gotas de chuva. Observou-se que a presença de vegetação reduz significativamente a destacabilidade do solo, especialmente nos níveis de manejo mais intensos, confirmando o papel combinado da biomassa aérea e radicular na resistência à desagregação. O controle foi particularmente eficiente para *Lolium* e *Calêndula*, que apresentaram destacabilidade mínima nos níveis de alta densidade, enquanto o controle sem a presença de vegetação registrou os maiores valores.

Os resultados relativos à concentração de sedimentos global (CSg) e em suspensão (CSss) mostraram redução expressiva na presença de vegetação. O *Lolium* apresentou os menores valores de CSss, refletindo não apenas a proteção superficial, mas também o aumento da infiltração e a menor velocidade do escoamento. A relação entre densidade de semeadura e redução de CSss confirma que o fechamento do dossel e a interceptação da chuva são mecanismos primários de mitigação. Observou-se, no entanto, que em algumas espécies do segundo ensaio (*Centaurea* e *Mix*), a cobertura vegetal pode ter concentrado o escoamento superficial, elevando localmente os valores de CSss, associado à morfologia foliar e à distribuição de biomassa superficial.

De forma integrada, os resultados comprovam que o manejo com cobertura vegetal diversificada promove uma melhoria expressiva na qualidade física e funcional do solo, atuando simultaneamente na redução da erosão e no aprimoramento das propriedades hidráulicas. A vegetação exerce papel duplo: protetor, pela interceptação da chuva e retenção superficial, e estruturante, pela criação e manutenção de poros condutores.

Portanto, a presente pesquisa contribui para o avanço do conhecimento sobre a interação entre cobertura vegetal e dinâmica físico-hídrica do solo, demonstrando que:

1. A vegetação de cobertura reduz significativamente a erosão hídrica e o transporte de sedimentos;
2. A diversidade funcional e a densidade de plantas determinam a eficácia dessa proteção;
3. A condutividade hidráulica está mais associada à conectividade dos poros do que ao seu volume total;
4. O solo manteve uma estrutura resiliente, equilibrando infiltração, drenagem e retenção de água;

5. A vegetação atua como elemento-chave de conservação, promovendo sustentabilidade hídrica e estrutural.

Em síntese, este trabalho confirma que a conservação do solo depende tanto de sua estrutura física quanto de sua biologia, sendo a vegetação de cobertura o elo integrador entre ambas. A compreensão dessas inter-relações fornece subsídios para práticas agrícolas sustentáveis, capazes de conciliar produtividade e preservação dos recursos edáficos.

## REFERÊNCIAS

Adams, J. E., Kirkham, D., & Scholtes, W. H. (1961). A portable rainfall simulator infiltrometer and physical measurements of soil in place. *Agronomy Journal*, 53(1), 63–65.

Aeroengenharia. (s.d.). *Monitoramento da erosão do solo e levantamento topográfico*. Recuperado de <https://www.aeroengenharia.com>

Agroadvance. (2023). *A importância do monitoramento da erosão do solo*. Recuperado de <https://agroadvance.com.br>

AHDB – Agriculture and Horticulture Development Board. (s.d.). *Cover crops: improving soil structure and water infiltration*. AHDB. Recuperado de <https://ahdb.org.uk>

Aksoy, H., Gedikli, A., Unal, N. E., Yilmaz, M. U., & Birimoglu, G. C. (2012). A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall–runoff–erosion relationships. *Catena*, 98, 63–72.

Alcántara, C., Paredes, P., Pereira, L. S., & Pizarro, C. (2017). Effects of cover crops on soil erosion and soil physical properties in Mediterranean conditions. *Catena*, 157, 13–24.

Alvarenga, R. C., & Fernandes, F. M. (2011). Plantas de cobertura e conservação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(4), 1227–1236.

AOTAD – Associação de Olivicultores de Trás-os-Montes e Alto Douro. (2020). *Relatório de atividades e impacto socioeconômico do setor olivícola transmontano*. AOTAD.

Arrobas, M., & Rodrigues, M. A. (2016). The role of olive orchards on soil carbon sequestration and ecosystem services. *Agroforest Systems*, 90(4), 713–725.

Belo, A. F., Figueiredo, T., & Rodrigues, M. A. (2009). Traditional olive groves as reservoirs of biodiversity in Trás-os-Montes (Portugal). *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 33(2), 159–174.

Bertol, I., Albuquerque, J. A., Leite, D., Vilar, J. P., Zoldan, S. R., & Smanhotto, A. (2007). Erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo de solo e de culturas sob chuva natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(3), 497–507.

Blanco-Canqui, H. (2018a). Cover crops and ecosystem services: insights from studies in temperate soils. *Geoderma*, 313, 74–84.

Blanco-Canqui, H. (2018b). Cover Crops and Soil Physical Properties: A Review. *Soil Science Society of America Journal*, 82(2), 1–17.

Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). Cover crop impacts on soil physical properties: A review. *Soil Science Society of America Journal*, 82(4), 1178–1199.

Blog Verde. (s.d.). *Importância das plantas de cobertura na conservação do solo*. Recuperado de <https://blog.verde.ag/>

Bouma, J. (1991). Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy*, 46, 1–37.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils* (14.<sup>a</sup> ed.). Pearson Prentice Hall.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2013). *Elementos da natureza e propriedades dos solos* (3.<sup>a</sup> ed.). Bookman.

Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22.

Campos, F. H. A. (2021). *Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuva portátil para estudos de erosão hídrica em solos tropicais* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa]. Locus UFV. Recuperado de <https://www.locus.ufv.br>

Cardoso, D. P., Silva, M. L. N., Carvalho, G. J. de, Freitas, D. A. F. de, & Avanzi, J. C. (2012). Plantio direto e plantas de cobertura na conservação do solo e da água em sistema de café. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(1), 37–45.

Carvalho, D. F. de, Rocha, M. T., Silva, S. L. G. da, Souza, M. A. S., Capanema, M. J. de M., & Rodrigues, R. P. F. (2012). Infiltração de água no solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(6), 604–611.

Cassel, D. K., & Nielsen, D. R. (1986). Field capacity and available water capacity. Em A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1 – Physical and Mineralogical Methods* (2.<sup>a</sup> ed., pp. 901–926). American Society of Agronomy.

Castro, L. G. de, Pereira, M. G., Santos, H. G. dos, & Lima, E. S. (2011). Erosão hídrica e práticas conservacionistas em sistemas agrícolas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(3), 975–987.

Cerdà, A. (2011). The influence of slope angle on sediment, water and seed losses on badland landscapes. *Geomorphology*, 125(3), 596–606.

Cerdà, A., Flanagan, D. C., Le Bissonnais, Y., & Boardman, J. (2009). Soil erosion and agriculture. Em *Soil and Water Conservation Advances in the United States* (pp. 1–14). Soil Science Society of America.

Chen, G., & Weil, R. R. (2011). Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil and Tillage Research*, 111(2), 208–218.

Chen, Y., Wang, Z., Zhang, C., Luo, Y., & Zhang, G. (2024). Functional diversity of plant root systems enhances soil stability and erosion resistance under rainfall. *Soil and Tillage Research*, 242, 105946.

Chow, V. T., & Harbaugh, T. E. (1965). Design of rainfall simulators for hydrologic studies. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(4), 15–39.

Dahanayake, K. K. C., Liu, G., Chen, Y., Yu, G., Zhao, J., Fan, C., ... Wang, H. (2024). Root functional traits drive soil aggregate stability and erosion resistance across vegetation restoration chronosequences. *Geoderma*.

Dahanayake, R., Zhang, K., Wang, Y., & Chen, H. (2024). Plant functional traits drive differences in soil erosion resistance across vegetation types under simulated rainfall. *Science of the Total Environment*, 924, 171750.

De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Wemans, K., De Baerdemaeker, J., & Muys, B. (2006). Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil*, 305(1–2), 207–226.

De Moraes, L. F. (2012). *Selamento superficial e infiltração da água no solo em função do manejo* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria].

Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 201–214.

Duarte, F., Martins, L., & Ferreira, M. (2008). A olivicultura tradicional em Trás-os-Montes: desafios e potencialidades. *Revista de Ciências Agrárias*, 31(2), 45–58.

Duarte, F., Rodrigues, M. A., & Arrobas, M. (2008). Sustainability of olive production systems in Trás-os-Montes region of Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 17, 315–324.

Duarte, F., Rodrigues, M. A., & Arrobas, M. (2018). Future prospects of sustainable olive farming systems in Mediterranean regions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 266, 26–37.

Dunne, T., Dietrich, W. E., Bruns, D. A., & Casselman, K. E. (1980). Experimental study of rain splash and the formation of surface crusts in soils. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 62(3–4), 245–258.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2018). *Manual de métodos de análise de solo* (3.<sup>a</sup> ed.). Embrapa.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (s.d. a). *Erosão hídrica: conceitos, métodos e controle*. Recuperado de <https://www.embrapa.br>

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (s.d. b). *Manual de conservação do solo e da água*. Embrapa.

Eos Data Analytics. (2022). *Soil erosion monitoring: methods and applications*. Recuperado de <https://eos.com>

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *World reference base for soil resources 2022: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. FAO.

FAO; ITPS. (2015). *Status of the world's soil resources (SWSR): Main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Intergovernmental Technical Panel on Soils.

Figueiredo, T. de, Ferreira, C. S. S., & Rodrigues, A. C. (2013). Traditional olive groves in northeast Portugal: soil management and environmental sustainability. *Catena*, 104, 153–162.

Figueiredo, T. de, Guerra, C. A., Fernandes, P., & Pinto, M. A. (2013). Soil degradation in northeast Portugal: processes and control measures. *Revista de Ciências Agrárias*, 36(2), 175–187.

Figueiredo, T. de, Pires, C. F., Machado, A. I., Martins, A., & Rodrigues, R. (2022). Field plot experiments for assessing runoff and soil loss in Mediterranean agricultural systems. *Catena*, *213*, 106135.

Figueiredo, T., Rodrigues, M. A., & Arrobas, M. (2013). Soil erosion and conservation in traditional olive groves of Trás-os-Montes, Portugal. *Catena*, *110*, 1–10.

Ghosal, K., & Das Bhattacharya, S. (2020). A comprehensive study on soil erosion and sediment yield using RUSLE and GIS in eastern India. *Modeling Earth Systems and Environment*, *6*, 115–127.

Gómez, J. A., Infante, J. M., Vanderlinden, K., Fernández, M., Lora, A., & Fernández, J. E. (2014). Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain. *Soil and Tillage Research*, *130*, 11–21.

GPP – Gabinete de Planeamento, Políticas e Administração Geral. (2021a). *Estatísticas agrícolas nacionais: produção de azeitona e azeite em Portugal*. Ministério da Agricultura.

GPP – Gabinete de Planeamento, Políticas e Administração Geral. (2021b). *Relatório do setor olivícola português 2021*. Ministério da Agricultura e Alimentação. Recuperado de <https://www.gpp.pt/>

Grable, A. R. (1966). Soil aeration and plant growth. *Advances in Agronomy*, *18*, 57–106.

Grismer, M. E. (2012). Rainfall simulator experiments for evaluation of erosion and runoff processes. *Hydrological Processes*, *26*(15), 2225–2233.

Gwapedza, D., Masih, I., & Tesfamariam, E. H. (2018). Applicability of the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) in the Blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrological Sciences Journal*, *63*(8), 1178–1192.

Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography*, *29*(2), 189–217.

Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Academic Press.

Horn, R., Fleige, H., & Peth, S. (2007). Soil mechanical properties and processes in structured soils. Em *Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Advances in Geotechnical Engineering* (pp. 57–72). Springer.

Horn, R., Way, T., & Rostek, J. (1995). Effect of repeated loading on changes of soil physical properties in structured arable soils. *Soil & Tillage Research*, 35(1–2), 17–28.

INE – Instituto Nacional de Estatística. (2025). *Estatísticas agrícolas 2025*. Recuperado de <https://www.ine.pt/>

IPB – Instituto Politécnico de Bragança. (2015). *Relatório técnico do projeto “Conservação do Solo em Olivais Mecanizados na Região de Trás-os-Montes”*. IPB.

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2024). *Classificação climática de Köppen-Geiger para Portugal Continental*. Recuperado de <https://www.ipma.pt>

Jarvis, N. (2007). A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 58(3), 523–546.

Klein, V. A. (2014). *Dinâmica da água no solo* (3.<sup>a</sup> ed.). Universidade de Passo Fundo.

Koudahe, K., Allen, S. J., & Djaman, K. (2022). Effect of cover crops on soil erosion and runoff under simulated rainfall. *Soil & Tillage Research*, 221, 105-427.

Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895.

Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212–222.

Lal, R. (2019). Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Soil and Tillage Research*, 188, 35–40.

Lepsch, I. F. (2016). *Formação e conservação dos solos* (3.<sup>a</sup> ed.). Oficina de Textos.

Li, S., Zhang, J., Zhao, W., Lu, Y., He, H., Wang, W., ... & Shao, B. (2024). Structural complexity of restored vegetation enhances resistance to soil erosion in degraded landscapes. *Ecological Engineering*, 205, 107297.

Li, Y., Wu, Y., Zhao, G., Wu, S., & Li, Y. (2024). Structural complexity and functional diversity of vegetation enhance erosion control efficiency in restored landscapes. *Catena*, 234, 107629.

- Libardi, P. L. (2005). *Dinâmica da Água no Solo* (2.<sup>a</sup> ed.). EDUSP.
- Lopes, P. R. C., Casanova, A. M., & Rabelo, O. L. (1987). Infiltração de água no solo sob diferentes coberturas vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 11, 91–95.
- Martínez-Murillo, J. F., Ruiz-Sinoga, J. D., & López, J. L. (2013). Effect of rainfall intensity and vegetation cover on the soil loss and runoff on Mediterranean slopes under simulated rainfall. *Catena*, 109, 39–45.
- McConnell, M. (2023). Understanding RUSLE and its applications in soil conservation. *Soil and Water Conservation Review*, 79(3), 250–263.
- Mhaske, P. S., Jadhav, R. A., & Kumbhar, B. K. (2019). Development of portable rainfall simulator to study infiltration and runoff characteristics of soil. *Current Science*, 117(6), 1005–1010.
- Monteiro, A., Lopes, M., Teixeira, M., & Martins, C. (2013). *Caracterização climática e geográfica da região de Trás-os-Montes*. Instituto Politécnico de Bragança.
- Montgomery, D. R. (2007). *Dirt: The erosion of civilizations*. University of California Press.
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation* (3.<sup>a</sup> ed.). Blackwell Publishing.
- Mubvumba, P., & DeLaune, P. (2023). Influence of cover crops on infiltration and runoff reduction. *Soil & Tillage Research*, 228, 105-589.
- Mubvumba, P., & DeLaune, R. D. (2023). Effect of cover crops on soil erosion and runoff: a meta-analysis. *Soil & Tillage Research*, 228, 105674.
- Muñoz-Rojas, M., Abd-Elghaffar, A., Zapata, R., & Jordán, A. (2015). Soil organic carbon and nitrogen stocks and quality across an agricultural landscape: effects of soil management and land use. *Land Degradation & Development*, 26(2), 168–175.
- NIAV – Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária. (s.d.). *História e importância da oliveira em Portugal*. Recuperado de <https://www.inia.pt/>
- NRCS – Natural Resources Conservation Service. (2008). *Soil quality indicators: aggregate stability*. USDA.

NRCS – Natural Resources Conservation Service. (2017). *Soil survey manual*. United States Department of Agriculture.

Pagliai, M., & Vignozzi, N. (2002). The soil pore system as an indicator of soil quality. *Advances in GeoEcology*, 35, 69–80.

Panagos, P., Borelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., ... Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438–447.

Passioura, J. B. (2002). Soil structure and plant growth. *Soil Research*, 40(5), 521–537.

Peres, A. M., Alves, M. R., & Oliveira, J. (2011). Chemical and sensory characterization of olive oils from Trás-os-Montes region (Portugal). *Food Chemistry*, 125, 131–136.

Peres, F., Martins, L. L., & Ferreira-Dias, S. (2011). Olive oil quality and geographical origin: characterization of “Azeite de Trás-os-Montes DOP.” *Food Chemistry*, 124, 1281–1288.

Phinzi, K., & Ngetar, N. S. (2019). The assessment of soil erosion hazard using RUSLE and remote sensing: a case study in South Africa. *Geoderma Regional*, 18, e00233.

Prosdocimi, M., Cerdà, A., & Tarolli, P. (2016). Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review. *Catena*, 141, 1–21.

R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de <https://www.r-project.org/>

Rehagro. (2025). *Manejo e conservação do solo: estratégias sustentáveis de uso agrícola*. Recuperado de <https://rehagro.com.br/>

Reichert, J. M., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., & Rodrigues, M. F. (2016). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 150, 155–166.

Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., & Reinert, D. J. (2009). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos em Ciência do Solo*, 5, 49–134.

Reichert, J. M., Veiga, M., & Reinert, D. J. (1992). Compressibilidade de solos em sistemas de manejo e níveis de umidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 16(1), 37–43.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (Agriculture Handbook 703). USDA.

Repullo-Ruibérriz, J. A., Martínez-Hernández, C., Ordóñez-Fernández, R., & Gómez, J. A. (2018). Soil organic carbon and total nitrogen in a Mediterranean olive grove under different management systems. *Catena*, *162*, 136–145.

Revista Portuguesa de Estudos Regionais. (2018). O turismo do azeite em Trás-os-Montes e Alto Douro. *Revista Portuguesa de Estudos Regionais*, *48*, 95–112.

Reynolds, W. D., Gregorich, E. G., & Culley, J. L. B. (2002). Effects of rotation and management on soil physical quality. *Canadian Journal of Soil Science*, *82*(3), 425–444.

Rodrigues, A., & Correia, C. (2009). Olivicultura tradicional e paisagem rural em Trás-os-Montes. *Revista de Ciências Agrárias*, *32*(2), 45–56.

Rodrigues, A. C., & Cabral, M. (2018). O turismo do azeite em Trás-os-Montes e Alto Douro: oportunidades e desafios para o desenvolvimento rural sustentável. *Revista Portuguesa de Estudos Regionais*, *48*, 95–112.

Rodrigues, M. A., & Cabral, F. (2018). Olive oil routes and rural tourism in Trás-os-Montes: promoting sustainability through agroecological heritage. *Journal of Rural Studies*, *62*, 186–195.

Rodrigues, R., Coelho, C., Ferreira, A. J. D., & Keizer, J. J. (2015). Soil erosion processes in Mediterranean vineyards: The role of land management and rainfall variability. *Catena*, *128*, 176–185.

Rovedder, A. P. M., & Eltz, F. L. F. (2008). Estabilidade de agregados de um Argissolo e perdas de solo sob diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *32*(3), 1053–1062.

Royer, C. A. (2017). *Caracterização e efeitos dos períodos de seca e da aridez na suscetibilidade do solo à erosão hídrica no nordeste de Portugal* [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança].

Santos, R., Fonseca, F., Baptista, P., Paz-González, A., & de Figueiredo, T. (2023). Erosion control performance of improved soil management in olive groves: A field experimental study in NE Portugal. *Land*, *12*(9), 1700.

Santos, H. G. dos, Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C. dos, Oliveira, V. A. de, Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo Filho, J. C. de, Oliveira, J. B. de, & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (5.<sup>a</sup> ed.). Embrapa.

SARE – Sustainable Agriculture Research and Education. (s.d.). *Managing cover crops profitably* (3.<sup>a</sup> ed.). SARE.

Sarrantonio, M. (1992). Opportunities and challenges for the inclusion of cover crops in cash crop systems. Em J. L. Hatfield & B. A. Stewart (Eds.), *Advances in Soil Science: Cropping Strategies for Efficient Use of Water and Nitrogen* (pp. 155–210). CRC Press.

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Deneff, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7–31.

Snapp, S. S., Swinton, S. M., Labarta, R., Mutch, D., Black, J. R., Leep, R., ... & O'Neil, K. (2005). Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agronomy Journal*, 97(1), 322–332.

Souza, G. C., Santos, R. L., Gomes, L. L., Silva, M. C., & Oliveira, L. F. C. (2022). Calibração e avaliação da uniformidade de simuladores de chuva para estudos de erosão hídrica em solos tropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46, e0220075.

Stefanoski, D. C., Santos, G. G., Almeida, R. F., Silva, A. P. da, & Carvalho, J. R. P. de. (2013). Qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(1), 65–73.

Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., ... Singh, K. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80–99.

Stolf, R., Thurler, A. M., & Bacchi, O. O. S. (2011). Relações entre densidade, porosidade e resistência do solo à penetração em diferentes solos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(2), 479–488.

Taguas, E. V., Gómez, J. A., Vanwallegem, T., García-Fernández, I., Guerrero-Campo, J., Pérez, R., & Ortiz, R. (2015). Effect of cover crops on reducing soil erosion and runoff in olive groves under contrasting soil and slope conditions in southern Spain. *Soil Use and Management*, 31(3), 376–385.

TalkPal AI. (s.d.). *A história da oliveira e do azeite em Portugal*. Recuperado de <https://www.talkpal.ai/>

Tang, Y., Zhang, K., Lei, Z., & Li, S. (2021). Effects of vegetation coverage and canopy structure on runoff and soil loss on steep slopes in the hilly loess region. *Catena*, 196, 104901.

Tilman, D., Knops, J., Wedin, D., Reich, P., Ritchie, M., & Siemann, E. (1997). The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 277(5330), 1300–1302.

Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33(2), 141–163.

Torres, P., Rodrigues, M. A., & Arrobas, M. (2017). Olive groves and wildfire prevention: ecosystem services and management implications. *Forest Ecology and Management*, 406, 230–240.

Tucci, C. E. M., & Clarke, R. T. (1997). Impacto das mudanças do uso do solo e urbanização sobre o escoamento superficial. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2(1), 135–152.

UFPA – Universidade Federal do Pará. (s.d.). *Fator RUSLE e uso de SIG na estimativa de erosão*. Recuperado de <https://sig.ufpa.br/>

Vannoppen, W., Vanmaercke, M., De Baets, S., & Poesen, J. (2015). Vegetation impacts on soil hydrology and erosion: from plot to catchment scale. *Earth-Science Reviews*, 159, 277–292.

Vanwalleghem, T., Gómez, J. A., Infante, J. M., Vanderlinden, K., Guerrero-Campo, J., Navarro, C., & Taguas, E. V. (2011). Quantifying the effect of historical soil management on the loss of soil organic carbon on olive groves under Mediterranean climate. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142(3–4), 361–373.

Wang, Z., Zhang, C., Zhang, G., Luo, Y., & Zhang, Y. (2023). Effects of root system architecture and density on soil reinforcement and erosion resistance under simulated rainfall. *Catena*, 225, 107012.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (Agriculture Handbook 537). USDA.

Wu, L., He, B., Guo, Z., & others. (2020). Influence of root systems and vegetation cover on soil erosion and sediment yield: a meta-analysis. *Catena*.

Wu, Y., Li, Y., Zhao, G., & others. (2020). Vegetation traits and root system architecture control soil erosion resistance on restored slopes. *Science of the Total Environment*.

Yu, Y., Wei, W., Chen, L., Jia, F., Yang, L., Zhang, H., & Feng, T. (2016). Effects of vegetation cover on soil water infiltration capacity on the Loess Plateau, China. *Catena*, *137*, 372–382.

Zhang, C., Wang, Z., Liu, Q., Chen, Y., & Luo, Y. (2021). Root traits and soil cohesion: their roles in controlling soil erosion by water. *Geoderma*, *401*, 115335.

Zhao, G., Mu, X., Wen, Z., Wang, F., & Gao, P. (2014). Effects of vegetation cover on runoff and soil erosion in the Loess Plateau, China. *Catena*, *115*, 123–133.

Zhu, B., Peng, X., & Huang, L. (2015). Effects of vegetation restoration on soil aggregation and erosion in a subtropical hilly region of southern China. *Catena*, *133*, 132–140.

Zhu, H., Zhang, J., Lü, X., & others. (2015). Effects of plant functional diversity on soil erosion under different rainfall intensities. *Plant and Soil*, *395*(1–2), 85–97.

Zuazo, V. H. D., & Pleguezuelo, C. R. R. (2008). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *28*, 65–86.

