

PABLO CHANG

MODELAGEM MATEMÁTICA DAS PERDAS DE ÁGUA, SOLO E  
NUTRIENTES EM LATOSSOLO ARGILOSO SOB SISTEMAS DE USO  
E MANEJO

CASCVEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO – 2019

PABLO CHANG

**MODELAGEM MATEMÁTICA DAS PERDAS DE ÁGUA, SOLO E  
NUTRIENTES EM LATOSSOLO ARGILOSO SOB SISTEMAS DE USO  
E MANEJO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura.

Orientador: Prof. Dr. Deonir Secco

Coorientadores:

Prof. Dr. Rogério Luis Rizzi

Prof<sup>a</sup>. Dra. Aracéli Ciotti de Marins

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO – 2019

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Chang, Pablo

Modelagem matemática das perdas de água, solo e nutrientes em Latossolo argiloso sob sistemas de uso e manejo / Pablo Chang; orientador(a), Deonir Secco; coorientador(a), Rogério Luis Rizzi, coorientador(a)II, Aracéli Ciotti de Marins, 2019.  
119 f.

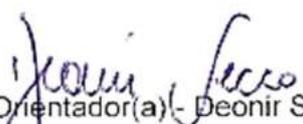
Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2019.

I. Erosão. 2. Modelos. 3. Otimização. I. Secco, Deonir . II. Rizzi, Rogério Luis. III. Marins, Aracéli Ciotti de. IV. Título.

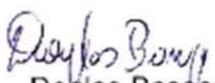
## PABLO CHANG

Modelagem matemática das perdas de água, solo e nutrientes em Latossolo argiloso sob sistemas de uso e manejo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biomassa e Culturas Energéticas, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

  
Orientador(a) - Deonir Secco

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

  
Douglas Bassegio

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

  
Suellen Ribeiro Pardo Garcia

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Toledo (UTFPR)

Cascavel, 18 de março de 2019

*Dedico este trabalho aos meus queridos e amáveis pais, Chang Yu Chao e Chang Chien Tai.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter concedido dado força e saúde para superar todas as dificuldades, proteção em todas as coletas de chuva e, acima de tudo, por ter permitido que eu encontrasse pessoas incríveis ao longo do caminho. Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia na Agricultura e à CAPES por ter possibilitado a realização da pesquisa.

Ao meu orientador, Prof.<sup>o</sup> Dr. Deonir Secco, pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho, pelos ensinamentos dados e pelas palavras sábias e motivadoras.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aracéli Ciotti de Marins, por toda ajuda desde a graduação em Licenciatura em Matemática na UTFPR, por todos os artigos e projetos corrigidos, pela atenção, incentivo, carinho e dedicação a nós.

Ao Prof.<sup>o</sup> Dr. Rogério Luis Rizzi, por todos os ensinamentos, aconselhamentos e por ter sido um exemplo a ser seguido de pessoa dedicada e organizada.

À Simone e Claudia pela lealdade, união, confiança e compreensão durante toda a jornada dos estudos e das coletas.

À Prof.<sup>a</sup> Luciene Kazue Tokura por todo o auxílio no laboratório, no campo, nas análises e nos ensinamentos. À equipe LAFIS (Bruna, Vitória, Samuel, Fernanda, Lucas, Bruno, Mateus, Jeikson, Guilherme, Andryel, Suzana, Carol, Maurício, etc) por todo o esforço, agilidade, bom humor e amizade. Ao Luiz Carlos, Ademar, vigia e todos os funcionários do IAPAR pela cooperação nas coletas a campo. Ao Clair e Edison pelas análises químicas da água.

À banca avaliadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Suellen Ribeiro Pardo Garcia e Prof.<sup>o</sup> Dr. Doglas Bassegio, pelas sugestões e contribuições.

E a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa caminhada. Meus agradecimentos!

## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A</i>	Área da seção transversal da amostra (m <sup>2</sup> )
<i>a, b, c, d</i>	Constantes obtidas empiricamente
<i>C</i>	Tratamentos compactados
<i>Cob</i>	Cobertura verde (%)
<i>Dec</i>	Declividade das parcelas
<i>Dp</i>	Densidade de partícula
<i>Ds</i>	Densidade do solo (g cm <sup>-1</sup> )
<i>F</i>	Parâmetro físico utilizado para a modelagem
<i>H</i>	Potencial de pressão no topo da amostra (m)
<i>Int</i>	Intensidade máxima de chuva para cada evento de precipitação (mm h <sup>-1</sup> )
<i>Ksat</i>	Condutividade hidráulica
<i>L</i>	Comprimento da amostra (m)
<i>Macro</i>	Macroporosidade (%)
<i>Micro</i>	Microporosidade
<i>Msp</i>	Massa seca da palha (t ha <sup>-1</sup> )
<i>Mss</i>	Massa do solo seco (g)
<i>Msu</i>	Massa do solo úmido
<i>n<sub>1</sub></i>	Grau do polinômio referente ao modelo antes do dia 40
<i>n<sub>2</sub></i>	Grau do polinômio referente ao modelo igual ou depois do dia 40
<i>P</i>	Função referente às perdas
<i>P.água</i>	Perda de água (L ha <sup>-1</sup> )
<i>P.cálcio</i>	Perda de cálcio (kg ha <sup>-1</sup> )
<i>P.fósforo</i>	Perda de fósforo (kg ha <sup>-1</sup> )
<i>P.potássio</i>	Perda de potássio (kg ha <sup>-1</sup> )
<i>P.solo</i>	Perda de solo (kg ha <sup>-1</sup> )
<i>T</i>	Tempo percorrido após a semeadura da soja (dias)
<i>t<sub>ksat</sub></i>	Tempo percorrido para o volume de água percolado (s)
<i>Va</i>	Volume de água percolado (m <sup>3</sup> )
<i>Vc</i>	Volume do anel (cm <sup>-3</sup> )
<i>V<sub>est</sub></i>	Valor estimado
<i>V<sub>obs</sub></i>	Valor observado
<i>x</i>	Variável independente
<i>y</i>	Variável dependente
<i>τ</i>	Tratamento

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Croqui da área experimental com os seus respectivos tratamentos e faixas compactadas (área rachurada). .....	13
<b>Figura 2.</b> Modelo das calhas coletoras e suas medidas. ....	14
<b>Figura 3.</b> Precipitação acumulada durante os dias da coleta. ....	18
<b>Figura 4.</b> Exemplo de submodelo para cobertura verde. (a) função polinomial de grau 3 para os primeiros 40 dias; (b) função polinomial de grau 6 para depois dos 40 dias e (c) função definida por partes com a junção das duas funções.....	21
<b>Figura 5.</b> Exemplo de submodelo da massa seca da palha ao longo do ciclo da soja. Os dados observados são representados pelos pontos, enquanto a linha de tendência é o resultado da equação mostrada acima. ....	28
<b>Figura 6.</b> Exemplo de tratamento em que o modelo apresentou um ótimo ajuste até 40°, mas que ultrapassou o limite de 100% após este tempo. ....	31
<b>Figura 7.</b> Exemplo de tratamento em que o modelo apresentou um ótimo ajuste após o 40° dia, mas que teve valores negativos nos primeiros dias. ....	32
<b>Figura 8.</b> Ajuste para perda de água em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e densidade do solo. ....	34
<b>Figura 9.</b> Ajuste para perda de água em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e macroporosidade.....	35
<b>Figura 10.</b> Ajuste para perda de água em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e massa seca da palha.....	36
<b>Figura 11.</b> Ajuste para perda de água em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e cobertura verde. ....	37
<b>Figura 12.</b> Ajuste para perda de solo por intensidade máxima de chuva por precipitação e densidade do solo. ....	38
<b>Figura 13.</b> Ajuste para perda de solo em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e macroporosidade. ....	39
<b>Figura 14.</b> Perda de solo por intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e massa seca da palha. ....	40
<b>Figura 15.</b> Ajuste para perda de solo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e cobertura verde. ....	41
<b>Figura 16.</b> Ajuste para perda de magnésio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e densidade do solo.....	42
<b>Figura 17.</b> Ajuste para perda de magnésio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e macroporosidade. ....	43
<b>Figura 18.</b> Ajuste para perda de magnésio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e massa seca da palha.....	44
<b>Figura 19.</b> Ajuste para perda de magnésio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e cobertura verde.....	45
<b>Figura 20.</b> Ajuste para perda de cálcio em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e densidade do solo.....	46
<b>Figura 21.</b> Ajuste para perda de cálcio em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e macroporosidade. ....	47
<b>Figura 22.</b> Ajuste para perda de cálcio em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e massa seca da palha. ....	48

<b>Figura 23.</b> Ajuste para perda de cálcio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e cobertura verde. ....	48
<b>Figura 24.</b> Ajuste para perda de potássio em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e densidade do solo. ....	50
<b>Figura 25.</b> Ajuste para perda de água em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e macroporosidade. ....	50
<b>Figura 26.</b> Ajuste para perda de potássio em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e massa seca da palha. ....	51
<b>Figura 27.</b> Ajuste para perda de potássio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e cobertura verde. ....	52
<b>Figura 28.</b> Ajuste para perda de fósforo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e densidade do solo. ....	53
<b>Figura 29.</b> Ajuste para perda de fósforo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e macroporosidade. ....	54
<b>Figura 30.</b> Ajuste para perda de fósforo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e massa seca da palha. ....	55
<b>Figura 31.</b> Ajuste para perda de fósforo em função da intensidade máxima de chuva por evento precipitação e cobertura verde. ....	55
<b>Figura 32.</b> Boxplots das perdas de água, suas médias e algum dos pontos discrepantes. ....	65
<b>Figura 33.</b> Boxplots das perdas de solo, suas médias e algum dos pontos discrepantes. ....	65
<b>Figura 34.</b> Boxplots das perdas de magnésio, suas médias e alguns dos pontos discrepantes. ....	66
<b>Figura 35.</b> Boxplots das perdas de cálcio, suas médias e alguns dos pontos discrepantes. ....	66
<b>Figura 36.</b> Boxplot das perdas de potássio, suas médias e alguns dos pontos discrepantes. ....	67
<b>Figura 37.</b> Boxplots das perdas de fósforo, suas médias e em alguns dos pontos discrepantes. ....	67

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Composição granulométrica <sup>1</sup> do solo nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m da área experimental do IAPAR/Santa Tereza (valores médios de 3 repetições) .....	11
<b>Tabela 2.</b> Caracterização química do solo nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m da área experimental (valores médios de todos os tratamentos).....	12
<b>Tabela 3.</b> Quinze primeiros tratamentos do experimento com as espécies “recuperadoras” de estrutura implantadas após o cultivo da soja .....	12
<b>Tabela 4.</b> Valores médios da densidade do solo (Ds), Porosidade total (PT), macroporosidade (Macro), Microporosidade (Micro) e condutividade hidráulica saturada (Ksat) para cada tratamento de solo não compactado e compactado (C)..	22
<b>Tabela 5.</b> Valores das declividades referente a cada parcela experimental .....	23
<b>Tabela 6.</b> Intensidade máxima de chuva para cada evento de precipitação.....	24
<b>Tabela 7.</b> Estatística descritiva das perdas de água, solo e nutrientes.....	25
<b>Tabela 8.</b> Valores médios da massa seca da palha e cobertura verde no solo durante todo o cultivo da soja em área compactada (C) e não compactada (NC) .....	27
<b>Tabela 9.</b> Erros relativos (%) dos dados da massa seca da palha ao longo do ciclo da soja observados com os dados estimados.....	29
<b>Tabela 10.</b> Valores mínimos e máximos da cobertura verde (%) de todos os tratamentos ao longo do ciclo da soja, com valores estimados por funções polinomiais de grau 3 e de grau 6, com alguns tratamentos em grau 5 presentes nas duas colunas da direita.....	30
<b>Tabela 11.</b> Erros relativos (%) dos dados de cobertura verde observados com os dados estimados com a aplicação de funções definidas por partes.....	33
<b>Tabela 12.</b> Modelos de perda de água em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%) .....	34
<b>Tabela 13.</b> Modelos de perda de solo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%).....	38
<b>Tabela 14.</b> Modelos de perda de magnésio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%).....	42
<b>Tabela 15.</b> Modelos de perda de cálcio em função da intensidade máxima de chuva por evento precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%).....	45
<b>Tabela 16.</b> Modelos de perda de potássio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%) .....	49
<b>Tabela 17.</b> Modelos de perda de fósforo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%) .....	52
<b>Tabela 18.</b> Total das perdas de água, solo e nutrientes durante todo o ciclo da soja, considerando os 20 dias de coleta de chuva .....	56
<b>Tabela 19.</b> Análise de variância (ANOVA) para perda de água .....	68

<b>Tabela 20.</b> Análise de variância (ANOVA) para perda de cálcio.....	68
<b>Tabela 21.</b> Análise de variância (ANOVA) para perda de fósforo .....	68
<b>Tabela 22.</b> Análise de variância (ANOVA) para perda de magnésio .....	68
<b>Tabela 23.</b> Análise de variância (ANOVA) para perda de potássio.....	68
<b>Tabela 24.</b> Análise de variância (ANOVA) para perda de solo .....	68
<b>Tabela 25.</b> Análise de variância (ANOVA) para massa seca da palha .....	68
<b>Tabela 26.</b> Análise de variância (ANOVA) para cobertura verde .....	68

CHANG, Pablo. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Agosto de 2018. **Modelagem matemática das perdas de água, solo e nutrientes em Latossolo argiloso sob sistemas de uso e manejo.** Orientador: Prof. Dr. Deonir Secco. Coorientadores: Prof. Dr. Rogério Luis Rizzi e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Aracéli Ciotti de Marins.

## RESUMO

A erosão do solo por escoamento superficial traz sérios prejuízos à produtividade agrícola e ao meio ambiente. Assim, este trabalho teve por objetivo modelar matematicamente as perdas de água, solo e nutrientes em um Latossolo argiloso com diferentes sistemas de manejo, por meio dos atributos físicos de solo e da cobertura vegetal, para fins de reduzir a erosão por escoamento. A área experimental localizou-se no município de Santa Tereza do Oeste – PR, em lavoura de soja. Os tratamentos consistiram em três sistemas de manejo: sistema plantio direto tradicional, sistema plantio direto gessado, sistema plantio direto com escarificação e doze tratamentos de sistema plantio direto com qualidade com espécies de cobertura em consórcio ou não, denominadas “recuperadoras” de estrutura do solo: milheto, guandu anão, *Crotalaria juncea*, feijão guandu, *Crotalaria spectabilis*, mucuna preta, aveia branca, aveia preta, centeio, aveia preta com nabo forrageiro, aveia preta com tremoço branco e aveia preta com ervilha forrageira. Foi realizada uma faixa compactada, exceto tratamento tradicional, totalizando-se 29 tratamentos. Os dados de água, sedimentos e nutrientes foram coletados a cada precipitação nas calhas coletoras instaladas em cada tratamento ao longo do ciclo da soja. O delineamento foi inteiramente casualizado. As repetições consistiram como cada coleta de chuva, totalizando-se 20 coletas sucedidas. Foi realizada análise descritiva e teste Tukey a 5% de significância para a comparação entre os tratamentos. Em relação à modelagem, foi utilizado o Método de Levenberg-Marquardt para o ajuste de curva das perdas e foram gerados submodelos para estimar valores da palha e cobertura verde ao longo do ciclo da soja. De modo geral, as perdas de água, solo e nutrientes não diferiram entre os tratamentos e as maiores perdas estão relacionadas com maior densidade e menor macroporosidade, enquanto a relação entre a massa seca da palha e a cobertura verde foi inversamente proporcional. A utilização da função definida por partes foi adequada para estimar valores de cobertura verde ao longo do ciclo da soja.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

**PALAVRAS-CHAVE:** erosão hídrica, modelos, otimização

CHANG, Pablo. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, August 2018. **Mathematical modeling of water, soil and nutrient losses in loamy Oxisols under systems of use and management.** Advisor: Prof. Dr. Deonir Secco. Co-advisors: Prof. Dr. Rogério Luis Rizzi and Prof. Dr. Araceli Ciotti de Marins.

## ABSTRACT

Soil erosion due to runoff causes serious damage to agricultural productivity and to the environment. Thus, this work aims to mathematically model water, soil and nutrient losses in a loamy Oxisols with different management systems by means of the physical soil attributes vegetation cover, in order to avoid erosion by runoff. The experimental area was located in the municipality of Santa Tereza do Oeste - PR, under soybean cultivation. The treatments consisted of three systems of management: traditional no-tillage system, no-till system, no-tillage system with scarification and twelve treatments of no-tillage system with quality with cover species in a consortium or not, called "recuperators" of soil structure: millet, pigeon pea, *Crotalaria juncea*, pigeon pea, *Crotalaria spectabilis*, black oats, white oats, black oats, rye, black oat with forage turnip, black oats with white lupine and black oats with forage peas. A compacted range was performed, except for traditional treatment, totaling 29 treatments. The water, sediment and nutrient data were collected at each precipitation in the collector channels installed at each treatment along the soybean cycle. The design was completely randomized. The replicates consisted of each rain collection, totaling 20 successful collections. A descriptive analysis and a Tukey test at 5% of significance were performed to compare the treatments. Regarding the modeling, the Levenberg-Marquardt Method was used to adjust the curve of the losses and it was generated submodels to estimate values of straw and green cover over the time cycle of soybean. In general, the losses of water, soil and nutrients did not differ between treatments and highest losses are related to higher density and lower macroporosity, while the relation between the dry mass of the straw and the green cover was inversely proportional. The use of the function defined by parts was adequate to estimate green coverage values throughout the soybean cycle.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

**KEYWORDS:** water erosion, models, optimization

## ÍNDICE

<b>RESUMO</b> .....	<b>x</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>2</b>
2.1 Atual Sistema Plantio Direto .....	2
2.2 Latossolos argilosos x compactação do solo .....	3
2.3 Perdas de água, solo e nutrientes por erosão .....	4
2.4 Impacto das perdas de água, solo e nutrientes no desenvolvimento e rendimento de grãos de cultivos agrícolas.....	6
2.5 Modelagem matemática das perdas de água, solo e nutrientes .....	6
2.6 Aplicações da modelagem matemática das perdas de água, solo e nutrientes na otimização dos cultivos agrícolas.....	8
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>11</b>
3.1 Localização e descrição da área de estudo .....	11
3.2 Tratamentos e delineamento experimental .....	12
3.3 Determinação das propriedades físicas .....	14
3.4 Coleta de água, solo e nutrientes.....	16
3.5 Coleta de palha e cobertura verde .....	16
3.6 Dados de declividade das parcelas.....	17
3.7 Semeadura e colheita da soja.....	17
3.8 Dados pluviométricos durante o ciclo da soja .....	17
3.9 Análise estatística .....	18
3.10 Modelagem matemática.....	18
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>22</b>
4.1 Propriedades físicas do solo .....	22
4.2 Intensidade máxima de chuva por evento de precipitação .....	24
4.3 Estatística descritiva .....	25
4.4 Análises de variância das perdas.....	26
4.5 Submodelos .....	26
4.5.1 Massa seca da palha ao longo do ciclo da soja.....	27
4.5.2 Cobertura verde ao longo do ciclo da soja.....	29
4.6 Modelos .....	34
4.6.1 Perda de água .....	34
4.6.2 Perda de solo.....	38
4.6.3 Perda de magnésio.....	41
4.6.4 Perda de cálcio .....	45
4.6.5 Perda de potássio.....	49
4.6.6 Perda de fósforo .....	52
4.7 Perdas totais ao longo do ciclo da soja.....	56
4.8 Sugestões para trabalhos futuros .....	57
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>58</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>59</b>
<b>Anexo 1</b> .....	<b>65</b>
<b>Anexo 2</b> .....	<b>68</b>
<b>Anexo 3</b> .....	<b>69</b>
<b>Anexo 4</b> .....	<b>77</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais a produção de grãos tem exigido dos produtores rurais maior uso da tecnologia e aperfeiçoamento no manejo do solo. Em uma estimativa realizada em fevereiro de 2018, pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) sobre a safra de 2017 e 2018, o Brasil produziu aproximadamente 111.558,6 mil toneladas de soja, ocupando o segundo lugar entre os maiores produtores mundiais de grãos. O estado do Paraná, por sua vez, ocupa a segunda colocação nacional como produtor brasileiro de soja, com a estimativa de 18.307,1 mil toneladas (CONAB, 2018).

Apesar disso, mesmo com a expectativa otimista para os próximos anos, um fato tem alarmado muitos pesquisadores em relação ao manejo do solo: a erosão hídrica. Ela se manifesta com o arraste de partículas do solo pelo escoamento superficial, ocasionando a perda de água, solo e nutrientes. Suas causas podem ser advindas de forma natural ou de forma induzida pelo homem (MARIOTI et al., 2013).

Entre os fatores que aceleram o processo da erosão, a ação antrópica ainda é o mais evidente. Contudo, é relevante avaliar as modificações da qualidade estrutural do solo provenientes das práticas de manejo do solo (GUIMARÃES et al., 2013). Desta forma, deve-se adotar medidas apropriadas de uso e manejo do solo visando sua sustentabilidade agrícola (CÂNDIDO et al., 2014), como a aplicação de palha, plantas recuperadoras de estrutura e terraceamento.

Por essa razão, um estudo sobre o manejo do solo e busca por alternativas que levem em consideração o comportamento estrutural do solo e as condições pluviométricas se tornam relevantes. A modelagem matemática é uma importante ferramenta no desenvolvimento de avaliações confiáveis nas predições de perda de solo e água, além de contribuir no planejamento de medidas de controle do fenômeno erosão (FILHO et al., 2004). Conforme Caten, Minella e Pedro (2012), o seu uso também é importante para determinar a influência da rotação de culturas na erosão do solo, na redução de sedimentos e para tomar decisões na identificação e aplicação de práticas conservacionistas do solo, água e nutrientes.

Assim, este trabalho teve por objetivo modelar matematicamente as perdas de água, solo e nutrientes em um Latossolo argiloso na cultura da soja com diferentes sistemas de manejo, por meio dos atributos físicos de solo e da cobertura vegetal, com o intuito de evitar a erosão por escoamento e minimizar os seus impactos negativos.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Atual Sistema Plantio Direto

O Sistema Plantio Direto (SPD) tem sido a forma de manejo de água e solo mais recomendável por apresentar diversos benefícios que nenhum outro sistema apresentou com tanta abundância: conserva e melhora o solo, contribui com a disponibilidade e qualidade da água, assim como favorece melhorias ambientais e sociais (DIAS, 2014). Dessa forma, o SPD foi o grande responsável pelo aumento da produtividade agrícola brasileira dos últimos tempos (COSTA et al., 2015).

No Brasil, desde os anos 1960, o SPD tornou-se a técnica agrícola em abundante uso pelos seus impactos econômicos e conservacionistas. E, em 2012, atingiu aproximadamente 32 milhões de hectares no país (DIAS, 2014). Entre as características principais deste sistema, está o não revolvimento do solo, que é uma prática oposta ao sistema de Plantio Convencional (HERRADA; LEANDRO; FERREIRA, 2017). Além disso, outro fator essencial para o sucedimento do SPD é a qualidade e quantidade de palhada na superfície (SILVA et al., 2017; HERRADA; LEANDRO; FERREIRA, 2017), o que proporciona melhorias nas propriedades físicas, biológicas e químicas do solo (COSTA et al., 2015).

A palhada de milho, por exemplo, possui velocidade de decomposição lenta, permitindo-se proteger a superfície do solo da erosão hídrica durante o tempo apropriado (SILVA et al., 2017). Resultados de Dechen et al. (2015) indicaram, na avaliação das perdas associadas à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo, que os maiores percentuais de cobertura do solo estão relacionados com as menores perdas de água, solo e nutrientes. Miguel et al. (2014) também inferiram que a manutenção da cobertura e o menor revolvimento têm influenciado significativamente na diminuição da perda de solo.

Além da aplicação de palhada e do não revolvimento do solo, apenas após os anos 1980 é que começou a ser empregado o terceiro procedimento do SPD: a rotação de culturas, definindo-se como a plantação de espécies variadas uma após a outra e ao longo do tempo (DIAS, 2014). Este método viabiliza a inclusão de resíduos vegetais com diferentes relações C/N e diferentes sistemas radiculares, alterando a ciclagem de nutrientes e os índices de decomposição no solo (COSTA et al., 2015). Com isso, tais fatores auxiliam na manutenção ou recuperação das qualidades do solo e na estabilização da produtividade (HERRADA; LEANDRO; FERREIRA, 2017).

Apesar dos benefícios do SPD, a prática correta ainda é pouco manifestada nas lavouras brasileiras. Como consequência, a compactação do solo, as perdas de água, solo e nutrientes, o aumento do custo de produção e a quebra da estabilidade da produtividade estão afetando as áreas com SPD, em razão do desconhecimento dos produtores ou a simplificação de procedimentos (DIAS, 2014).

De acordo com as pesquisas da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 2014), dos 32 milhões de hectares que sob SPD, apenas 2,7 milhões de hectares estão caracterizados de maneira apropriada conforme as recomendações. No cenário atual, tem-se verificado a falta de rotação de culturas, pouca palha na superfície do solo, ausência de terraços, semeadura em linha reta e morro acima (DIAS, 2014; SILVA et al., 2017).

A partir da baixa mobilização no solo que o SPD propõe, a compactação ocorre em maior extensão e intensidade nas camadas superficiais (NASCIMENTO et al., 2016). Aliado ao intenso tráfego de máquinas, a umidade do solo intervém nos estados de compactação (SAMPIETRO; LOPES; REICHERT, 2015; SILVA; ALBUQUERQUE; COSTA, 2014; SZYMCZAK et al., 2014). Com isso, as chuvas intensas e abundantes da região Sul do Brasil e o não respeito à condição de umidade no momento de colheita e tratos culturais agravam ainda mais as circunstâncias.

Portanto, a pequena intervenção mecânica e os sucessivos tráfegos de implementos agrícolas são indícios de que a compactação é mais agravante no SPD que o sistema convencional de cultivo (GUBIANI et al., 2015). Sendo assim, é substancial a busca por técnicas para reduzir o tráfego de máquinas e a compactação do solo (MORAES et al., 2018; DRESCHER et al., 2017) e, conseqüentemente, a perda de água, solo e nutrientes.

## **2.2 Latossolos argilosos x compactação do solo**

Diferentes solos, ainda que apresentem as mesmas condições de uso e manejo, apresentam capacidades diferentes para suportar a carga (MAZURANA et al., 2017), podendo revelar maior ou menor suscetibilidade à compactação (BROCH; KLEIN, 2017). Nos trabalhos de Broch e Klein (2017), os autores observaram que, com o aumento de silte e matéria orgânica, houve redução na densidade do solo. Mazurana et al. (2017) verificaram que a suscetibilidade à compactação foi mais

elevada em solo com derivados de basalto, relevando a influência do tipo de concentração de óxidos de ferro e do teor de matéria orgânica.

No sul do Brasil, solos da classe de Latossolos são bastante suscetíveis à compactação (DRESCHER et al., 2017; MAZURANA et al., 2017). Em destaque o Latossolo Vermelho Distroférico, que apresenta alto potencial de compactação do solo em razão dos elevados teores de óxidos de ferro, os quais são comuns em solos derivados de rochas basálticas (SILVA; CASTRO, 2015).

Por outro lado, os Latossolos argilosos manejados sobre SPD apresentam vantagens na contração e expansão do solo para a recuperação da sua estrutura. Com isso, a compactação em Latossolos argilosos não é irreparável (GUBIANI et al., 2015), tendo em vista a elasticidade do solo.

### **2.3 Perdas de água, solo e nutrientes por erosão**

Nos solos agrícolas do Brasil, uma das principais ocorrências de degradação dos solos é a erosão hídrica. Estimam-se perdas de cerca de 616,5 milhões de toneladas de terra por ano, que equivalem ao custo de US\$1,3 bilhões ao ano (DECHEN et al., 2015), ocasionado pelo processo de erosão superficial do solo em lavouras, tornando-se o maior responsável em produção de sedimentos (DECHEN et al., 2015; MIGUEL et al., 2014).

A erosão hídrica é um processo de remoção de materiais do solo como partículas de solo e nutrientes por meio do escoamento superficial pela água, o qual é considerado como um dos agentes erosivos naturais (PANDEY et al., 2016). As propriedades do solo influenciam no desenvolvimento da erosão, portanto, as mudanças nas características do solo, que ocorrem geralmente durante a prática agrícola, são aspectos a serem atenuados pela gestão ambiental (OUYANG et al., 2018).

As causas da erosão são advindas da erodibilidade do solo, erosividade da chuva (DECHEN et al., 2015) e pelo manejo do solo, o qual inclui o preparo do solo, tratos culturais, semeadura e colheita mecanizada (CÂNDIDO et al., 2014; VOLK; COGO, 2014). Além disso, a exposição do solo ao intemperismo e a demasiada aplicação de insumos geram impactos negativos, que são difíceis de ser controlados posteriormente (FILHO et al., 2016).

Na camada superficial do solo ocorre maior vulnerabilidade ao selamento superficial. Apresentado como camada de partículas com adensamento provocado pelo impacto das gotas de chuva, o selamento induz ao impedimento da infiltração da água da chuva, resultando na sua retenção em superfície (CÂNDIDO et al., 2014).

Contudo, boa parte das pesquisas sobre a erosão do solo têm buscado formas de estimar as perdas de solo, água e nutrientes e evitá-las ao máximo possível por meio de práticas conservacionistas (EDUARDO et al., 2013). O que torna o estudo relevante na área científica, dado que as práticas de conservação de solo e água são muito pouco aplicadas (KEESSTRA et al., 2016).

Rodrigues et al. (2015) simularam a precipitação em parcelas com e sem cobertura vegetal para avaliar a perda de solo provocada pela erosão. Ademais, em solos descobertos ocorreu um aumento de 98,09% de sedimentos comparado aos que apresentaram cobertura. Oliveira et al. (2015) também afirmaram que a diminuição da cobertura superficial no solo acelera a erosão hídrica.

Em trabalhos semelhantes, Carvalho et al. (2015) concluíram que o sistema de preparo em nível apresentou redução de 86,6% da perda de solo e redução de 59,7% da perda de água comparado ao solo exposto. Bertol et al. (2013, 2014) e Oliveira et al. (2015) destacaram que o aumento do transporte de sedimentos está relacionado com o aumento da taxa de enxurrada.

Keesstra et al. (2016) também encontraram redução das perdas com o crescimento da cobertura vegetativa no solo. Tudo isso pode ser explicado pelos maiores valores de condutividade hidráulica e macroporosidade que a intensa existência de camada vegetal proporciona ao solo (CÂNDIDO et al., 2014; EDUARDO et al., 2013).

Relacionadas com a perda de nutrientes, pesquisas revelam o principal meio no qual ocorrem essas perdas por conta do escoamento de água (OLIVEIRA et al., 2015; ADVIENTO-BORBE et al., 2018). Assim, o empobrecimento do solo está interligado aos sedimentos transportados e a maior declividade do solo (MENDONÇA et al., 2015).

Bramorski, Trivelin e Crestana (2015) afirmaram, ao avaliar as perdas de nitrogênio resultantes da erosão hídrica, que a perda de nutrientes causa impactos negativos na qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Nas análises de Dechen et al. (2015) em solos descobertos, foram estimadas cerca de 16% de perda

de  $P_2O_5$  e 8% de perda de KCl quando relacionados com a taxa de fertilizantes recomendada para o cultivo.

#### **2.4 Impacto das perdas de água, solo e nutrientes no desenvolvimento e rendimento de grãos de cultivos agrícolas**

A erosão hídrica do solo é uma das principais causas de degradação para o meio ambiente e os recursos naturais, reduzindo o rendimento de culturas (PANDEY et al., 2016). Na África, por exemplo, dados de 2015 mostram que houve uma perda estimada de 280 milhões de toneladas de rendimento agrícola (UNEP, 2015).

Entre as consequências da erosão estão a diminuição da fertilidade do solo, redução do potencial produtivo, aumento dos gastos com adubação, inviabilização de áreas de produção, assoreamento e diminui a disponibilidade de água às culturas (MARIOTI et al., 2013; CÂNDIDO et al., 2014).

Contudo, o uso incorreto de práticas de conservação do solo nas propriedades agrícolas pode agravar o assoreamento (FILHO et al., 2016). Adviento-Borbe et al. (2018) verificaram a influência da erosão na produção de algodão no estado americano de Arkansas e identificaram que o rendimento foi em média  $1.111 \text{ kg ha}^{-1}$ , sendo maior em lavoura conservacionista que em lavoura convencional, este último que sofreu pelos maiores volumes de escoamento ao longo do período de irrigação.

Gao et al. (2015) também constataram que houve interferência no rendimento de grãos de soja em resultados experimentais, sendo que apresentou taxa de redução de 5,97% a cada 10 cm de perda de solo, tendo o rendimento visto como fator mais sensível comparado com a biomassa e índice de colheita.

#### **2.5 Modelagem matemática das perdas de água, solo e nutrientes**

Ao longo dos anos, vários estudos relacionados com as perdas de solo, água e nutrientes têm contribuído muito para o entendimento do processo erosivo e nas estratégias de práticas conservacionistas do solo, geralmente utilizando padrões sob chuva simulada ou natural (MIGUEL et al., 2014). Com isso, uma variedade de modelos de erosão do solo foi desenvolvida no mundo todo, sendo apresentados como expressões matemáticas que caracterizam processos individuais, podendo ser classificados como mecanísticos, empíricos e semiempíricos (PANDEY et al., 2016).

Os modelos empíricos se baseiam em dados experimentais a campo ou laboratório, fazendo-se suposição estatística para gerar os modelos. Já os modelos mecanísticos levam em consideração toda a estrutura em termos de mecanismos, podendo ser derivada, por exemplo, de uma lei física. Entre alguns exemplos, a Equação Universal da Perda de Solo (USLE) é considerada um modelo empírico, visto que um modelo complexo baseado na física seria o WEPP (Water Erosion Prediction Project) (VANWALLEGHEM et al., 2017).

Ademais, os mais indicados para representar dados experimentais a campo são os modelos semiempíricos, que relacionam parâmetros experimentais com as respostas estruturais (RÉUS; JÚNIOR; FONTANELE, 2016). Contudo, para se enquadrar como um modelo desejável é preciso que satisfaça a confiabilidade, facilidade de uso com um mínimo de dados, robustez na natureza e a flexibilidade em se adaptar com o clima, conservação prática e mudanças no manejo de solo (PANDEY et al., 2016).

Com o desenvolvimento da tecnologia, a aplicação dos modelos de perdas de solo e água tiveram melhorias significativas para soluções da erosão do solo. Apesar disso, a maioria das limitações são referentes às transformações que ocorrem na estrutura do solo durante os ciclos dos cultivos agrícolas. Além disso, todos os modelos apresentam, usualmente, a mesma estrutura física, o que os tornam insuficientes para simular de forma mais precisa as perdas de solo e água por erosão em condições de chuvas naturais (MELLO et al., 2016).

Pandey et al. (2016) observaram quando realizaram uma revisão sobre os modelos mecanísticos de erosão, que os principais problemas na aplicação dos modelos são decorrentes da complexidade natural, precisão e os requisitos de dados para a entrada. Na revisão de literatura de Mello et al. (2016), as limitações destacadas pelos autores foram que os modelos não capturam aspectos relevantes como os impactos das plantas de cobertura. Vanwalleghem et al. (2017) também afirmaram que, muitas vezes, não são consideradas em modelos de erosão as propriedades dinâmicas que afetam a erodibilidade do solo e a topografia.

Além disso, os artigos de revisão mostram que a maioria dos modelos são testados em bacias agrícolas, e situadas apenas em países desenvolvidos, o que exige, antes da aplicação dos mesmos, calibração específica do local (PANDEY et al., 2016). Sendo assim, muitos desafios foram transcorridos pelos cientistas com o passar do tempo para modelar os sistemas naturais e os modelos são a forma de

melhor custo-benefício para prever os impactos das ações antrópicas sobre a natureza (MELLO et al., 2016).

Em razão da grande diversidade dos modelos, existe uma infinidade deles para se resolver qualquer problema prático, assim como um mesmo modelo pode ser utilizado para resolver diversos problemas (PANDEY et al., 2016). Dentre as questões que podem ser gerenciadas com os modelos, são destacados os impactos extremos do clima nas inundações, deslizamentos de terras, secas, problemas com a colheita, entre outros (MELLO et al., 2016).

## **2.6 Aplicações da modelagem matemática das perdas de água, solo e nutrientes na otimização dos cultivos agrícolas**

A principal informação para as estratégias do uso da terra e água nas lavouras para se precaver da erosão é advinda dos modelos matemáticos, sendo que, por meio dos resultados das simulações, os profissionais da área agrícola conseguem compreender melhor os impactos gerados pela mudança de manejo ou remoção de espécies (MELLO et al., 2016). Relativo às previsões de dados, a modelagem matemática torna-se, na realidade, a única ferramenta disponível (VANWALLEGHEM et al, 2017).

Wang et al. (2018) utilizaram, ao estudar a perda de fósforo (P) por erosão em rotação de milho-soja cultivada sob solo franco argiloso em Ontário, Canadá, o modelo EPIC (*Environmental Policy Integrated Climate*) para simular anualmente as perdas de fósforo. Os autores verificaram que as simulações satisfizeram aos dados observados por apresentarem alto grau de Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe, com valor de 0,78, sendo o valor 1 considerado como perfeito ajuste.

Olivetti et al. (2015) realizaram a modelagem, com o objetivo de estimar as taxas de erosão hídrica nos Latossolos da sub-bacia hidrográfica do sul do estado de Minas Gerais, a partir de RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*), em conjunto com técnicas de geoestatística e sistemas de informação geográfica. Os autores afirmaram que a modelagem foi útil para auxiliar na determinação de medidas de conservação e recuperação do solo, além de estimar as perdas de solo e identificar as áreas mais suscetíveis à erosão.

Com o objetivo de comparar as estimativas de perdas de solo feitas em modelo WEPP e USLE, Gvozdenovich et al. (2017) utilizaram parcelas de escoamento

localizadas na Argentina, com milho. Os autores evidenciaram a supremacia do modelo WEPP (E de 0,17 a 0,61) sobre o USLE (E de -8,94 a 0,14) referente aos quatro tratamentos, por ter apresentado a estimativa mais eficiente.

Em uma microbacia agrícola sob SPD no sul do Brasil, Didoné, Minella e Evrard (2017) avaliaram o impacto de diferentes medidas de conservação de solo por meio do modelo WaTEM/SEDEM para simular a erosão do solo. Os autores observaram que as simulações do modelo indicaram baixo impacto do plantio direto sobre a erosão. Eles consideraram essencial tomar medidas complementares para aumentar a cobertura vegetal, de modo que sejam abreviadas significativamente as perdas de solos nessas áreas rurais.

Além de utilizar os modelos hídricos com o intuito de comparar as suas efetividades, modelos também foram desenvolvidos por meio de leis e equações gerais para corresponder ainda mais ao perfil da área agrícola submetida ao estudo. Como é o caso do trabalho de Tao, Wu e Wang (2017), no qual objetivaram desenvolver um modelo matemático que descrevesse a erosão por escoamento e a perda de nutrientes sob quatro padrões de chuva.

Os autores partiram da equação governamental, a Equação (1), em que descrevem o processo físico do transporte da água em uma dada distância  $x$  ao longo do fluxo de escoamento e o tempo  $t$ . Isto é, o que choveu menos o que infiltrou, é o que escoou.

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = r_e - f, \quad (1)$$

em que  $q$  é a descarga unitária ( $\text{cm}^2 \text{cm}^{-1}$ );  $h$  a profundidade de escoamento (cm);  $f$  a taxa de infiltração ( $\text{cm min}^{-1}$ ) e  $r_e$  a intensidade de chuva. Além disso, também foi utilizada a equação de convecção-dispersão (Equação (2)), em que explica o transporte de soluto no perfil do solo  $z$ .

$$\frac{\partial R c_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_s \frac{\partial c_s}{\partial z} - v c_s \right], \quad (2)$$

em que  $R$  é o fator de retardamento;  $c_s$  a concentração de soluto ( $\text{Mg L}^{-1}$ );  $v$  a velocidade média de poro-água ( $\text{cm min}^{-1}$ ) e  $D_s$  o coeficiente de dispersão do soluto no solo ( $\text{cm min}^{-1}$ ).

Com isso, os autores encontraram a solução (Equação (3)) para determinar a perda de solo por escoamento superficial, por meio de condições iniciais e de contorno:

$$s_l(t) = \exp\left(\int_{t_p}^t \frac{f(t) - r_e}{h(t)} dt\right) \left(\int_{t_p}^t \frac{(a\gamma J h(t) + br_e^2) \exp\left(\int_{t_p}^t \frac{r_e - f(t)}{h(t)} dt\right)}{\rho h(t)} dt\right), \quad (3)$$

sendo  $s_l$  a concentração de sedimento ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $l$  a declividade do terreno (cm);  $t_p$  o tempo de alagamento;  $a$  a constante de calibração para erosão por escoamento;  $b$  a constante para erosão por respingo;  $\gamma$  a densidade aparente da água ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $J$  o declive hidráulico e  $\rho$  a densidade aparente do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

Dentre essas variáveis, pode-se destacar a declividade do terreno e a densidade aparente do solo, em que determinam a característica da área agrícola. Tais variáveis, por sua vez, podem ser manipuladas pelo uso e manejo do solo.

A Equação (4) mostra a solução para determinar a camada de água que percorre por escoamento superficial, dependendo da rugosidade da superfície. Para obter esta equação, foi utilizado o modelo de Philips de infiltração.

$$h_l(t) = \left(\frac{1}{n} J^{\frac{1}{2}}\right)^{-\frac{3}{5}} \left((1-c)l\left(r_e - \frac{1}{2}S(t - \Delta t)^{-\frac{1}{2}}\right)\right)^{\frac{3}{5}} \quad t > t_p, \quad (4)$$

sendo  $h$  a profundidade de escoamento (cm);  $n$  o coeficiente de rugosidade de Manning;  $J$  o gradiente hidráulico ( $\text{s m}^{-1/3}$ );  $S$  a adsorção ( $\text{cm min}^{-0,5}$ ) e  $c$  a concentração de soluto ( $\text{Mg L}^{-1}$ ).

E, por fim, na Equação (5) apresenta a perda de nutrientes por escoamento:

$$c_{rl}(t) = \left(\int_{t_p}^t \frac{kc_e(t) \exp\left((k + r_e) \left(\int_{t_p}^t \frac{dt}{h(t)}\right)\right)}{h(t)} d(t)\right) \exp\left(- (k + r_e) \left(\int_{t_p}^t \frac{dt}{h(t)}\right)\right) \quad (5)$$

em que  $c_{rl}$  é a concentração de soluto no escoamento ( $\text{Mg L}^{-1}$ );  $k$  o coeficiente de transferência de massa convectiva ( $\text{cm min}^{-1}$ )  $c_e$  a concentração de soluto na superfície do solo ( $\text{Mg L}^{-1}$ ).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e descrição da área de estudo

O trabalho foi realizado na área experimental do Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR - polo regional de Santa Tereza do Oeste – PR. O relevo local é suavemente ondulado, com declividade variando de 0,21 a 5,41%. O clima da região é caracterizado como subtropical mesotérmico superúmido com temperatura média anual em torno de 19 °C (LIMA; SANTOS; SIQUEIRA, 2012) e a pluviosidade média anual variando entre 1.800 a 2.000 mm (WREGE et al., 2012). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico, com textura argilosa a muito argilosa (EMBRAPA, 2018).

As coletas foram realizadas durante a safra 2017/2018 com a cultura de soja sobre a palhada de crambe em SPD. As proporções relativas das frações areia, silte e argila nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m foram analisadas por meio do método da pipeta como mostra a Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição granulométrica<sup>1</sup> do solo nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m da área experimental do IAPAR/Santa Tereza (valores médios de 3 repetições)

Camada (m)	Granulometria		
	Areia	Argila	Silte
	----- g kg <sup>-1</sup> -----		
0,0-0,1	44,9	561,1	394,1
0,1-0,2	38,7	641,9	319,4
0,2-0,3	24,7	706,2	269,1
Média	36,1	636,4	327,5

<sup>1</sup> Método da pipeta, conforme USDA-Soil Conservation Service. Soil Survey Investigations Report n.1. Whashington, 1972. 63 p.

A caracterização química do solo é apresentada na Tabela 2, por meio de amostras deformadas das camadas 0-0,5; 0,5-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m de cada tratamento e duas repetições. As análises foram feitas em laboratório de solos do IAPAR/Santa Tereza do Oeste.

**Tabela 2.** Caracterização química do solo nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m da área experimental (valores médios de todos os tratamentos)

Camadas (m)	pH	P	C	MO	Al <sup>3+</sup>	H+Al	Ca	Mg	K	SB	T	V
	CaCl <sub>2</sub>	(Mg dm <sup>-3</sup> )	(g dm <sup>-3</sup> )	(cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )								(%)
0-0,05	5,4	38,3	32,0	55,1	0,0	4,9	6,8	2,7	1,0	10,4	15,3	67,7
0,05-0,10	5,1	27,2	27,9	48,1	0,1	6,6	4,9	2,2	0,7	7,7	14,3	53,5
0,1-0,20	4,8	26,4	25,6	44,1	0,3	7,9	3,7	1,7	0,5	5,9	13,8	42,8
0,20-0,40	4,6	9,2	22,8	39,2	0,5	8,5	2,6	1,4	0,4	4,4	12,9	33,9

SB: soma das bases; T: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases.

### 3.2 Tratamentos e delineamento experimental

Em 12 parcelas foram implantadas espécies de cobertura vegetal após o cultivo da soja, sendo 6 de verão e 6 de inverno e três sistemas com diferentes sistemas de manejo (plantio direto tradicional (testemunha), plantio direto gessado e plantio direto escarificado). Os quinze primeiros tratamentos são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Quinze primeiros tratamentos do experimento com as espécies “recuperadoras” de estrutura implantadas após o cultivo da soja

Notação	Tratamentos
Espécies de cobertura/consórcios de verão	
T1	Milheto
T3	Guandu anão
T8	<i>Crotalaria juncea</i>
T9	Feijão guandu
T10	<i>Crotalaria spectabilis</i>
T13	Mucuna preta
Espécies de cobertura/consórcios de inverno	
T2	Aveia branca
T4	Aveia preta
T6	Centeio
T7	Aveia preta + nabo forrageiro
T12	Aveia preta + tremoço branco
T14	Aveia preta + ervilha forrageira
Sistemas de uso e manejo	
T5	Sistema plantio direto com escarificação até 0,3 m de profundidade
T11	Sistema plantio direto com aplicação de 3 t ha <sup>-1</sup> de gesso em superfície
T15	Sistema plantio direto tradicional (Testemunha)

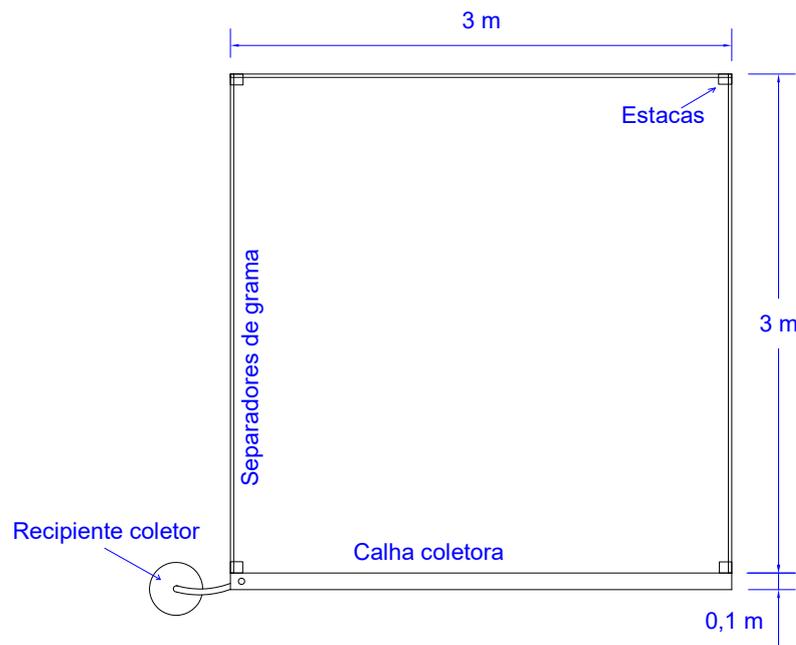
Como o projeto é de longa duração, foi observado em pesquisas anteriores que o solo é considerado de alta qualidade, resultando em tratamentos homogêneos. Assim, foi elaborada uma faixa compactada para todos os tratamentos, exceto T5, por meio do rolo compactador para diversificar os valores dos parâmetros físicos do solo

e aumentar o repertório numérico para a modelagem matemática. Totalizando, dessa forma, 29 tratamentos (compactados com não-compactados). A Figura 1 representa um croqui da área experimental, mostrando as posições de cada tratamento e as faixas compactadas.



**Figura 1.** Croqui da área experimental com os seus respectivos tratamentos e faixas compactadas (área rachurada).

Foram construídas 29 calhas coletoras, uma em cada tratamento, com as áreas delimitadas em  $9 \text{ m}^2$  ( $3,0 \times 3,0 \text{ m}$ ) por separadores de grama conforme a Figura 2, quando foram monitoradas as perdas de água, solo e nutrientes ocorridas durante as chuvas naturais. As calhas são de material PVC de 3 metros de comprimento e 0,1 m de diâmetro. Foram alocadas no sentido da declividade do solo, de modo que a água escoada possa alcançar até os recipientes de 25 litros (bombonas plásticas) em um nível abaixo da superfície, aos quais foram conectados às calhas por meio de mangueiras corrugadas  $\frac{3}{4}$ ".



**Figura 2.** Modelo das calhas coletoras e suas medidas.

O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso, sendo os 29 tratamentos incluindo as faixas compactadas e os 20 eventos sucedidos de precipitações ao longo do ciclo da soja representando as repetições.

### 3.3 Determinação das propriedades físicas

Antes da semeadura da soja e após a sua colheita, foram coletadas, em dois pontos por cada tratamento, amostras de solo indeformadas em três camadas de solo (0-10, 10-20 e 20-30 cm). Já as amostras para análises químicas dos macronutrientes foram coletadas nos mesmos dois pontos em quatro profundidades (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm). Os materiais utilizados foram por meio de anéis volumétricos de aço inox com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, extratores e martelos pedológicos.

No Laboratório de Física do Solo (LAFIS) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus Cascavel, foi avaliada a densidade do solo, a macro, micro e a porosidade total. A granulometria foi determinada pelo método da pipeta em dispersão em água e em hidróxido de sódio. A condutividade hidráulica do solo saturado foi calculada utilizando o permeâmetro de carga constante, conforme metodologia preconizada por Embrapa (1997).

Para se determinar a densidade do solo, foi utilizada a Equação (1), em que a massa do anel e o seu volume são conhecidos.

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_c} \quad (1)$$

sendo  $D_s$  a densidade aparente do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $M_{ss}$  a massa do solo seco (g) e  $V_c$  o volume do anel ( $\text{cm}^3$ ).

Referente à densidade de partícula, é manifestada como a relação entre a massa do solo seco e o volume ocupado pela fração sólida sem considerar a sua porosidade. Por meio do método do balão volumétrico, uma amostra de 20 gramas de solo seco é alocada a um balão de 50 mL, completando-se com álcool etílico. Após agitação, é observada a diferença entre o volume do balão e o volume de álcool, como descrito na Equação (3.2):

$$D_p = \frac{M_{ss}}{50 - V_a}, \quad (2)$$

em que  $D_p$  é a densidade de partícula ( $\text{g cm}^{-3}$ ) e  $V_a$  o volume de álcool gasto ( $\text{cm}^3$ ).

A porosidade é avaliada separando-se os macros e microporos pela sucção a 0,6 m.c.a. em coluna de areia, o que leva a uma drenagem de água dos macroporos. E, assim, após medir o volume remanescente de água na amostra, tem-se o volume dos microporos. Contudo, as equações para os volumes de macroporos (*Macro*), microporos (*Micro*) e porosidade total  $P_t$ , expressos em porcentagem, são mostradas a seguir:

$$Macro = P_t - Micro, \quad (3)$$

$$Micro = \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \times 100, \quad (4)$$

$$P_t = 1 - \frac{D_s}{D_p} \times 100, \quad (5)$$

em que  $M_{su}$  é a massa do solo úmido (g).

Sobre a condutividade hidráulica, é controlado um dado tempo para observar a infiltração das amostras saturadas em permeâmetro de carga constante. Portanto, o cálculo é realizado com a seguinte equação:

$$K_{sat} = \frac{V_a L}{A t_{ksat} (h + L)}, \quad (6)$$

em que  $K_{sat}$  é a condutividade hidráulica ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $V_a$  o volume de água percolado ( $\text{m}^3$ ) durante o tempo  $t_{ksat}$  (s);  $L$  o comprimento da amostra (m);  $A$  a área da seção transversal da amostra ( $\text{m}^2$ ) e  $h$  o potencial de pressão no topo da amostra (m).

### **3.4 Coleta de água, solo e nutrientes**

Ao todo, foram realizadas 20 coletas sucedidas entre os dias 08/11/2017 a 10/02/2018. Fixando-se um horário do dia para coletar, o conteúdo armazenado nas bombonas foram homogeneizados e quantificados por meio de provetas graduadas. Além disso, a cada parcela de 9,3 m<sup>2</sup> – considerando os 0,3 m<sup>2</sup> da calha de PVC – foi retirado 500 mL do conteúdo das bombonas em garrafas pet, sendo que 50 mL foram destinados à quantificação do solo no LAFIS e os conteúdos restantes à análise de nutrientes em laboratório de IAPAR.

Para quantificar as perdas de solo, foram retiradas subamostras de 50 mL homogeneizadas e colocadas na estufa a 105 °C a fim de que a água evaporasse e restasse apenas a massa seca do solo. Por meio disso, foram estimadas as perdas equivalentes para um hectare, utilizando das conversões de unidades e medidas.

No tocante às perdas de nutrientes, foram analisadas em cada amostra concentrações de P, K, Ca e Mg. As análises de P e K foram realizadas no laboratório de solos do IAPAR – Santa Tereza do Oeste conforme metodologia preconizada pela Embrapa (1997), e com o uso do extrator Melich, enquanto as análises de Ca e Mg no laboratório de UNIOESTE – Campus Cascavel por meio da leitura direta em absorção atômica.

### **3.5 Coleta de palha e cobertura verde**

No caso da coleta de palha, feita com periodicidade de 15 dias, foi jogada aleatoriamente uma armação quadrangular de 30x30 cm na parcela experimental. Após isso, foi coletada toda a palha no interior da armação, fazendo-se duas repetições por parcela, totalizando-se oito coletas. O material foi colhido em sacos de papel kraft identificados. Por fim, foram pesadas as amostras de palha após colocadas na estufa a 65 °C até massa constante.

E sobre a coleta da cobertura verde, foram escolhidos dois pontos aleatórios para se colocar em cima da cobertura foliar da soja uma armação quadrangular de 1 m<sup>2</sup>. Por meio de um bastão para câmera, foi tirada uma foto de modo que o retrato enquadrasse toda a armação. Assim, tal foto foi recortada digitalmente para, em seguida, passar por uma leitura do software *Canopeo* (CANOPEO APP, 2018), o qual

processa valores em porcentagem referentes à cobertura vegetal, captando apenas a coloração verde da área coletada.

### 3.6 Dados de declividade das parcelas

Para os dados de declive para cada parcela experimental, foram utilizados régua e nível com tripé. Por intermédio de cotas, foi medida a altura de quatro pontos localizados nos cantos de cada parcela. Por consequente, os valores em porcentagem dos declives foram calculados pela seguinte relação:

$$Dec = \frac{|h_A - h_B|}{d_{AB}} \times 100, \quad (7)$$

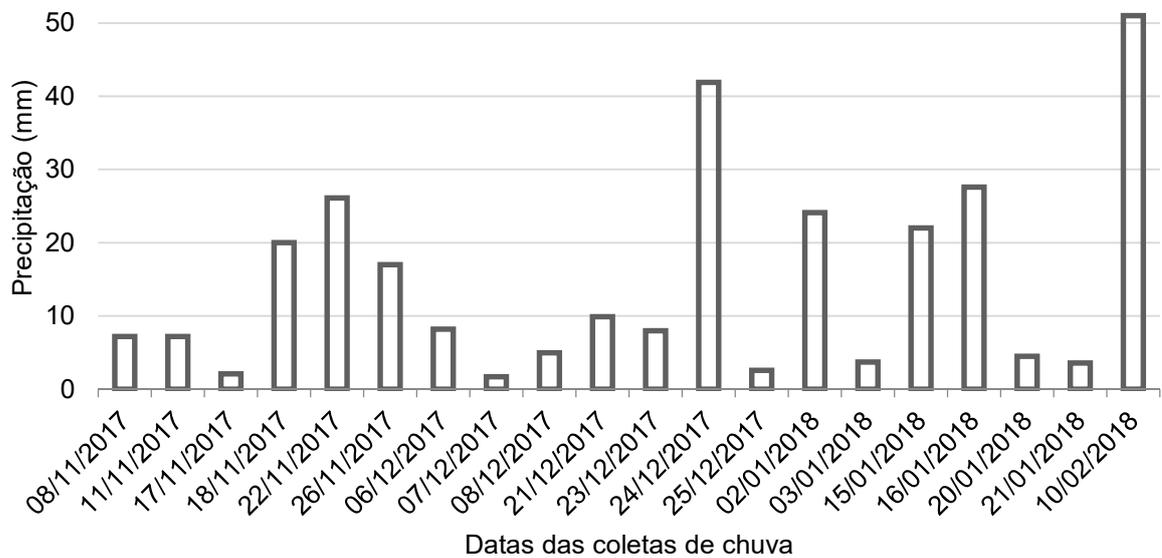
em que *Dec* representa a declividade do terreno (%);  $h_A$ ,  $h_B$  as alturas dos pontos A e B (m), respectivamente e  $d_{AB}$  a distância paralela ao nível entre A e B (m).

### 3.7 Semeadura e colheita da soja

Em relação aos tratos culturais, a semeadura da soja foi realizada em 11/10/17 em toda área experimental. Já a colheita foi feita em 26/02/18 por meio de colhedora mecânica. A cultivar da soja utilizada foi a Lança IPRO. A semeadura foi realizada mediante 15 sementes por metro linear e espaçamento de 45 cm entre linhas. Além disso, antes da colheita, a adubação consistiu em 300 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 08-22-08, mais 6% de Ca e 9% de S. A aplicação de calcário foi realizada em 20/09/17, a escarificação (T5) em 06/10/17 e a aplicação do gesso (T11) em 11/10/17.

### 3.8 Dados pluviométricos durante o ciclo da soja

As informações a respeito dos dados climatológicos, em especial os de precipitação pluviométrica, foram obtidas com o auxílio da estação meteorológica que o IAPAR dispõe na Unidade de Santa Tereza/PR. As precipitações diárias em que houve coleta de dados durante o ciclo da soja são apresentadas na Figura 3.



**Figura 3.** Precipitação acumulada durante os dias da coleta.

Para a modelagem matemática, foram utilizados dados de altura de precipitação (mm) de hora em hora. Após isso, foi selecionado apenas o valor máximo para cada dia de chuva, pois é a intensidade máxima que gera força cisalhante para desagregar o solo e promover as perdas de solo, água e nutrientes por escoamento superficial.

### 3.9 Análise estatística

Para a análise dos dados, recorreu-se ao software R Studio (R CORE TEAM, 2015) para determinar a média, mediana, variância, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e análise de variância. Para a comparação de médias, foi feito o uso do teste de Tukey e de Scott-Knott a 5% de significância.

### 3.10 Modelagem matemática

Foram gerados modelos de regressão que relacionaram o comportamento de variáveis de interesse aos estudos e, especificamente, àquelas que mais influenciam na perda de água, solo e nutrientes, tais como: densidade do solo ( $D_s$ ), macroporosidade ( $Macro$ ), massa seca da palha ( $M_{sp}$ ) e cobertura verde ( $Cob$ ). Como

a intensidade de chuva afetou significativamente os valores das perdas, foi considerada como a variável mediadora para todos os parâmetros.

O software STATISTICA (STATSOFT, 2011) foi utilizado para a geração dos ajustes à modelagem e seus respectivos gráficos. No processo de ajuste de curvas, foi utilizado o Método de Levenberg-Marquardt, sendo um procedimento de otimização para o Problema dos Quadrados Mínimos não Linear. Tal metodologia foi derivada do método de Newton, por Levenberg (LEVENBERG, 1944) e aperfeiçoado por Marquardt (MARQUARDT, 1963).

Assim sendo, os modelos da perda de água (*P.água*) foram ajustados por uma função polinomial de grau 1 de duas variáveis do tipo:

$$P.água(Int, f) = a \cdot Int + b \cdot f + c \quad (9)$$

em que *Int* é a intensidade máxima de chuva para cada evento de precipitação, *f* os parâmetros físicos conhecidos mediante as observações em campo a serem considerados na modelagem, enquanto *a*, *b* e *c* são constantes definidas por meio de ajustes.

Já em relação aos modelos da perda de solo (*P.solo*), perda de magnésio (*P.magnésio*), perda de cálcio (*P.cálcio*), perda de potássio (*P.potássio*) e perda de fósforo (*P.fósforo*), a função que melhor se ajustaram aos dados observados foi uma exponencial do tipo:

$$P(Int, f) = a \cdot \exp(b \cdot Int) + c \cdot f + d \quad (10)$$

em que *P* é a função referente às perdas e *d* também uma constante obtida por meio de ajustes.

Em intensidades de chuva iguais a zero, as perdas são necessariamente nulas, visto que, no momento em que não ocorre precipitação, não acontece o escoamento superficial. Com isso, de forma algébrica, a condição inicial das perdas é dada como:

$$P(0, f) = 0. \quad (11)$$

Portanto, as curvas devem passar, para todo valor de *f*, no valor zero da variável resposta. Por esta razão, foi feita a escolha da função exponencial como modelo padrão de todas as modelagens, à exceção da perda de água, que teve um comportamento linear para todos os casos.

Referente aos parâmetros físicos considerados na modelagem, os valores de densidade de solo e macroporosidade foram compostos pelas médias das camadas de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm e médias dos anos de 2017 com 2018, sendo 29 tratamentos ao todo.

A respeito da massa seca da palha, foram estimados valores para cada dia de coleta de chuva por meio da construção de submodelos. Por conseguinte, foi estabelecido para cada data da coleta de palha, a quantidade de dias que se passou após a semeadura da soja.

Após isso, por meio do Método dos Quadrados Mínimos, foram ajustados os valores das coletas à uma função polinomial de grau 3 do tipo:

$$Msp(t) = a \cdot t^3 + b \cdot t^2 + c \cdot t + d \quad (12)$$

em que  $t$  representa a quantidade de dias que se passou após a semeadura da soja. A justificativa para se usar um polinômio de grau 3, é que ele foi ajustado adequadamente aos dados, considerando-se a métrica do  $R^2$ , e mostrou uma tendência representativa em função do tempo.

Sobre a cobertura verde – apresentada em forma de porcentagem – também foram estimados valores para cada dia de coleta. As condições inicial e final para a geração dos modelos podem ser representadas como:

$$Cob(0) = Cob(135) = 0 \quad (13)$$

Indicando que no dia da semeadura e no dia em que apresentou a secagem completa das folhas de soja (135 dias após a semeadura), respectivamente, a cobertura verde da soja é equivalente a 0%. Apesar dessas restrições, foi observado que nenhum polinômio satisfaz à condição física de:

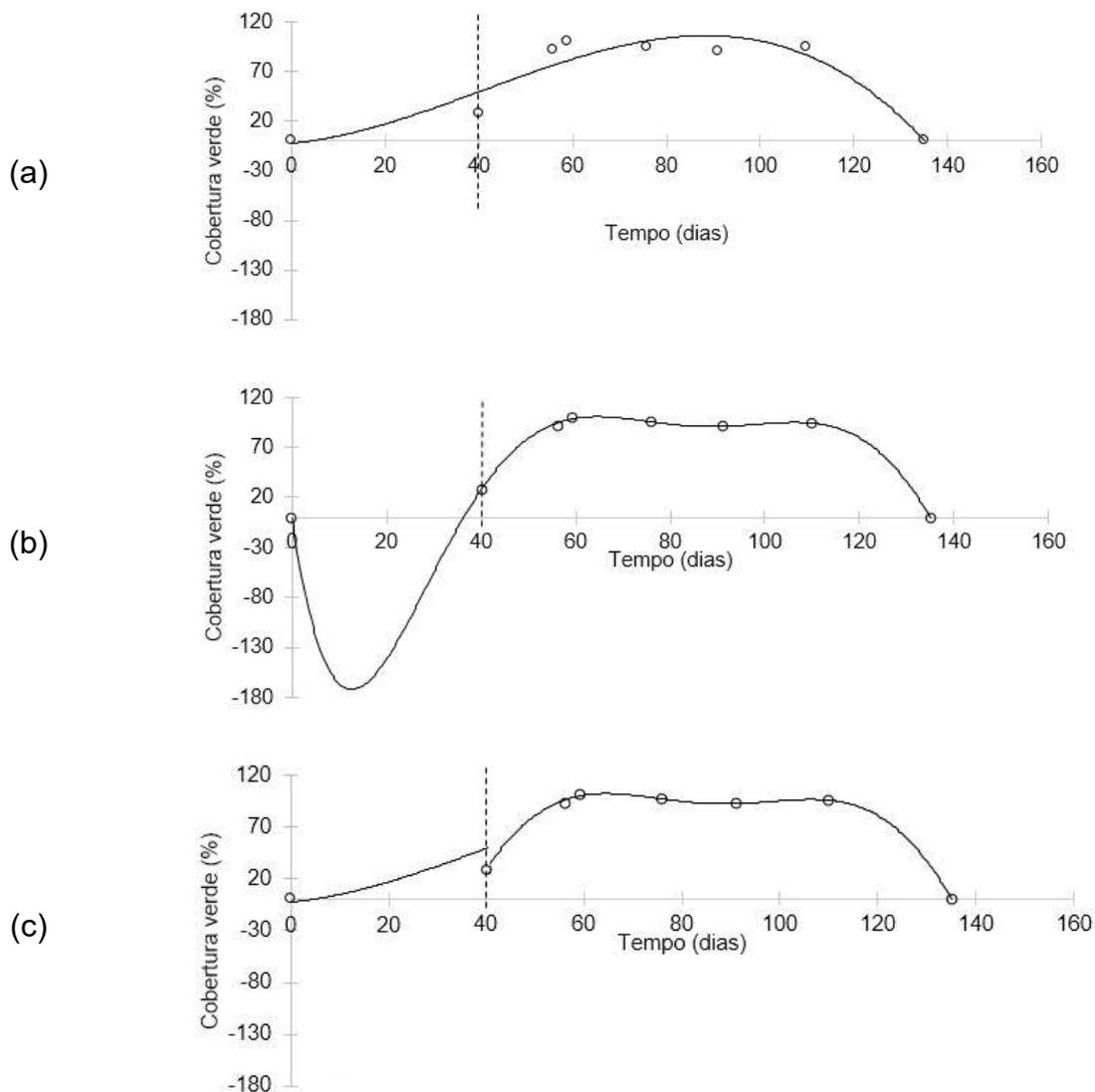
$$0 \leq Cob(t) \leq 100 \quad (14)$$

Além disso, simultaneamente, apresentou uma linha de tendência com sentido físico para o crescimento da cobertura ao longo do tempo.

Portanto, o método escolhido, que foi verificado ser mais próximo aos dados, foi a utilização de uma função definida por partes como:

$$Cob_{\tau}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{n_1} a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^{n_2} b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases} \quad (15)$$

sendo  $\tau$  o número do tratamento,  $n_1$  o grau do polinômio referente ao modelo antes do 40º dia e  $n_2$  o grau do polinômio referente ao modelo depois do 40º dia. Dessa forma, apresentaria uma tendência antes dos 40 dias, com uma curva representando um crescimento gradual da cobertura e uma outra tendência para depois dos 40 dias, com uma curva representando a estabilidade da cobertura com o tempo e seu decréscimo (Figura 4).



**Figura 4.** Exemplo de submodelo para cobertura verde. (a) função polinomial de grau 3 para os primeiros 40 dias; (b) função polinomial de grau 6 para depois dos 40 dias e (c) função definida por partes com a junção das duas funções.

Considerando as modelagens realizadas, empregou-se, além do coeficiente de determinação  $R^2$ , a avaliação da acurácia dos modelos de regressão, a métrica do erro relativo sobre os dados coletados com os valores estimados pela seguinte forma:

$$ER\% = \left| \frac{v_{obs} - v_{est}}{v_{est}} \right| \times 100 \quad (16)$$

em que  $v_{obs}$  representa o valor observado e  $v_{est}$  o valor estimado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Propriedades físicas do solo

Os resultados das propriedades físicas do solo da área experimental são apresentados na Tabela 4, com o teste de Scott-Knott a 5% de significância. Verificou-se diferença significativa entre os tratamentos para todos os parâmetros físicos, com notável diferença entre parcelas compactadas e não compactadas.

**Tabela 4.** Valores médios da densidade do solo (Ds), Porosidade total (PT), macroporosidade (Macro), Microporosidade (Micro) e condutividade hidráulica saturada (Ksat) para cada tratamento de solo não compactado e compactado (C)

TRAT	Ds (g cm <sup>-3</sup> )	PT (%)	Macro (%)	Micro (%)	Ksat (mm h <sup>-1</sup> )
1	1,04 b	59,91 a	15,39 A	44,52 a	66,18 c
2	1,05 b	59,82 a	14,58 A	45,23 a	41,31 d
3	1,07 b	58,73 a	14,66 A	44,08 a	45,05 d
4	1,08 b	58,49 a	13,94 B	44,54 a	33,56 e
5	1,05 b	59,54 a	14,06 B	45,48 a	140,48 a
6	1,09 b	58,00 a	15,85 A	42,15 b	101,15 b
7	1,10 b	57,90 a	14,63 A	43,27 b	66,19 c
8	1,12 a	57,16 b	14,66 A	42,49 b	46,61 d
9	1,07 b	58,80 a	15,21 A	43,59 b	71,21 c
10	1,09 b	58,26 a	14,29 B	43,97 a	38,93 e
11	1,06 b	59,16 a	13,99 B	45,16 a	105,85 b
12	1,08 b	58,40 a	13,55 B	44,86 a	48,22 d
13	1,08 b	58,65 a	13,83 B	44,82 a	62,24 c
14	1,13 a	56,78 b	13,89 B	42,89 b	51,57 d
15	1,12 a	57,16 b	15,70 A	41,47 b	63,00 c
1C	1,13 a	56,26 b	12,70 C	43,56 b	26,94 e
2C	1,16 a	55,13 b	12,03 C	43,09 b	9,71 e
3C	1,12 a	56,66 b	12,72 C	43,94 a	34,83 e
4C	1,15 a	55,46 b	11,19 D	44,26 a	14,78 e
6C	1,14 a	55,82 b	12,44 C	43,38 b	27,99 e
7C	1,11 a	57,01 b	13,27 B	43,74 b	15,95 e
8C	1,11 a	57,10 b	12,70 C	44,40 a	37,75 e
9C	1,12 a	56,57 b	11,39 D	45,18 a	57,49 c
10C	1,11 a	57,02 b	10,18 D	46,84 a	9,89 e
11C	1,10 b	57,51 b	11,42 D	46,09 a	43,94 d
12C	1,14 a	56,08 b	11,31 D	44,78 a	16,27 e
13C	1,11 a	57,02 b	11,28 D	45,73 a	25,72 e
14C	1,16 a	55,42 b	13,51 B	41,91 b	32,99 e
15C	1,15 a	55,52 b	13,26 B	42,26 b	22,40 e

Médias de tratamentos seguidas por letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Como a ordem das letras é de maior valor ao menor, evidenciou-se uma proporção entre as propriedades físicas ao considerar cada tratamento como um dado numérico. Assim, foi possível observar que tratamentos de menores valores de densidades apresentaram maiores valores de porosidade total e maiores em macroporosidade (Tabela 4).

A densidade é uma propriedade importante, sendo usualmente empregada como indicador de qualidade do solo (AULER et al., 2017). As médias de densidade do solo variaram de 1,04 a 1,16 g cm<sup>-3</sup> (Tabela 4). Apesar da compactação, os valores não ultrapassaram o limite que restringe o crescimento das raízes em solos argilosos, que é entre 1,30 e 1,40 g cm<sup>-3</sup> (REICHER; REINERT; BRAIDA, 2003).

De acordo com Oliveira, Lima e Verburg (2015), a porosidade total também é um importante indicador de qualidade do solo, pois o maior volume de poros indica que o solo sofreu baixa alteração por motivo do tráfego de máquinas agrícolas. Os resultados mostraram que a porosidade do solo está adequada para o crescimento das plantas, visto que a porosidade de aeração mínima é de 10% (XU; NIEBER; GUPTA; 1992). O menor valor médio da macroporosidade foi de 10,18%, muito próximo do limite conveniente.

Observa-se na Tabela 5 a característica topográfica de cada tratamento. Por meio dos valores, foi possível indicar que o maior declive foi de 5,41% no tratamento 15 não compactado e o menor foi de 0,21% no tratamento 2 compactado. De acordo com Guimarães, Valladares e Martins (2016), o terreno seria classificado como relevo plano (declividade menor que 3%) e suavemente ondulado (declividade entre 3 e 8%), apresentando-se como adequado ao uso agrícola.

**Tabela 5.** Valores das declividades referente a cada parcela experimental

Tratamentos	Declive (%)	
	Não compactado	Compactado
1	2,63	1,26
2	1,08	0,21
3	2,08	1,57
4	4,33	4,07
5	1,48	-
6	1,02	2,23
7	1,29	1,02
8	3,58	3,55
9	0,89	0,42
10	0,72	0,25

**Tabela 5.** Continuação

Tratamentos	Declive (%)	
	Não compactado	Compactado
11	2,02	1,65
12	3,39	2,78
13	5,09	2,86
14	3,99	3,56
15	5,41	4,37

#### 4.2 Intensidade máxima de chuva por evento de precipitação

Os valores de intensidade máxima de chuva para cada data de coleta de escoamento são apresentados na Tabela 6. O pico da intensidade de chuva mais alta ocorreu em 24/12/17, com 24,8 mm h<sup>-1</sup>. Enquanto a intensidade mais baixa foi de 1,1 mm h<sup>-1</sup> em 07/12/17. A maior quantidade de dias de coleta ocorreu no mês de dezembro, seguido pelo mês de novembro e janeiro. No mês de fevereiro, foram realizadas poucas coletas, pois ocorriam chuvas fracas, chegando a não ocorrer escoamento em razão do largo tamanho das folhas de soja, cobrindo todo o solo da área experimental.

**Tabela 6.** Intensidade máxima de chuva para cada evento de precipitação

Data de coleta	Dias após a semeadura da soja	Intensidade máxima de chuva (mm h <sup>-1</sup> )
08/11/2017	28	5,4
11/11/2017	31	3,2
17/11/2017	37	1,5
18/11/2017	38	4,9
22/11/2017	42	18,9
26/11/2017	46	8,7
06/12/2017	56	8,1
07/12/2017	57	1,1
08/12/2017	58	3
21/12/2017	71	3,8
23/12/2017	73	7,4
24/12/2017	74	24,8
25/12/2017	75	1,4
02/01/2018	83	11,6
03/01/2018	84	1,4
15/01/2018	96	6,9
16/01/2018	97	11,6
20/01/2018	101	2,6
21/01/2018	102	1,8
10/02/2018	122	14,2

### 4.3 Estatística descritiva

A Tabela 7 apresenta a estatística descritiva das perdas de água, solo e nutrientes para todos os tratamentos e dias de coleta. As médias representam, portanto, as perdas aproximadas para cada tratamento e coleta de chuva, podendo estimar as perdas acumuladas para um determinado tempo realizando a operação multiplicativa, como pode ser visto na seção 4.7 do trabalho.

**Tabela 7.** Estatística descritiva das perdas de água, solo e nutrientes

	<b>Água (L/ha)</b>	<b>Solo (kg/ha)</b>	<b>Magnésio (kg/ha)</b>	<b>Cálcio (kg/ha)</b>	<b>Potássio (kg/ha)</b>	<b>Fósforo (kg/ha)</b>
<b>Mín.</b>	107,50	0,01548	4,09E-06	0,00061	0,00629	0,0002613
<b>Q1</b>	2151,00	0,5419	1,96E-03	0,00713	0,0629	0,001919
<b>Q2</b>	4086,00	1,603	3,81E-03	0,01542	0,1401	0,004095
<b>Méd.</b>	7247,00	7,882	9,47E-03	0,04369	0,5459	0,1026
<b>Q3</b>	10220,00	6,115	9,32E-03	0,04565	0,3321	0,008597
<b>Máx.</b>	26880,00	205,3	7,08E-02	0,57980	11,19	0,2356
<b>S</b>	7292,26	20,32886	1,69E-04	0,06996	1,526011	0,022775
<b>S<sup>2</sup></b>	53176984	413,2627	1,37E+02	0,00489	2,32871	0,00052
<b>CV</b>	100,63	257,9274	137,336	160,15250	279,5493	221,9226
<b>Ass.</b>	1,30	0,926614	100,300	1,21221	0,79777	12,97559
<b>K</b>	0,19	0,166629	0,122	0,16119	0,36064	0,19506

Mín: mínimo; Q1: 1º quartil; Q2: 2º quartil ou mediana; Méd.: média; Q3: 3º quartil; Máx.: máximo; S: desvio padrão; S<sup>2</sup>: variância; CV: coeficiente de variação; Ass.: assimetria; K: curtose.

Observando a tabela, pode-se perceber que o coeficiente de variação para todas as perdas foi bastante elevado, mostrando a sua heterogeneidade por ter utilizado os dias da coleta como repetição. Visto que a estatística descritiva apresentada na tabela é referente aos dados de todas as coletas de chuva, que passaram por intensidades desde baixas até altas. A maior variação foi encontrada em perda de potássio, com 279,5%.

O coeficiente de assimetria para ambos os casos foi positivo, portanto, os valores da média são maiores que as da mediana e, além disso, é esperado que a cauda do lado direito da densidade de probabilidade é maior que o do lado esquerdo. Além disso, a curtose observada foi positiva em todos os casos, evidenciando uma distribuição leptocúrtica, isto é, possui a curva da função de distribuição com um pico mais alto que a distribuição normal.

Isso pode ser visualizado a partir dos boxplots a seguir, que seguem a média dos tratamentos não compactados com os compactados. O Anexo 1 mostra os boxplots das perdas de água, solo, magnésio, cálcio, potássio e fósforo, mostrando a variabilidade e os pontos discrepantes. Apesar das diferenças na variabilidade, a média e mediana ficaram bem próximos entre os tratamentos.

Em razão da baixa resolução das caixas, foram ampliadas para favorecer a visualização dos limites dos quartis. Por conta disso, alguns dos pontos discrepantes estão fora do campo de exibição. As médias apresentaram maiores variações, mas as medianas permaneceram semelhante para todos os tratamentos.

A partir de todos os boxplots apresentados, pode-se perceber que a maioria dos tratamentos apresenta dados assimétricos à direita, pois as medianas estão próximas ao primeiro quartil. Com isso, pode-se afirmar que mais de 50% dos dados de cada tratamento estão mais concentrados no intervalo perto dos seus valores mínimos.

#### **4.4 Análises de variância das perdas**

As análises de variância para as perdas de água, solo e nutrientes podem ser observadas no Anexo 2. De modo geral, não foram identificadas diferenças significativas nas perdas de água, solo e nutrientes entre os tratamentos, o que pode ser justificado pela boa estrutura de solo que a área experimental apresenta.

#### **4.5 Submodelos**

Para gerar os modelos das perdas de água, solo e nutrientes, em função da massa seca da palha e da cobertura verde, foi necessário estimar os valores para cada coleta de chuva. Não foi observado diferença significativa entre os tratamentos pela análise de variância a 5% de significância, como foi apresentado em Anexo 2.

A massa seca da palha e a cobertura verde no solo durante o cultivo da soja é apresentado na Tabela 8. Os dados são valores médios relacionados com todas as coletas obtidas desde o início do ciclo vegetativo da cultura até o seu final.

**Tabela 8.** Valores médios da massa seca da palha e cobertura verde no solo durante todo o cultivo da soja em área compactada (C) e não compactada (NC)

<b>Tratamentos</b>	<b>Massa seca da palha (t ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cobertura verde (%)</b>
1	1,7706 a	67,97 a
2	1,5326 a	67,65 a
3	2,0140 a	68,89 a
4	1,7424 a	66,99 a
5	1,6420 a	65,33 a
6	2,0708 a	67,01 a
7	2,0563 a	68,10 a
8	2,2632 a	70,59 a
9	1,5749 a	67,63 a
10	1,6264 a	68,47 a
11	1,6571 a	68,24 a
12	2,2991 a	69,02 a
13	1,6602 a	68,20 a
14	2,1152 a	67,27 a
15	1,6300 a	67,53 a
1C	1,5083 a	66,51 a
2C	1,4728 a	68,22 a
3C	1,5713 a	69,04 a
4C	1,8622 a	69,97 a
6C	2,1454 a	68,46 a
7C	1,9819 a	67,66 a
8C	2,2213 a	69,01 a
9C	1,7591 a	67,44 a
10C	1,9444 a	69,69 a
11C	2,1843 a	68,82 a
12C	2,1817 a	67,23 a
13C	1,6911 a	68,16 a
14C	2,4083 a	68,19 a
15C	1,5398 a	67,80 a

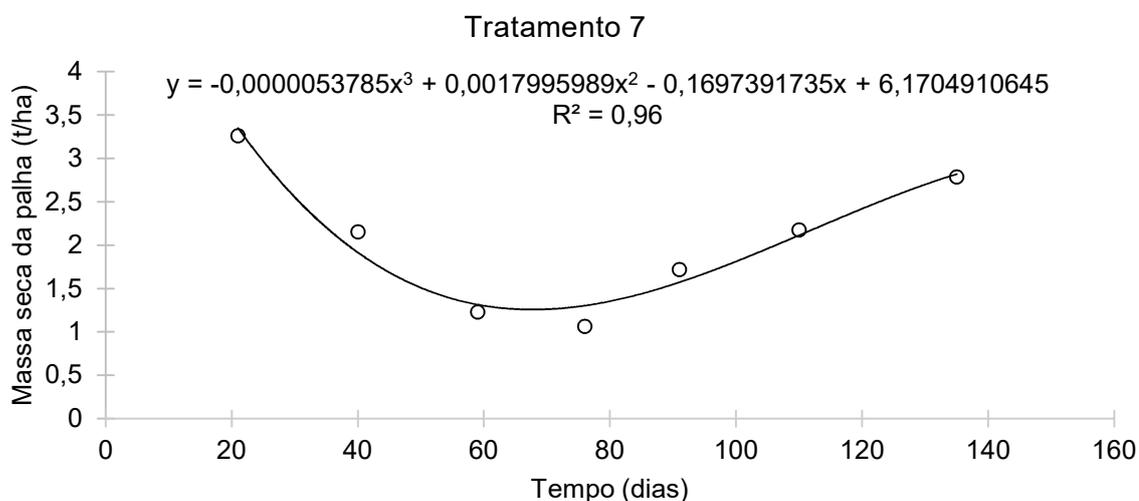
C: tratamentos compactados. Médias de tratamentos seguidas por letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Os submodelos serão apresentados nos próximos tópicos, os quais foram utilizados para simular valores e aplicar em modelos das perdas de água, solo e nutrientes.

#### **4.5.1 Massa seca da palha ao longo do ciclo da soja**

Como citado na Equação (12) da seção 3.10 sobre a modelagem matemática, a função polinomial utilizada foi a de grau 3. Todos os submodelos da massa seca da

palha em função do tempo, para 29 tratamentos, são apresentados no Anexo 3. A Figura 5 mostra um exemplo de submodelo com um alto coeficiente de determinação.



**Figura 5.** Exemplo de submodelo da massa seca da palha ao longo do ciclo da soja. Os dados observados são representados pelos pontos, enquanto a linha de tendência é o resultado da equação mostrada acima.

Além disso, para todos os submodelos, a curva representou de forma plausível o comportamento da massa seca da palha ao longo do ciclo da soja, visto que nos primeiros dias que sucedem a semeadura, o solo é coberto pelos resíduos da cultura anterior (crambe). Assim, com o passar do tempo, a palha vai se decompondo, diminuindo a sua massa conseqüentemente. Após isso, com a proximidade dos últimos estágios vegetativos da soja, os resíduos que cobrem o solo passam a ser da própria soja e aumentam a proporção até a maturação plena.

A garantia de se ter um bom modelo não depende exclusivamente da sua complexidade. A excelência só é alcançada quando se descreve o comportamento das variáveis do problema com a precisão esperada (BORGES; PADOIN, 2006). Dessa forma, a etapa da validação se torna um passo imprescindível.

A Tabela 9 destaca os erros relativos e percentuais referentes aos dados da massa seca da palha ao longo dos ciclos da soja observados com os dados ajustados pelos submodelos. Os maiores erros foram encontrados nos tratamentos 10C e 12C, com o valor de 78,65%, indicando que ainda há espaço para aperfeiçoamento, tanto na técnica de coleta de dados quanto na geração de modelos matemáticos. Por outro lado, o menor erro encontrado foi de 0,08% no tratamento 15C, indicando que este modelo se ajustou de forma convincente.

**Tabela 9.** Erros relativos (%) dos dados da massa seca da palha ao longo do ciclo da soja observados com os dados estimados

Trat.	Dia da coleta	11/10/17	11/10/17	09/12/17	26/12/17	10/01/18	29/01/18	23/02/18
		21	40	59	76	91	110	135
1		5,2341	22,7955	42,5525	21,5016	18,9888	16,1306	1,9819
2		23,9207	44,2289	45,0645	8,3067	0,9196	17,5814	2,8659
3		0,8850	3,3760	25,8872	8,1867	35,2520	23,5280	3,4637
4		0,5677	7,1927	27,1871	36,5241	13,4694	1,4906	0,4940
5		8,5044	34,8297	54,3343	6,7923	35,9567	5,8299	0,4426
6		3,8332	23,0716	31,1605	12,5884	22,7479	4,6913	0,2349
7		2,6636	12,4705	6,4258	18,3135	9,3372	2,8629	1,2110
8		10,5518	38,2959	32,1612	16,2363	4,1669	18,2779	4,5029
9		0,3304	7,9766	38,6842	29,9758	2,9243	6,1848	1,0447
10		6,3730	28,3703	47,1994	25,8947	3,0417	3,5402	0,9557
11		5,9631	24,3323	27,4368	4,4556	6,2767	7,2879	1,9079
12		4,0187	23,3729	55,9151	30,5108	46,0970	27,8035	2,1732
13		6,2405	27,3125	27,5643	21,1104	37,8868	12,6321	0,9297
14		2,8291	9,5739	7,8423	24,6377	13,1907	19,0712	3,4741
15		3,7458	14,8528	27,2775	6,7690	31,2624	18,6212	1,5323
1C		8,1748	35,6831	51,0637	32,9990	14,2186	5,6134	1,1962
2C		8,8943	40,8483	42,1505	9,4924	17,4411	17,0739	3,6442
3C		12,0372	45,0828	37,3556	4,3673	31,5696	35,1094	5,6785
4C		20,5586	54,7389	40,2726	17,8320	13,8186	11,4203	3,4854
6C		9,1178	26,1551	14,8707	26,1538	23,3209	3,1864	2,2637
7C		13,4759	22,7461	0,1345	20,0999	22,3210	35,0984	5,4939
8C		5,8131	4,6947	33,6033	49,4698	3,2991	42,9415	5,3843
9C		23,0191	42,0179	46,4623	16,0976	1,7065	8,9395	1,5706
10C		26,5166	67,0034	66,2884	36,4280	78,3917	10,3665	3,5747
11C		6,7295	26,5292	38,8490	6,4254	25,8091	10,2112	0,1737
12C		26,3251	70,4991	<b>78,6529</b>	3,4198	26,4889	67,8643	7,4601
13C		6,8256	28,0851	35,1983	0,3782	10,4805	4,0947	1,4492
14C		15,4185	58,8377	68,7837	19,2385	24,7931	29,5983	5,3023
15C		22,4656	34,3419	31,9441	7,6525	26,6340	<b>0,0846</b>	1,1047
Mín.		0,3304	3,3760	0,1345	0,3782	0,9196	0,0846	0,1737
Máx.		26,5166	70,4991	78,6529	49,4698	78,3917	67,8643	7,4601

Trat.: tratamentos; Mín.: valor mínimo; Máx.: valor máximo; C: tratamentos compactados.

#### 4.5.2 Cobertura verde ao longo do ciclo da soja

Para a geração dos submodelos da cobertura verde ao longo do ciclo da soja, foi necessário definir uma função geral em que os ajustes devessem cumprir a

condição inicial e final da Equação (13) da seção 3.10. Em que o limite inferior deveria ser 0% e o limite superior 100% para representar valores mais próximos do real.

A Tabela 10 mostra um comparativo entre os valores mínimos e máximos ao utilizar polinômios de grau 3, bem como os polinômios de grau 6 – com alguns tratamentos corrigidos para melhorar a precisão, mudando para grau 5 – mostrando que não satisfazem as condições propostas.

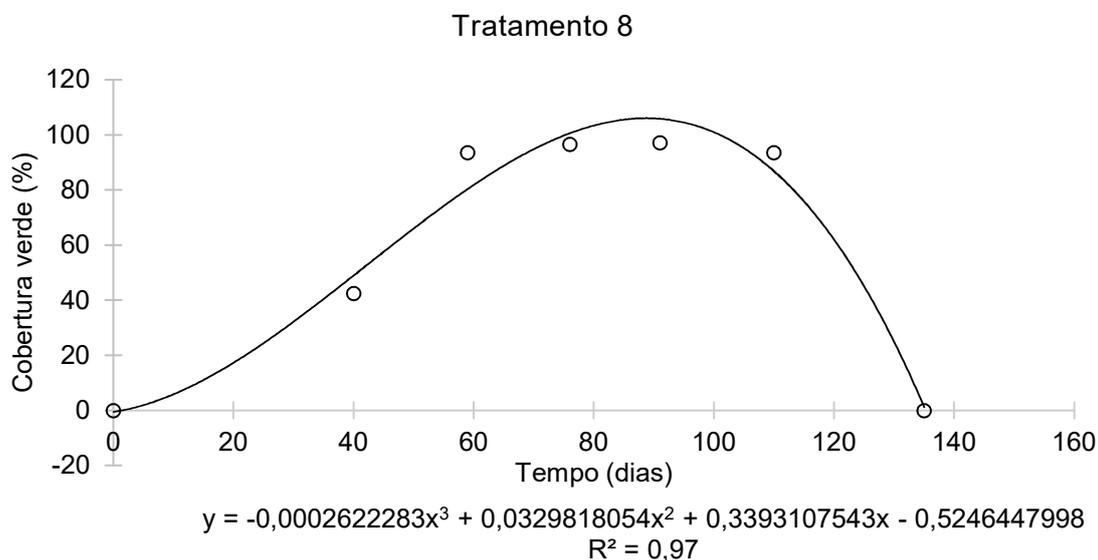
**Tabela 10.** Valores mínimos e máximos da cobertura verde (%) de todos os tratamentos ao longo do ciclo da soja, com valores estimados por funções polinomiais de grau 3 e de grau 6, com alguns tratamentos em grau 5 presentes nas duas colunas da direita

Dias	Polinômio de grau 3		Polinômio de grau 6*	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
28	16,23	32,84	<b>-98,93</b>	<b>-0,03</b>
31	20,83	37,86	<b>-63,18</b>	<b>-9,54</b>
37	30,93	48,16	<b>-22,47</b>	26,90
38	32,70	49,90	8,47	32,32
42	40,00	56,84	18,92	51,71
46	47,50	63,70	38,81	67,29
56	66,32	79,92	55,78	95,80
57	68,15	81,43	85,69	97,25
58	69,97	82,91	87,68	98,45
71	91,11	99,56	89,49	<b>100,06</b>
73	93,79	<b>101,71</b>	93,85	<b>101,98</b>
74	95,06	<b>102,70</b>	93,66	<b>101,25</b>
75	96,28	<b>103,65</b>	93,48	<b>100,77</b>
83	<b>103,17</b>	<b>109,10</b>	91,79	<b>100,22</b>
84	<b>103,73</b>	<b>109,49</b>	91,46	96,65
96	<b>102,72</b>	<b>108,31</b>	90,81	<b>100,89</b>
97	<b>102,05</b>	<b>107,67</b>	88,16	<b>101,38</b>
101	98,51	<b>104,18</b>	88,06	<b>102,42</b>
102	97,40	<b>103,07</b>	88,24	<b>102,36</b>
122	53,62	58,88	52,52	95,27
Mín.	16,23	32,84	-98,93	-9,54
Máx.	103,73	109,49	93,85	102,42

\* Contém alguns tratamentos com a utilização de polinômio de grau 5 para melhorar os ajustes.  
Mín.: valor mínimo; Máx.: valor máximo.

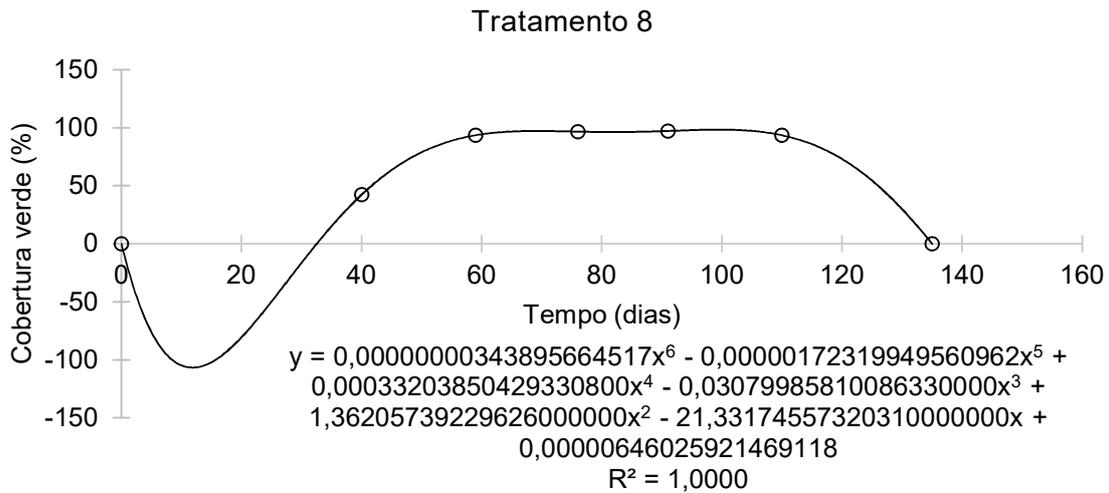
Os dados com os polinômios de grau 3 apresentaram um ótimo ajuste para os primeiros dias. No entanto, após 73 dias, salientaram treze valores que ultrapassaram 100%, com o maior valor em 109,49%. Um exemplo de tratamento pode ser visto na

Figura 6, que representa graficamente o comportamento da linha de tendência com destaque para a curva fora do limite, mesmo com um alto coeficiente de determinação.



**Figura 6.** Exemplo de tratamento em que o modelo apresentou um ótimo ajuste até 40°, mas que ultrapassou o limite de 100% após este tempo.

Nos valores de polinômio com grau 6, dos que ultrapassaram 100%, o máximo foi de 102,42%, que é uma diferença mínima em comparação ao outro polinômio. Apesar disso, cinco tratamentos de polinômio de grau 6 foram corrigidos para grau 5, por conseguir melhorar o ajuste e evitar a ultrapassagem dos 100%. Tais tratamentos foram: Aveia branca (T2), sistema plantio direto tradicional (T5), *Crotalaria juncea* (T10), milho com solo compactado (T1C) e centeio com solo compactado (T6C). Os demais foram considerados, então, como superestimados de forma fictícia.



**Figura 7.** Exemplo de tratamento em que o modelo apresentou um ótimo ajuste após o 40º dia, mas que teve valores negativos nos primeiros dias.

Para solucionar o problema e aproveitar os benefícios de cada grau de polinômio, foi utilizada uma função definida por partes para gerar os submodelos e estimar valores mais próximos do real. Um exemplo de solução dos modelos anteriores é a Equação (17) abaixo:

$$Cob_8(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases} \quad (17)$$

que é uma função definida por partes com a utilização do polinômio de grau 3 até os 40 dias, e polinômio de grau 6 após os 40 dias.

Todos os submodelos da cobertura verde em função do tempo, para 29 tratamentos, são apresentados no Anexo 4. A validação desta modelagem pode ser verificada na Tabela 11, em que o maior erro relativo percentual foi de aproximadamente 11,82%. Por ser um erro baixo, indica que a escolha da função definida por partes foi convincente para estimar os dados da cobertura.

**Tabela 11.** Erros relativos (%) dos dados de cobertura verde observados com os dados estimados com a aplicação de funções definidas por partes

Dia	11/10/17	11/10/17	09/12/17	26/12/17	10/01/18	29/01/18
	40	56	59	76	91	110
1	0,32152125	1,737968306	1,888379376	0,492011107	0,221839774	0,040741739
2	3,87541865	7,177554915	4,242362175	3,593753759	3,480906002	1,048716276
3	0,20793565	1,220830463	1,324511843	0,335862389	0,14855014	0,02800627
4	0,53194596	2,533891901	2,736326835	0,688490205	0,304422772	0,057816695
5	7,09849493	11,81727149	7,374802985	5,249117295	5,287348581	1,603589397
6	8,4887E-06	-	9,90415E-07	1,39488E-06	2,35573E-07	1,68273E-06
7	6,8033E-06	-	1,44108E-06	2,79747E-06	2,6323E-06	4,82311E-06
8	4,2607E-06	-	8,27777E-07	1,03196E-06	5,35514E-07	2,07508E-06
9	0,29293654	1,481126753	1,598101283	0,39229175	0,168431921	0,032244583
10	4,17577872	3,76353243	0,947957355	7,086655472	6,042219341	1,718057319
11	0,47702853	3,592925367	3,935210713	0,990491553	0,415716206	0,079900644
12	0,10704107	0,710099138	0,777720538	0,201642289	0,086049429	0,01566047
13	8,2196E-06	-	8,14369E-07	1,87106E-06	3,00449E-07	3,92298E-07
14	7,1532E-06	-	8,66011E-07	1,29502E-06	5,61835E-07	2,0999E-06
15	7,955E-06	-	1,01415E-06	2,33595E-06	1,17684E-06	2,12228E-06
1C	6,68464464	6,414804902	0,044828542	9,533580364	8,564005313	2,577037228
2C	0,38101571	1,936824323	2,131539921	0,564912585	0,232991941	0,045668859
3C	0,38031649	2,610511512	2,872201868	0,743859299	0,310368474	0,060644417
4C	0,25806919	1,585899283	1,73186666	0,441921754	0,187734224	0,035801288
6C	2,62884244	-	3,328361262	5,170415037	4,078527231	1,166801677
7C	7,5052E-06	-	6,24358E-07	1,69385E-06	7,06519E-07	1,94282E-06
8C	5,2153E-06	-	1,31863E-06	2,19785E-06	1,70714E-06	2,60778E-06
9C	0,87191558	5,123247708	5,51868284	1,33343113	0,575032657	0,108717589
10C	0,17380249	1,233931523	1,345191372	0,339135034	0,148446229	0,029488558
11C	0,20882701	1,083545456	1,181975268	0,306754582	0,132801629	0,025780772
12C	0,7612732	3,724980297	4,039148804	1,006213845	0,425793831	0,084396882
13C	6,3186E-06	-	5,01507E-07	1,06287E-06	9,65895E-07	2,40161E-06
14C	6,8332E-06	-	7,23884E-07	1,3052E-06	1,75628E-07	6,40526E-07
15C	7,3948E-06	-	8,554E-07	1,6204E-06	3,51099E-07	2,97798E-07
<b>Mín.</b>	<b>4,2607E-06</b>	<b>0,710099138</b>	<b>5,01507E-07</b>	<b>1,03196E-06</b>	<b>1,75628E-07</b>	<b>2,97798E-07</b>
<b>Máx.</b>	<b>7,09849493</b>	<b>11,81727149</b>	<b>7,374802985</b>	<b>9,533580364</b>	<b>8,564005313</b>	<b>2,577037228</b>

Trat.: tratamentos; Mín.: valor mínimo; Máx.: valor máximo; C: tratamentos compactados.

As curvas geradas pelos submodelos também são de fácil interpretação, visto que o tamanho das folhas de soja vai crescendo ao longo do tempo, alcança uma estabilidade em determinados dias, até chegar à mudança rápida de coloração das folhas e estas se desprenderem dos caules, tornando-se uma matéria morta sobre o solo.

## 4.6 Modelos

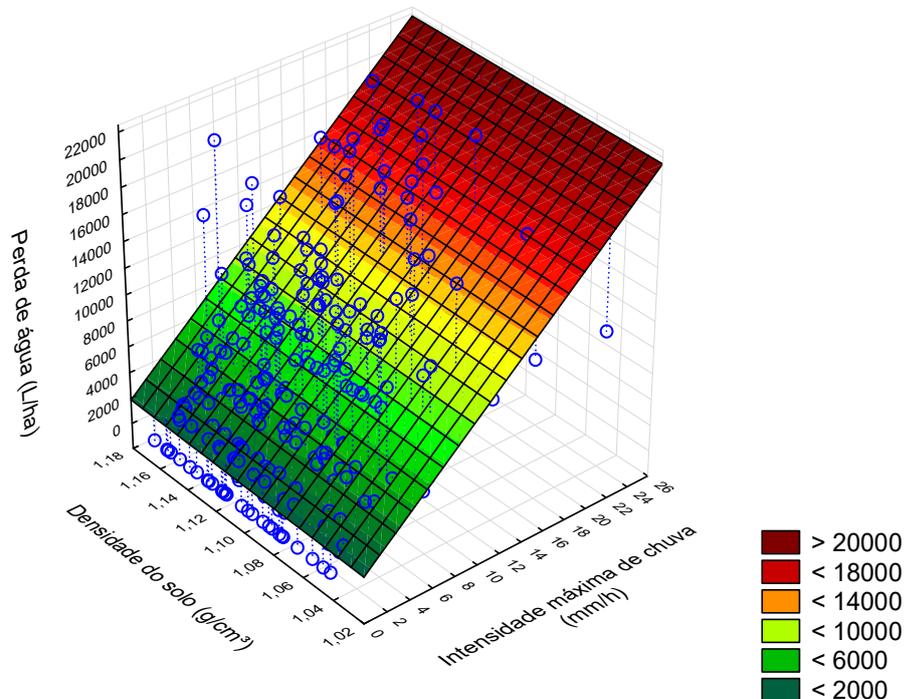
### 4.6.1 Perda de água

Os modelos gerados para a perda de água são apresentados na Tabela 12. Os baixos coeficientes de determinação são associados pela alta variabilidade dos dados coletados, como foi mostrado na seção 4.3, além da coleta ser a campo, pois o ambiente não pode ser controlado. A Figura 8 mostra a perda de água em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e densidade do solo.

**Tabela 12.** Modelos de perda de água em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%)

Equações	R <sup>2</sup>
$P. \text{agua}(Int, Ds) = 767,982 Int + 1754,54 Ds - 210,99$	0,4353
$P. \text{agua}(Int, Mac) = 767,982 Int - 117,75 Mac + 3303,48$	0,4358
$P. \text{agua}(Int, Msp) = 859,505 Int + 344,611 Msp + 11,3519$	0,5935
$P. \text{agua}(Int, Cob) = 858,818 Int - 12,044 Msp + 1517,64$	0,5952

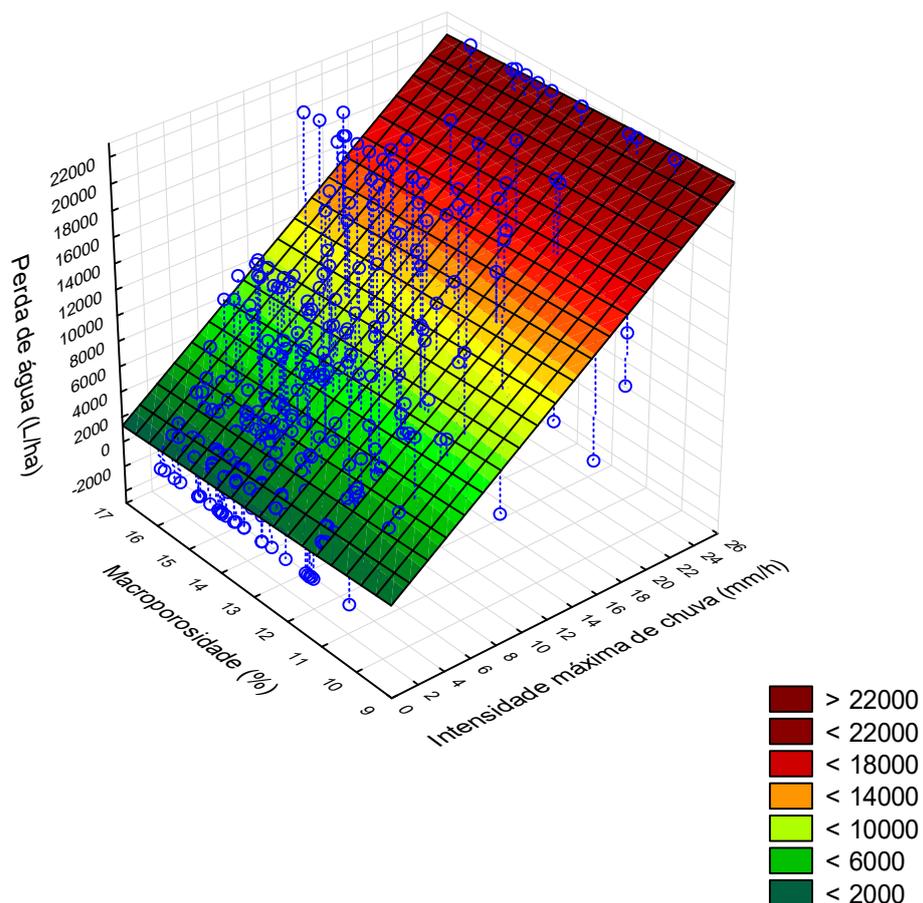
Int: intensidade máxima de chuva por evento de precipitação; Ds: densidade do solo; Mac: macroporosidade; Msp: massa seca da palha; Cob: cobertura verde.



**Figura 8.** Ajuste para perda de água em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e densidade do solo.

O comportamento da faixa de tendência evidenciou que houve aumento da perda de água com a intensidade de chuva, resultado semelhante foi encontrado por Oliveira et al. (2015) ao constatarem a correlação linear e positiva entre a precipitação e as perdas de água por escoamento superficial.

Foi possível observar levemente um aumento da perda de água com a elevação da densidade, assim, a compactação do solo pode acarretar maiores perdas. Já em função da macroporosidade (Figura 9), houve aumento da perda de água com a redução do volume de macroporos, visto que, com menos poros é dificultada a infiltração de água no solo, aumentando o escoamento superficial.

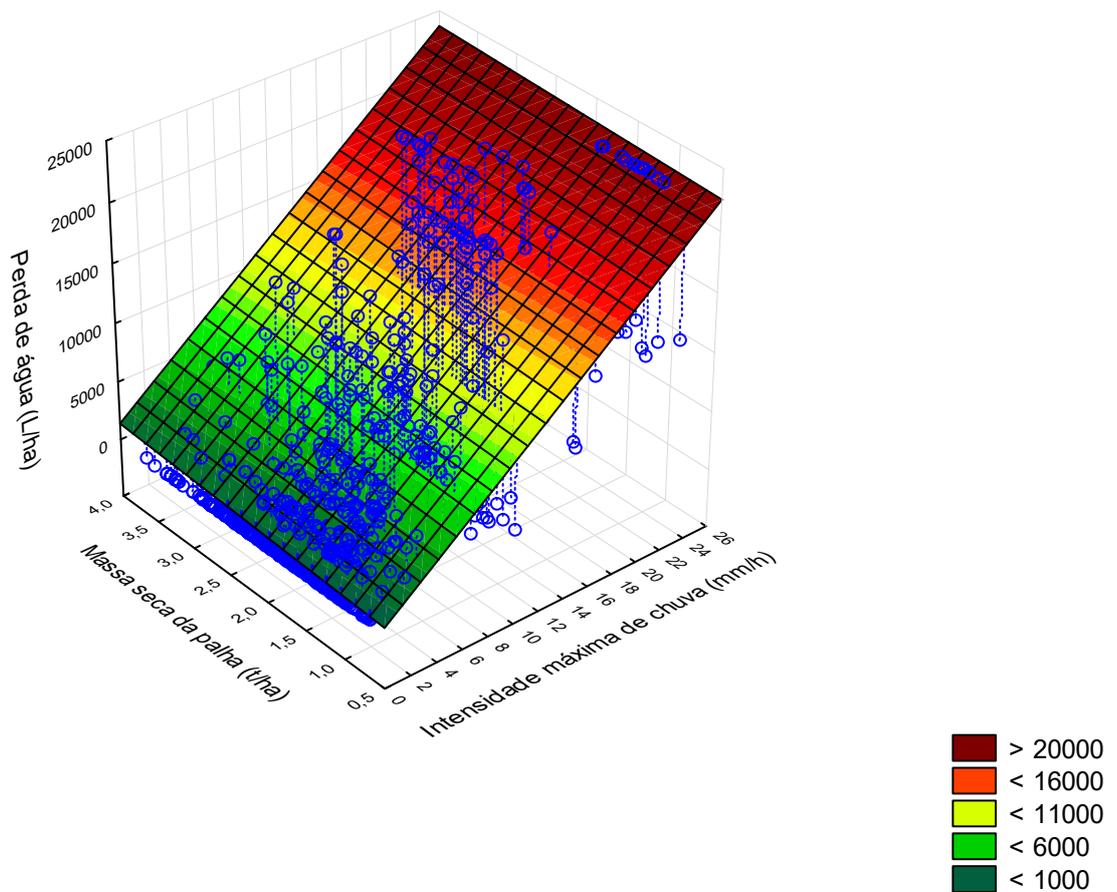


**Figura 9.** Ajuste para perda de água em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e macroporosidade.

Os resultados corroboram com o trabalho de Cândido et al. (2014) quando observaram, ao avaliar a influência dos atributos físicos do solo na erosão hídrica, que

houve correlação positiva acerca da densidade do solo e correlação negativa na macroporosidade.

No tocante à massa seca da palha (Figura 10), observou-se a elevação das perdas de água com a aumento da massa seca da palha. O que contraria Prosdocimi et al. (2016) quando observaram, ao avaliar o efeito da palha de cevada no escoamento superficial, que as perdas de água e solo reduziram com a utilização da palha.

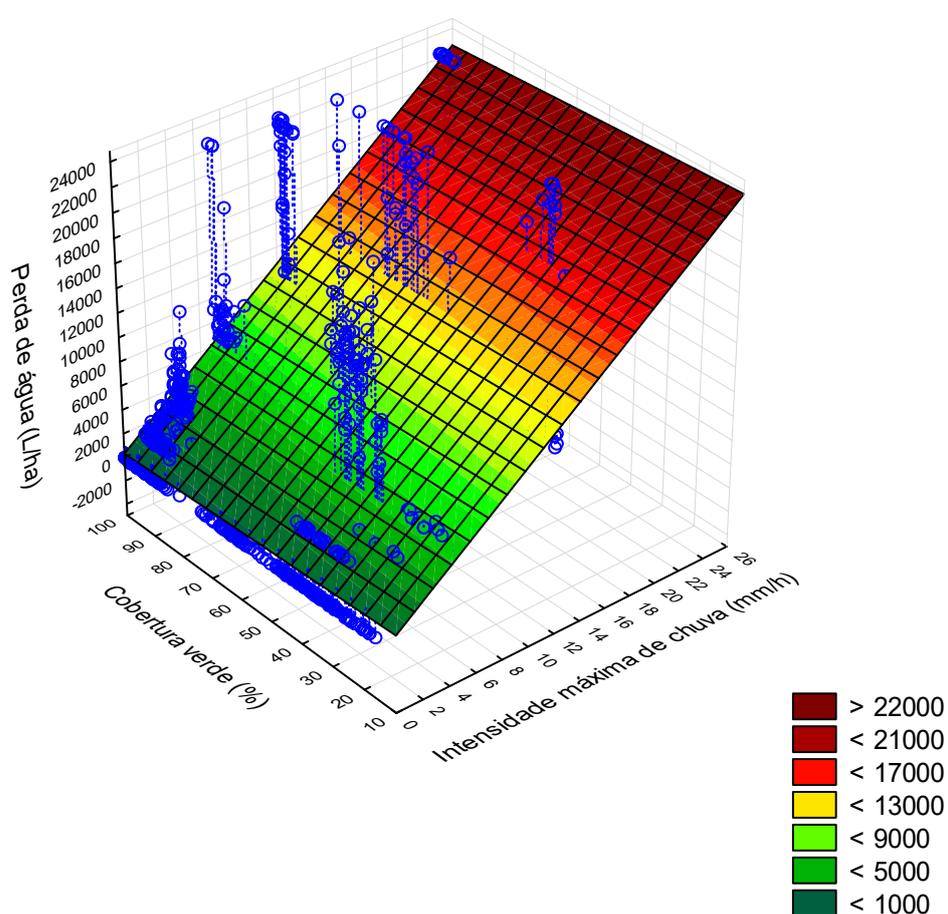


**Figura 10.** Ajuste para perda de água em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e massa seca da palha.

Portanto, esse efeito deve ser analisado pelo tempo e a influência da cobertura verde das plantas de soja. Vale salientar que, na época de maior massa seca da palha sobre o solo, foi quando se identificou a menor cobertura verde e vice-versa. Além disso, as equações apresentadas na Tabela 12 mostraram que as perdas de água em função da massa seca da palha e da cobertura verde obtiveram valores próximos de coeficiente de determinação (0,5935 e 0,5952, respectivamente) e do coeficiente  $a$  (859,505 e 858,818, respectivamente). Ademais, os coeficientes  $b$  salientaram sinais

inversos (+344,61 e -12,04, respectivamente). Com isso, torna-se evidente que ambas as relações são inversamente proporcionais.

Já em relação à cobertura verde (Figura 11), de forma isolada, as perdas de água foram menores em maiores porcentagens de cobertura, concordando com Carvalho et al. (2015) quando afirmam que a maior cobertura do solo por desenvolvimento natural da colheita reduz as perdas de água e solo. Almeida et al. (2016) também observaram que o tratamento mais suscetível ao processo erosivo foi na condição em que a cobertura vegetal foi igual a zero.



**Figura 11.** Ajuste para perda de água em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e cobertura verde.

Sendo assim, nas épocas de menor porcentagem de cobertura verde - o que pelo modelo tenderia a maiores perdas de água – também manifestam maior massa seca da palha. Indicando, dessa maneira, o sentido físico quanto ao comportamento do ajuste da perda de água em função da massa seca da palha.

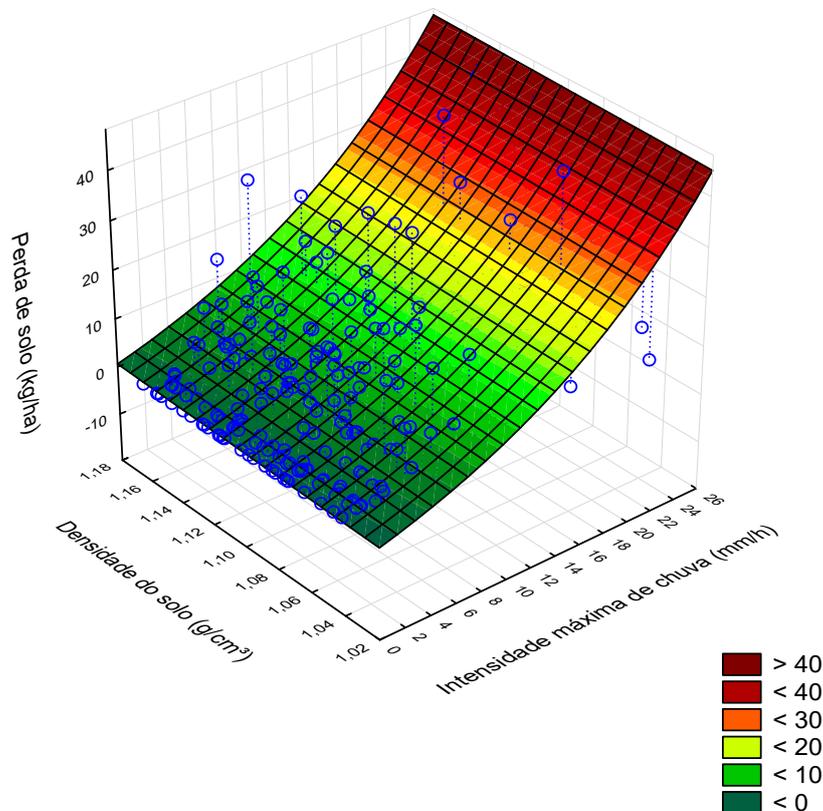
#### 4.6.2 Perda de solo

Os modelos gerados para a perda de solo são destacados na Tabela 13. A função utilizada foi uma exponencial, como visto na Equação (10) da seção 3.10. A Figura 12 mostra o principal motivo da sua utilização, evidenciando que esta função alcança valores de perda próximos a zero. Além disso, a tendência mostrou que as maiores perdas estão associadas aos maiores valores de densidade, isso para intensidades de chuva mais elevadas.

**Tabela 13.** Modelos de perda de solo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%)

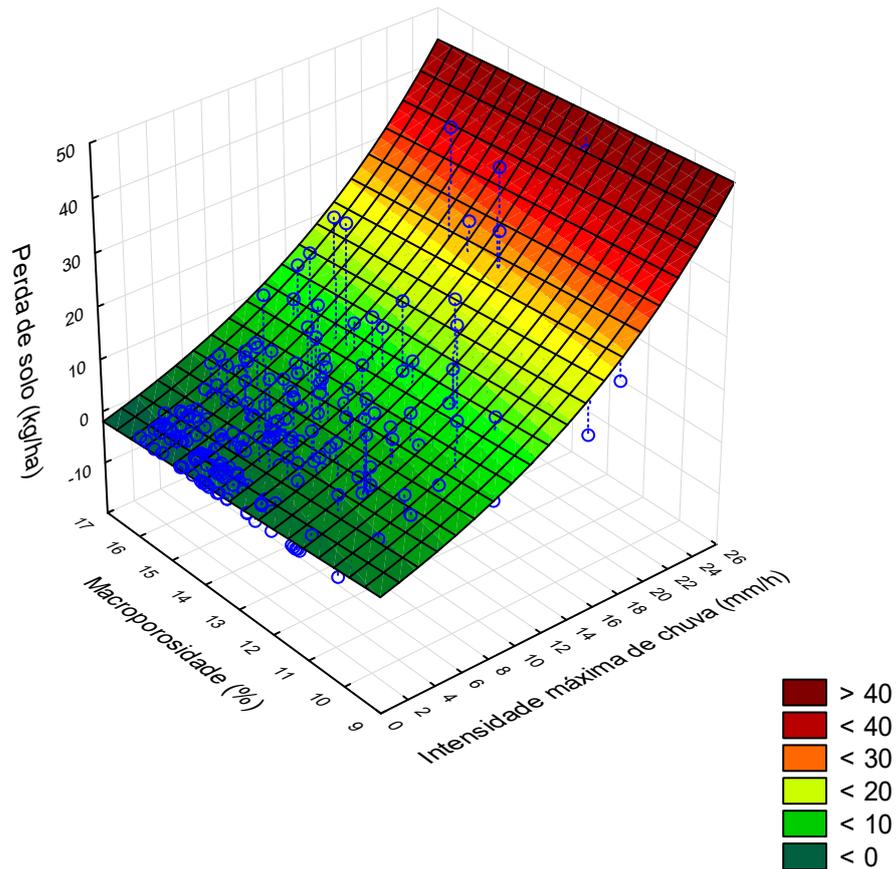
Equações	R <sup>2</sup>
$P. \text{ solo}(Int, Ds) = 11,926 \exp(0,060853 Int) + 10,1374 Ds - 23,3$	0,2462
$P. \text{ solo}(Int, Mac) = 11,8806 \exp(0,060967 Int) - 0,50257 Ds - 5,3174$	0,2473
$P. \text{ solo}(Int, Msp) = 11,5209 \exp(0,061868 Int) - 0,24766 Msp - 11,16$	0,2944
$P. \text{ solo}(Int, Cob) = 10,5836 \exp(0,06481 Int) - 0,03853 Cob - 7,606$	0,2991

Int: intensidade máxima de chuva por evento de precipitação; Ds: densidade do solo; Mac: macroporosidade; Msp: massa seca da palha; Cob: cobertura verde.



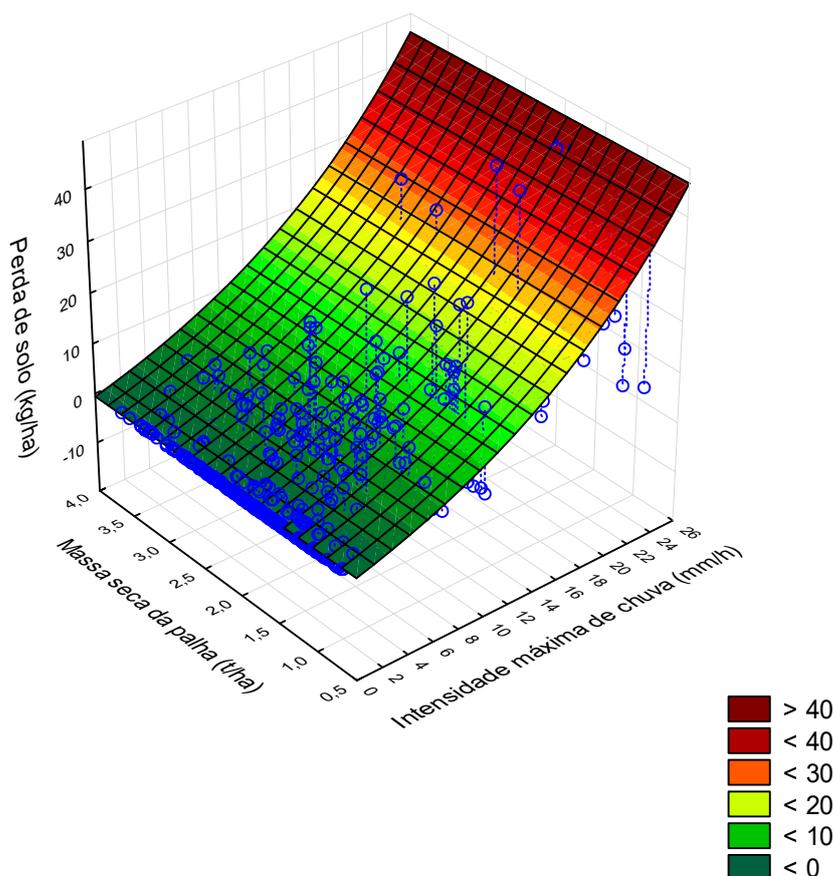
**Figura 12.** Ajuste para perda de solo por intensidade máxima de chuva por precipitação e densidade do solo.

Nas perdas em função da macroporosidade (Figura 13) foi observada a redução da perda de solo com o aumento do volume dos poros, para chuvas mais elevadas. Como a maior macroporosidade está associada à maior capacidade de infiltração, as perdas de solo por escoamento são reduzidas.



**Figura 13.** Ajuste para perda de solo em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e macroporosidade.

A Figura 14 mostra a relação das perdas com a massa seca da palha. Diferente da perda de água, esta não apresentou proporção muito clara aparentemente, pois as perdas se mantiveram estáveis para diferentes valores da massa seca da palha. No entanto, ao analisar a equação pertencente ao modelo (Tabela 13), a tendência mostrou redução das perdas de solo com o aumento da massa seca da palha.



**Figura 14.** Perda de solo por intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e massa seca da palha.

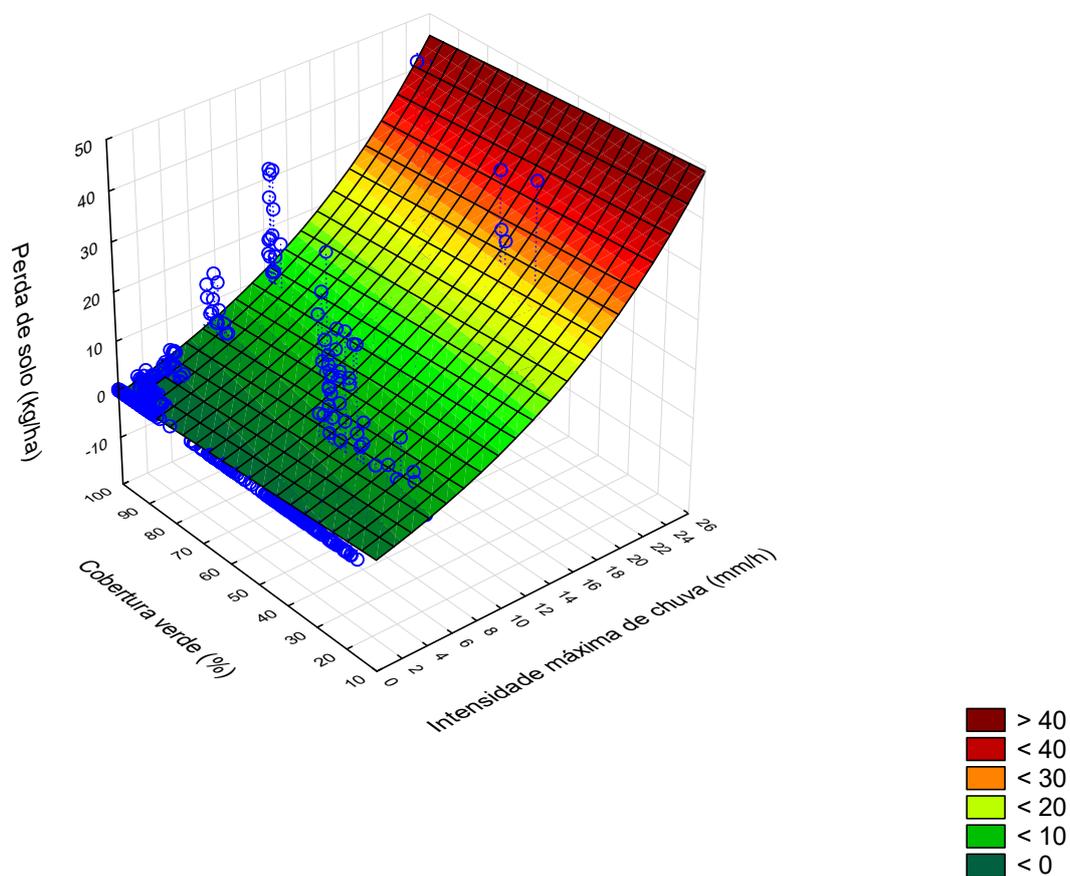
No trabalho de Volk e Cogo (2014), a partir do qual avaliaram as perdas de solo e água por erosão por meio de chuva simulada de intensidade de chuva de  $64 \text{ mm h}^{-1}$ , utilizaram resíduos culturais de milho e observaram que houve diminuição na perda total de solo, tendendo ao valor nulo. O modelo gerado também foi uma função exponencial, apresentado como:

$$P.\text{solo}(Cob) = 7,1532 \exp(-0,59 Cob) \quad (18)$$

com  $R^2$  equivalente a 0,7532 e  $Cob$  em porcentagem de palha coberta no solo.

Ramos et al. (2014) utilizaram, ao estudar a influência das condições de superfície na erosão hídrica, modelos exponenciais para realizar os seus ajustes e concluíram que as perdas de solo reduziram de modo considerável com o aumento da cobertura do solo e da rugosidade superficial. O mesmo também foi feito e demonstrado por Bertol et al. (2014) durante trabalho de 10 anos.

Já as perdas em relação à cobertura verde (Figura 15), assim como ocorreu com as de água, apresentaram redução com o aumento da cobertura.



**Figura 15.** Ajuste para perda de solo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e cobertura verde.

#### 4.6.3 Perda de magnésio

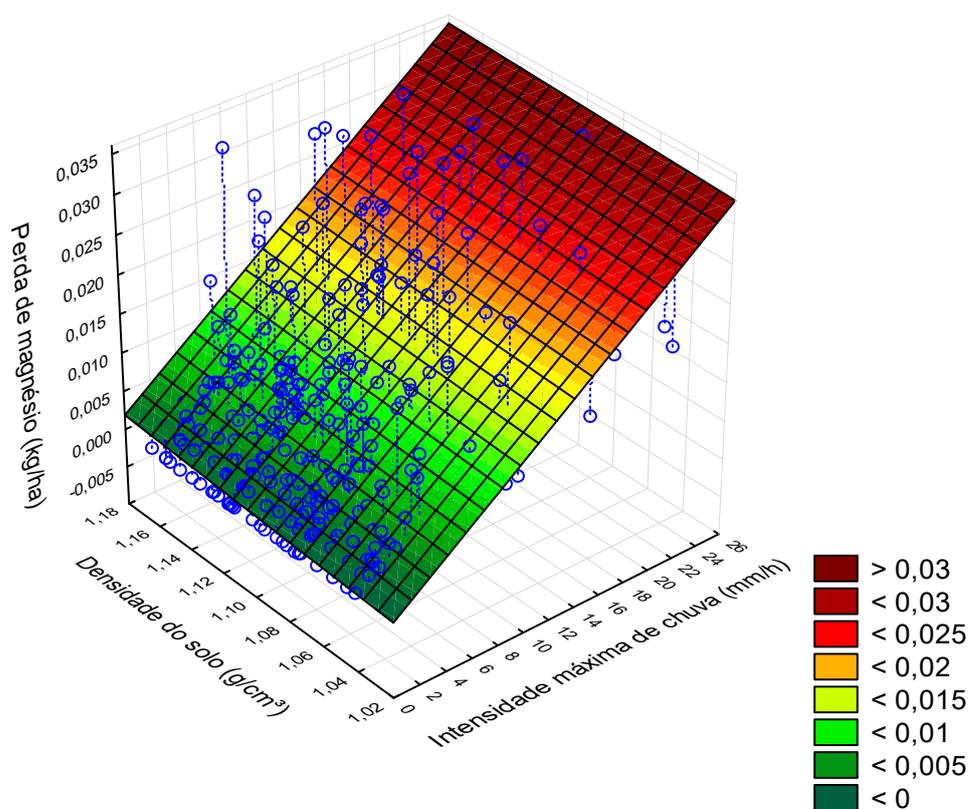
Os modelos gerados para a perda de magnésio são apresentados na Tabela 14. Foi observado que a função dependente da densidade e macroporosidade apresentou valores próximos de  $R^2$ , assim como em função da massa seca da palha e cobertura verde. Isso mostra o quanto ambas as partes estão associadas um ao outro.

**Tabela 14.** Modelos de perda de magnésio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%)

Equações	R <sup>2</sup>
$P. \text{magnésio}(Int, Ds) = 32,4067 \exp(3,92 \cdot 10^{-5} Int) + 0,01342 Ds - 32,421$	0,4145
$P. \text{magnésio}(Int, Mac) = 30,0883 \exp(4,22 \cdot 10^{-5} Int) - 3,8 \cdot 10^{-4} Mac - 30,082$	0,4153
$P. \text{magnésio}(Int, Msp) = 38,4991 \exp(3,42 \cdot 10^{-5} Int) + 8,4 \cdot 10^{-4} Msp - 38,5$	0,5409
$P. \text{magnésio}(Int, Cob) = 36,5216 \exp(3,6 \cdot 10^{-5} Int) + -2,2 \cdot 10^{-5} Cob - 36,52$	0,5422

Int: intensidade máxima de chuva por evento de precipitação; Ds: densidade do solo; Mac: macroporosidade; Msp: massa seca da palha; Cob: cobertura verde.

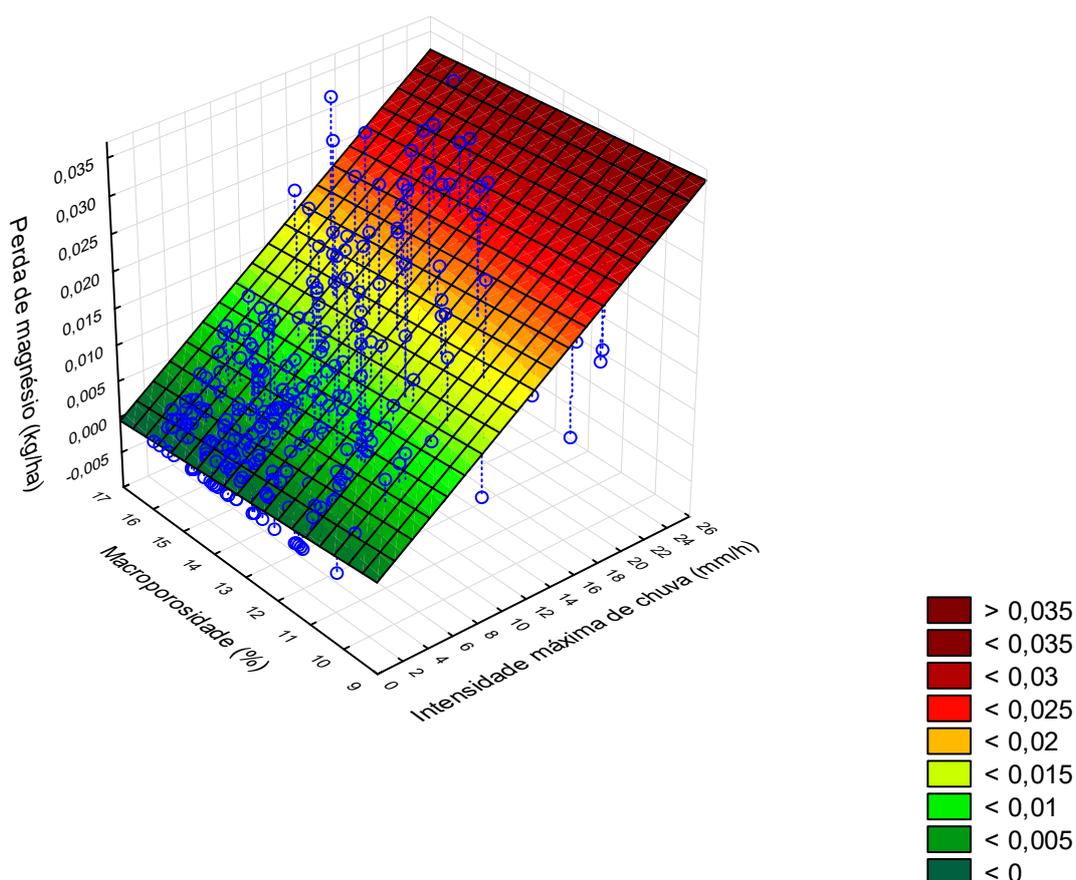
De acordo com a Figura 16, as perdas de magnésio aumentaram com o incremento da densidade de solo. Diferentemente das perdas de solo, que tiveram comportamento exponencial quanto às intensidades de chuva, as perdas de magnésio foram expressas de forma linear. Vale mencionar que as perdas de nutrientes foram mensuradas apenas pelo conteúdo da água coletada, por esta razão, apresentando-se comportamento semelhante entre perda de água e da perda de nutrientes.



**Figura 16.** Ajuste para perda de magnésio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e densidade do solo.

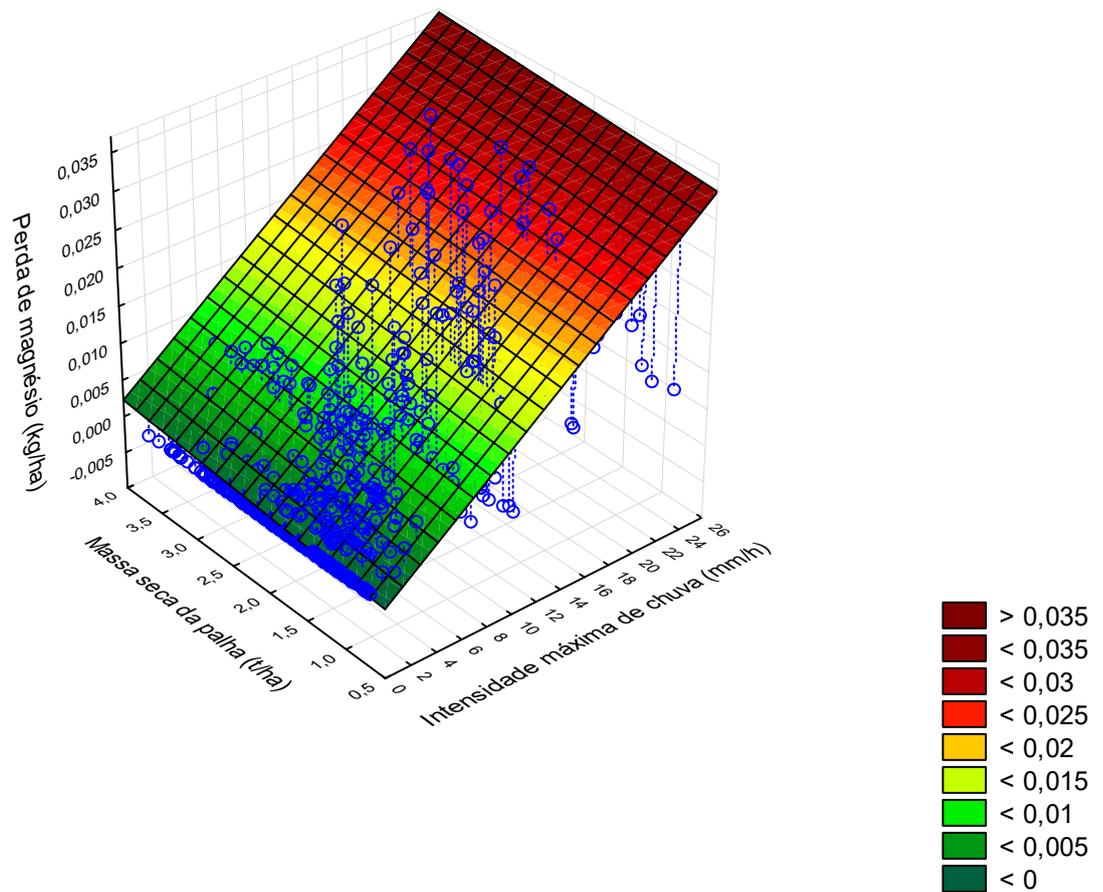
Bertol et al. (2017) observaram, ao avaliar perdas de nutrientes por erosão hídrica, que o magnésio é altamente sensível aos efeitos do manejo do solo e ao tipo de cultura na camada superficial do solo. É um elemento essencial para a clorofila e a perda prolongada pode resultar em degradação do solo (WANG et al., 2019). Portanto, é necessário atentar ao uso e manejo que possa interferir na compactação, pois aumenta a densidade e, por sua vez, acarreta na perda de nutrientes.

As perdas de magnésio em função da macroporosidade são apresentadas na Figura 17. Foi observado que houve redução da perda de magnésio com o incremento do volume de macroporos. Dessa forma, quanto maior o volume de poros no perfil do solo, menores são as perdas.

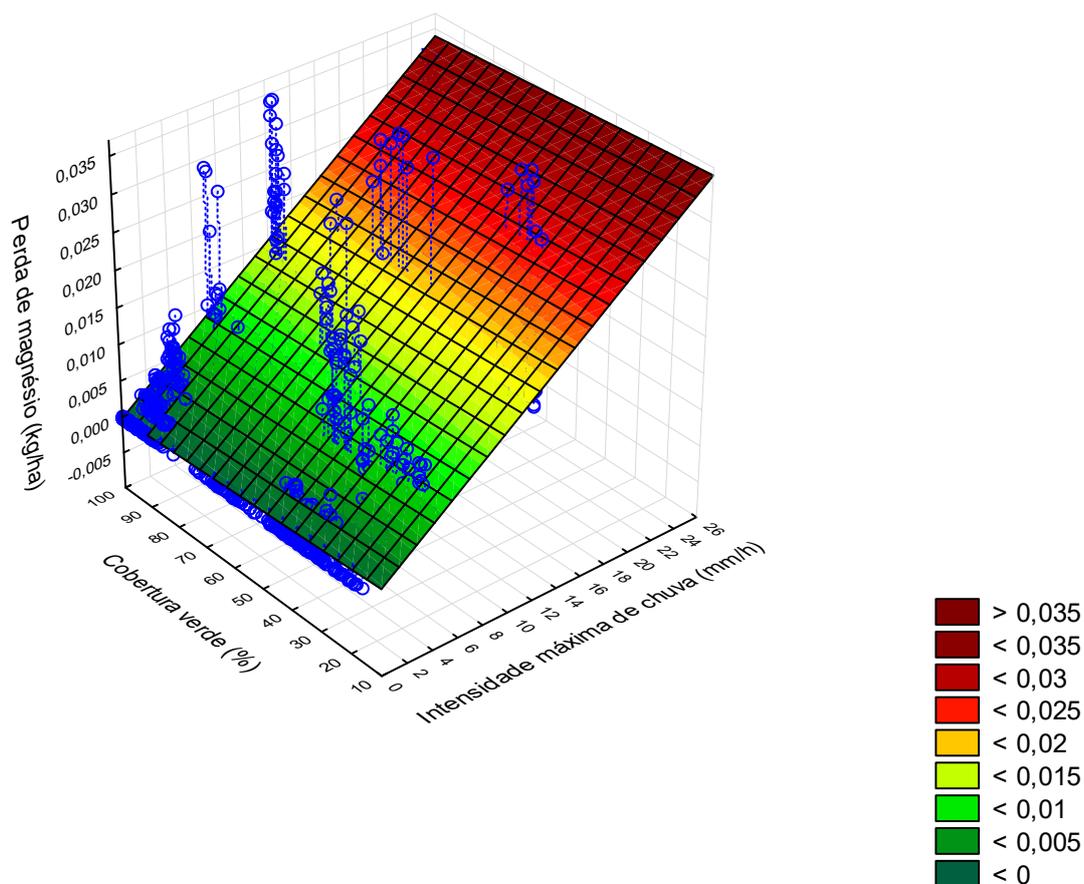


**Figura 17.** Ajuste para perda de magnésio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e macroporosidade.

O ajuste em função da massa seca da palha (Figura 18) mostrou aumento das perdas de magnésio com o aumento da massa seca da palha assim como nas situações anteriores. O que pode ser verificado também com o ajuste em função da cobertura verde (Figura 19). O mesmo comportamento dos gráficos gerados, aliado aos valores próximos de  $R^2$ , evidencia o efeito integrado da palha e cobertura na perda de magnésio.



**Figura 18.** Ajuste para perda de magnésio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e massa seca da palha.



**Figura 19.** Ajuste para perda de magnésio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e cobertura verde.

#### 4.6.4 Perda de cálcio

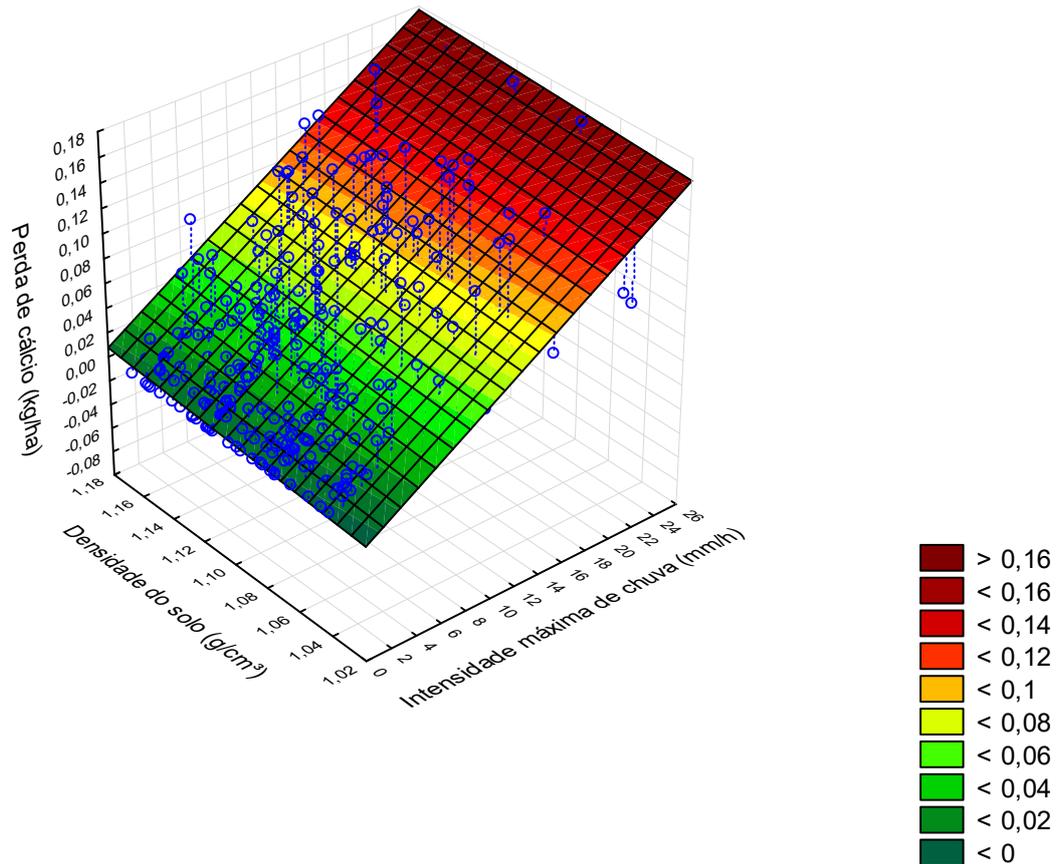
Os modelos gerados para a perda de cálcio são apresentados na Tabela 15. Da mesma forma, tiveram valores próximos de  $R^2$  entre a relação densidade x macroporosidade e massa seca da palha x cobertura verde. Os sinais contrários do coeficiente  $a$  para ambas as relações mostram que são inversamente proporcionais.

**Tabela 15.** Modelos de perda de cálcio em função da intensidade máxima de chuva por evento precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%)

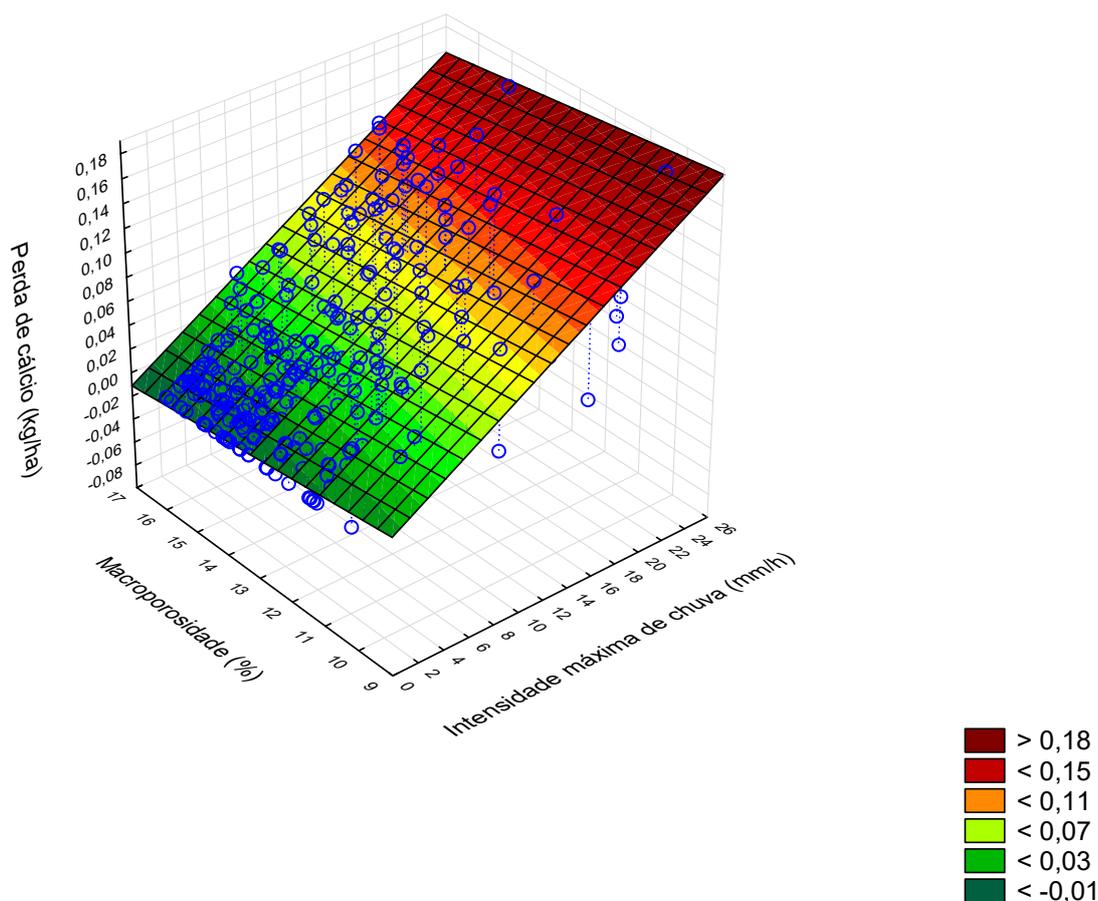
Equações	$R^2$
$P. \text{calcio}(Int, Ds) = 81,9488 \exp(7,96 \cdot 10^{-5} Int) + 0,088132 Ds - 82,045$	0,3626
$P. \text{calcio}(Int, Mac) = 79,3407 \exp(8,22 \cdot 10^{-5} Int) - ,00333 Mac - 79,295$	0,3660
$P. \text{calcio}(Int, Msp) = 90,7954 \exp(7,23 \cdot 10^{-5} Int) + 0,004049 Msp - 90,802$	0,4716
$P. \text{calcio}(Int, Cob) = 79,3833 \exp(8,25 \cdot 10^{-5} Int) - 1,8 \cdot 10^{-3} Cob - 79,369$	0,4776

Int: intensidade máxima de chuva por evento de precipitação; Ds: densidade do solo; Mac: macroporosidade; Msp: massa seca da palha; Cob: cobertura verde.

A Figura 20 e Figura 21 representam, respectivamente, os ajustes das perdas em função da densidade do solo e macroporosidade. Foi possível observar que as maiores perdas estão associadas aos maiores valores de densidade do solo e menores valores de macroporosidade.



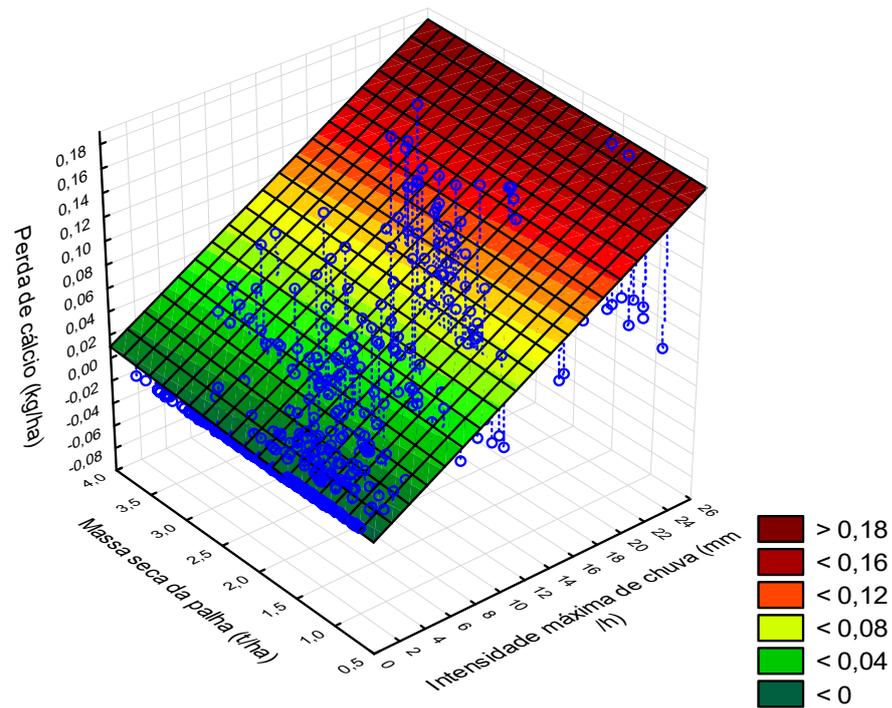
**Figura 20.** Ajuste para perda de cálcio em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e densidade do solo.



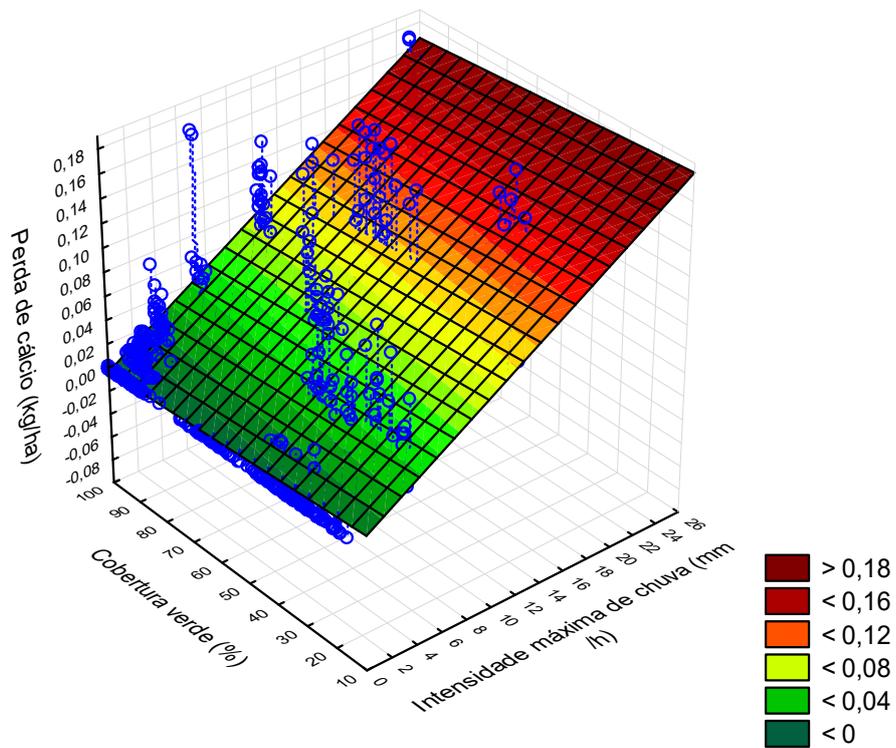
**Figura 21.** Ajuste para perda de cálcio em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e macroporosidade.

O cálcio também é um dos elementos bastante sensíveis ao manejo do solo e ao tipo de cultura na camada superficial do solo (BERTOL et al., 2017). Por estar adsorvido aos coloides do solo, o seu transporte é mais propenso pelos sedimentos pertencentes à erosão (OLIVEIRA et al., 2017).

Analisando a perda de cálcio em função da massa seca da palha (Figura 22) e da cobertura verde (Figura 23), as perdas de cálcio tiveram relações inversas. Além disso, os gráficos mostraram elementos diferentes. Na Figura 22, os pontos observados ficaram espalhados de forma dispersa, o que distinguiu da Figura 23, em que os pontos se concentraram em regiões isoladas. Isso pode ser justificado em razão da homogeneidade dos dados da cobertura verde em determinadas datas de coleta.



**Figura 22.** Ajuste para perda de cálcio em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e massa seca da palha.



**Figura 23.** Ajuste para perda de cálcio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e cobertura verde.

#### 4.6.5 Perda de potássio

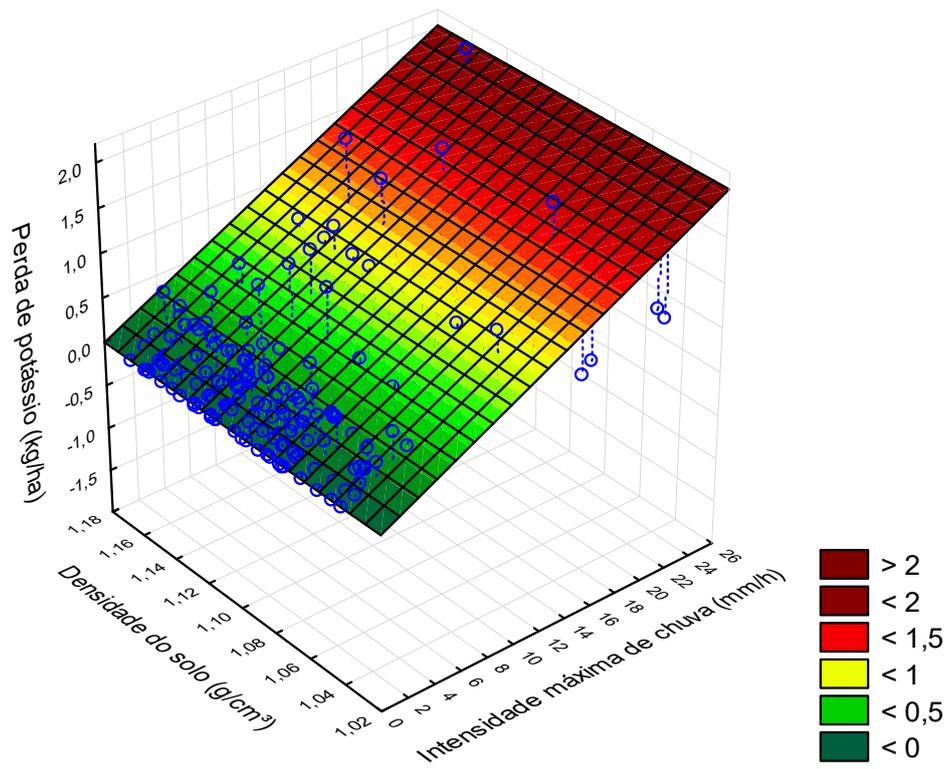
Os modelos gerados para a perda de potássio são apresentados na Tabela 16. As equações evidenciaram comportamentos incomuns das equações reveladas até então, visto que em  $P.potássio(Int, Cob)$ , o coeficiente  $a$  mostrou-se negativo. O que define, graficamente, curva exponencial para baixo. Isso pode ser problemático fisicamente, pois significa que as perdas de potássio, para intensidades de chuva maiores que os propostos no trabalho, serão limitadas pela assíntota horizontal.

**Tabela 16.** Modelos de perda de potássio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%)

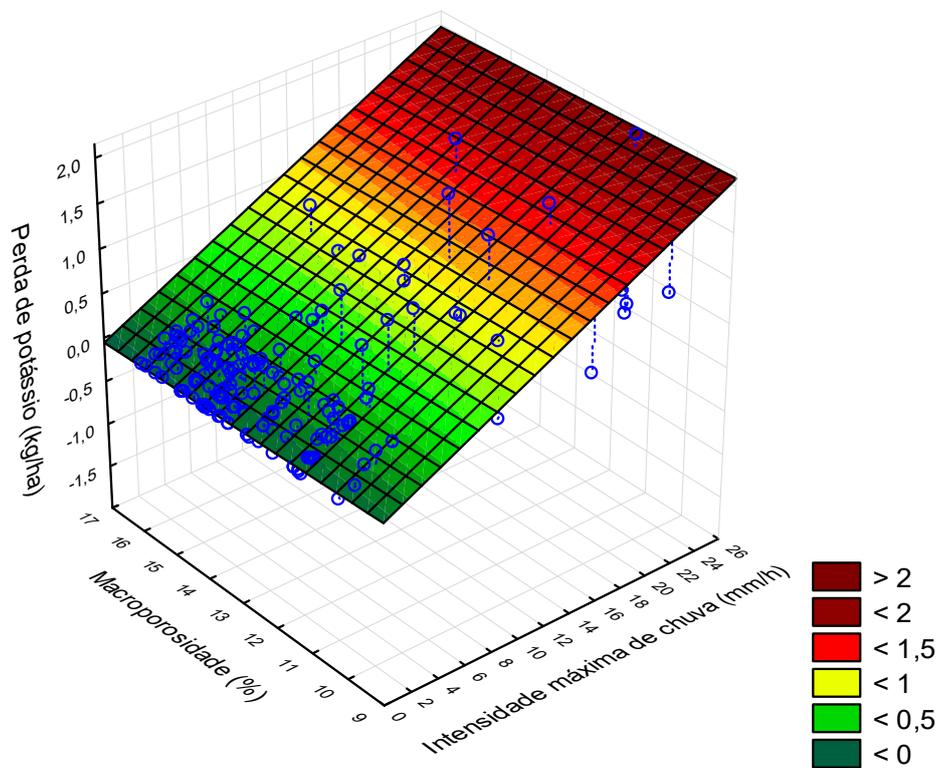
Equações	R <sup>2</sup>
$P.potassio(Int, Ds) = 1501,67 \exp(5,19 \cdot 10^{-5} Int) - 0,00695 Ds - 1501,7$	0,1077
$P.potassio(Int, Mac) = 1450,35 \exp(5,37 \cdot 10^{-5} Int) - 0,01452 Mac - 1450,2$	0,1079
$P.potassio(Int, Msp) = 1325,66 \exp(5,85 \cdot 10^{-5} Int) + (0,209262 Msp - 1326,0$	0,1676
$P.potassio(Int, Cob) = -2,1242 \exp(-0,06199 Int) - 0,00131 Cob + 2,16698$	0,1721

Int: intensidade máxima de chuva por evento de precipitação; Ds: densidade do solo; Mac: macroporosidade; Msp: massa seca da palha; Cob: cobertura verde.

As perdas de potássio apresentaram estabilidade nos valores de densidade do solo como observado na Figura 24. Já na Figura 25, houve redução das perdas com o incremento da macroporosidade. Por ser um elemento móvel, é bastante suscetível à lixiviação (KAUFMANN et al., 2019), fator que pode interferir nos valores das perdas por escoamento laminar. Vale frisar que a lixiviação – definida como perda de nutrientes por transporte de água no perfil do solo – é facilitada em solos com maior macroporosidade.

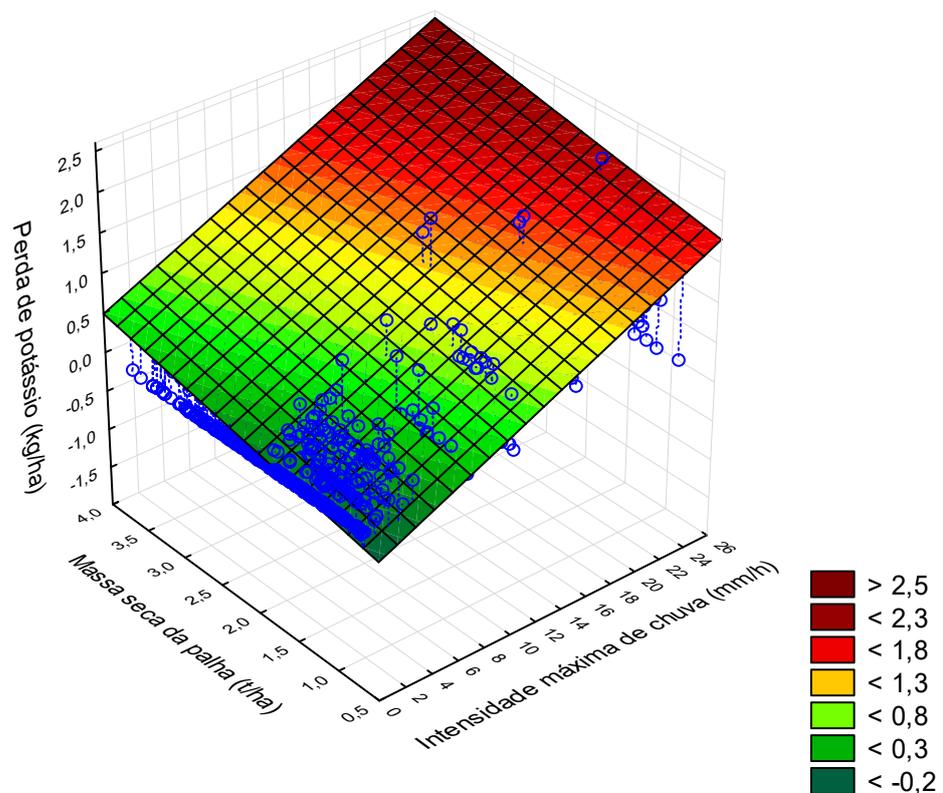


**Figura 24.** Ajuste para perda de potássio em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e densidade do solo.



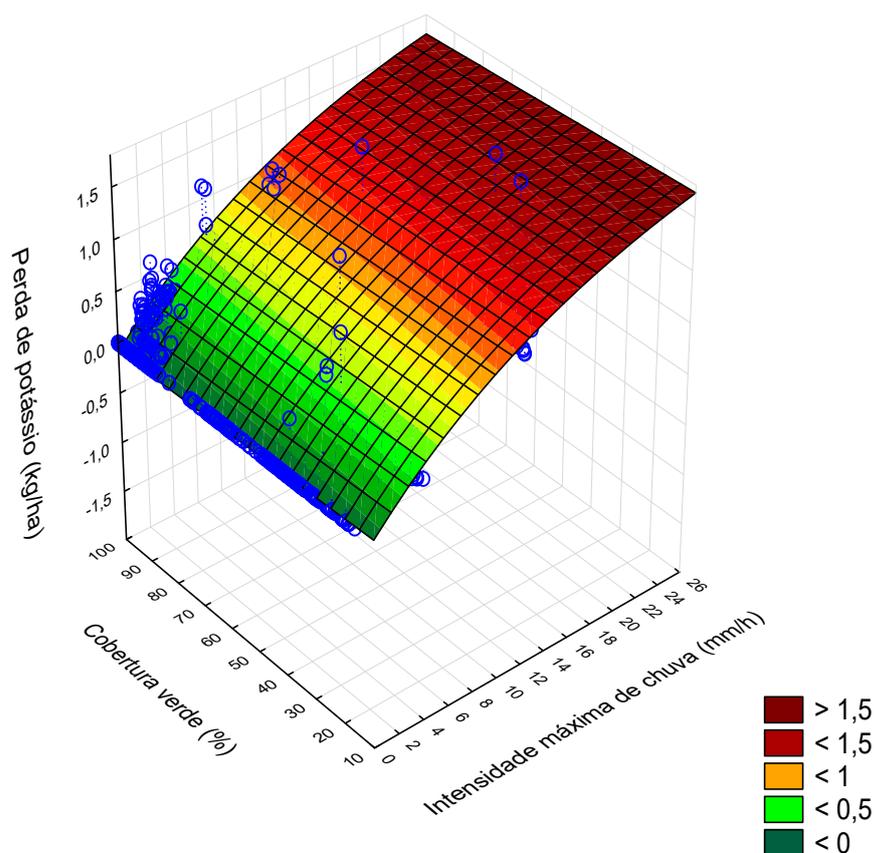
**Figura 25.** Ajuste para perda de água em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e macroporosidade.

Quanto às perdas em função da massa seca da palha (Figura 26), as perdas mais elevadas foram associadas à massa seca da palha. Isso contraria os resultados de Leite et al. (2018), quando avaliaram perdas de nutrientes em chuvas naturais. Os autores verificaram que as menores perdas de potássio foram encontradas em sistemas de manejo com maior conservação da cobertura vegetal. Isso pode ser explicado, possivelmente, pela combinação da palha com a cobertura verde.



**Figura 26.** Ajuste para perda de potássio em função da intensidade máxima de chuva por precipitação e massa seca da palha.

Por outro lado, as perdas de potássio em função da cobertura verde (Figura 27) estão menores em condições de maior cobertura. Resultados distintos foram apontados por Bosch et al. (2015), sendo que as perdas de potássio por erosão não apresentaram diferença significativa entre tratamento com solo exposto e com cobertura vegetal.



**Figura 27.** Ajuste para perda de potássio em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e cobertura verde.

#### 4.6.6 Perda de fósforo

Os modelos gerados para a perda de fósforo são destacados na Tabela 17. As perdas em função da densidade e macroporosidade obtiveram semelhantes coeficientes de determinação, assim como as de massa seca da palha e cobertura verde.

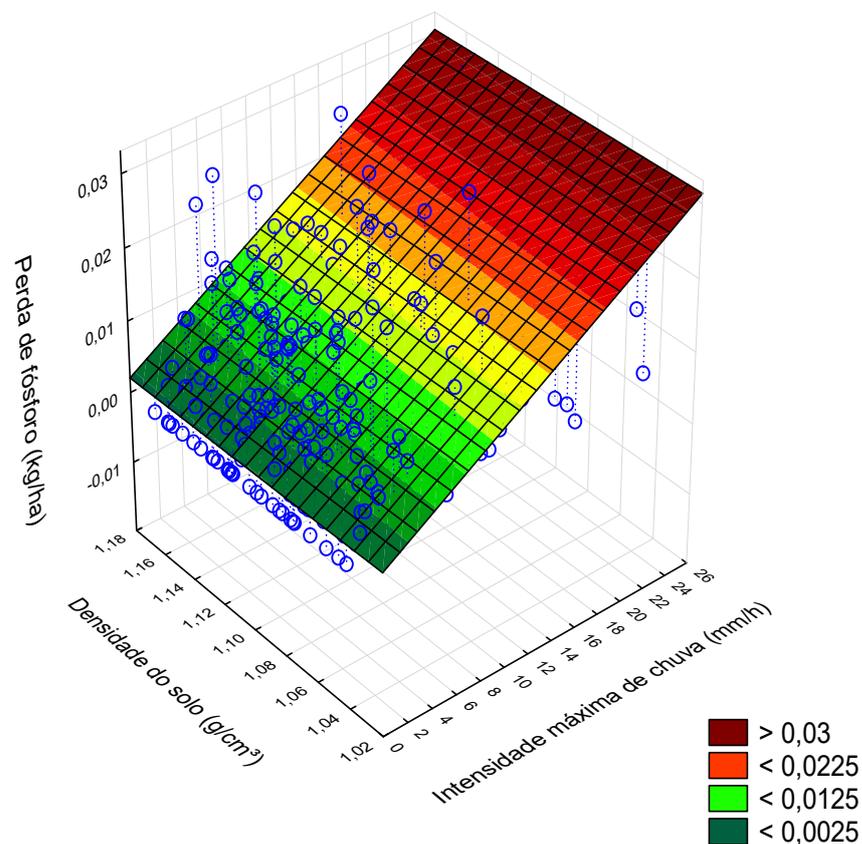
**Tabela 17.** Modelos de perda de fósforo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (%), massa seca da palha ( $\text{t ha}^{-1}$ ) e cobertura vegetal (%)

Equações	R <sup>2</sup>
$P. \text{ fosforo}(Int, Ds) = 21,9236 \exp(5,01 \cdot 10^{-4} Int) - 0,00445 Ds - 21,916$	0,0957
$P. \text{ fosforo}(Int, Mac) = 23,1815 \exp(4,73 \cdot 10^{-5} Int) - 3,5 \cdot 10^{-4} Mac - 23,175$	0,0962
$P. \text{ fosforo}(Int, Msp) = 31,3146 \exp(3,9 \cdot 10^{-5} Int) + 0,002738 Msp - 31,318$	0,1765
$P. \text{ fosforo}(Int, Cob) = 31,0742 \exp(3,93 \cdot 10^{-5} Int) - 2,7 \cdot 10^{-4} Cob - 31,071$	0,1702

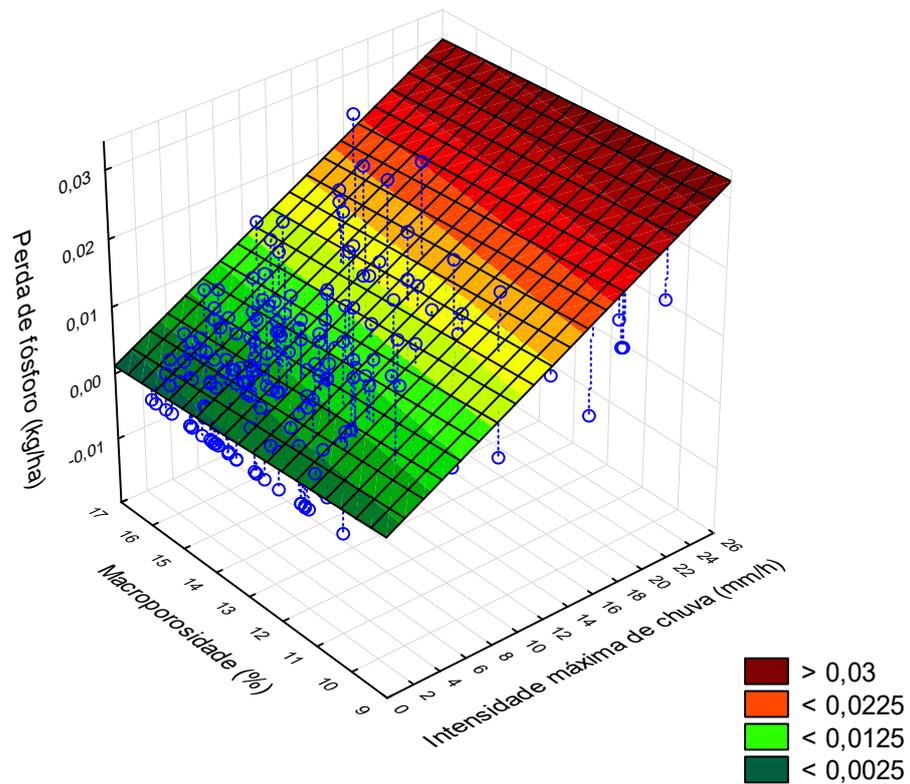
Int: intensidade máxima de chuva por evento precipitação; Ds: densidade do solo; Mac: macroporosidade; Msp: massa seca da palha; Cob: cobertura verde.

Modelar as perdas de fósforo é relevante para avaliar o uso e manejo do solo, visto que as perdas de fósforo nas águas escoadas podem aumentar o risco de eutrofização (FARIAS et al., 2018; LEITE et al., 2018; WANG et al., 2019), definido como o crescimento excessivo de plantas aquáticas.

As perdas foram estáveis para todo valor da densidade do solo (Figura 28), visto que o fósforo é um elemento que tem baixa mobilidade no solo (KAUFMANN et al., 2019). Já no tocante à macroporosidade (Figura 29), houve leve redução das perdas com o aumento do volume de macroporos.

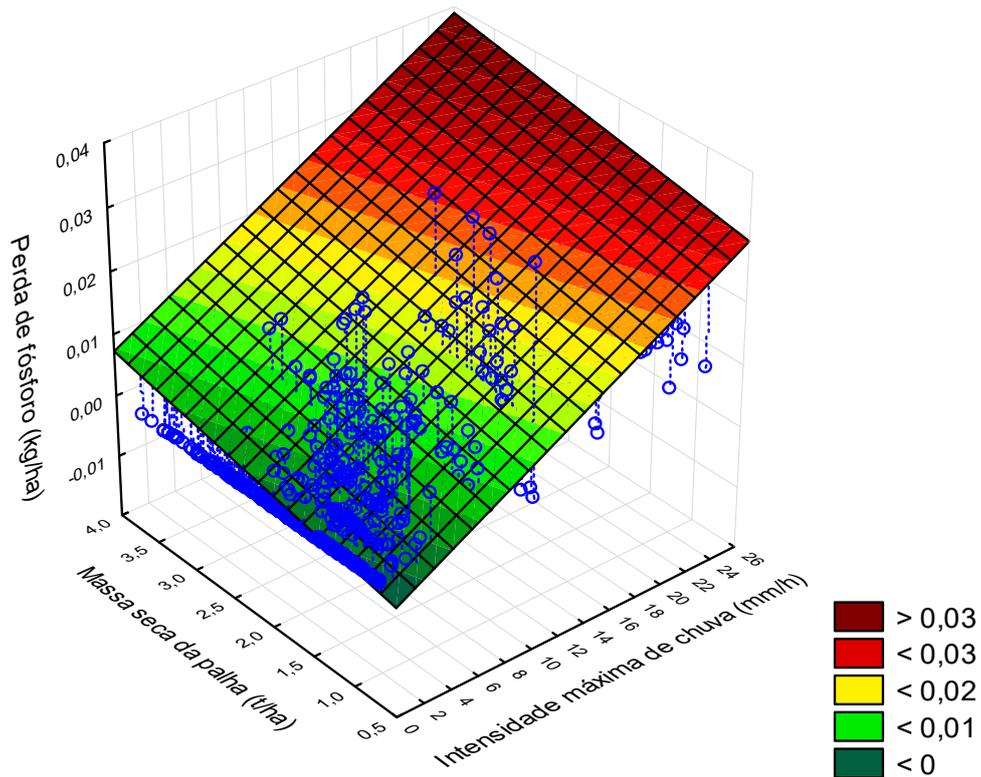


**Figura 28.** Ajuste para perda de fósforo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e densidade do solo.

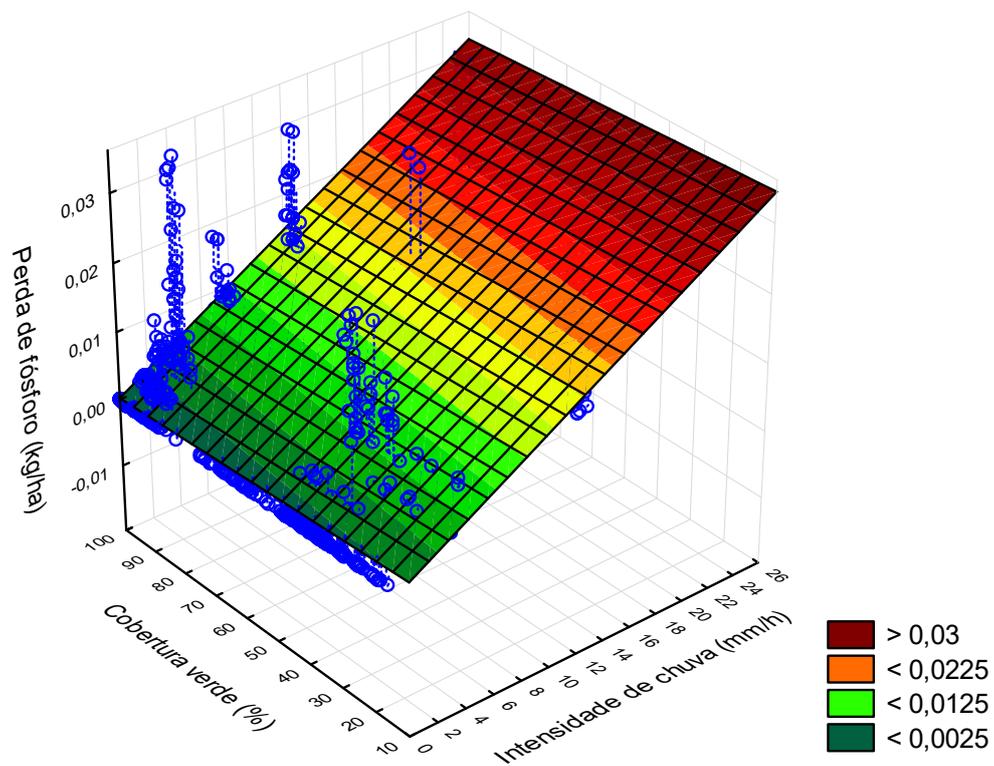


**Figura 29.** Ajuste para perda de fósforo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e macroporosidade.

O modelo da perda de fósforo em função da massa seca da palha (Figura 30) e por conta da cobertura verde (Figura 31) tiveram o mesmo comportamento do potássio: aumento da perda de fósforo com o incremento da massa seca da palha e com redução da cobertura verde, mostrando novamente a relação inversa entre ambas as propriedades.



**Figura 30.** Ajuste para perda de fósforo em função da intensidade máxima de chuva por evento de precipitação e massa seca da palha.



**Figura 31.** Ajuste para perda de fósforo em função da intensidade máxima de chuva por evento precipitação e cobertura verde.

#### 4.7 Perdas totais ao longo do ciclo da soja

As perdas totais ao longo do ciclo da soja são destacadas na Tabela 18. Dentre os nutrientes, a maior perda foi do potássio, com 10,918 kg ha<sup>-1</sup>. Leite et al. (2018) também constataram, em coletas feitas a partir de chuvas naturais, o potássio como o nutriente com maior perda.

**Tabela 18.** Total das perdas de água, solo e nutrientes durante todo o ciclo da soja, considerando os 20 dias de coleta de chuva

Água (L ha <sup>-1</sup> )	Solo	Mg	Ca	K	P
	----- (kg ha <sup>-1</sup> ) -----				
144.940,00	157,64	0,18944	0,8738	10,918	2,052

No trabalho feito por Leite et al. (2018), quando avaliaram perdas de nutrientes em chuvas naturais, o potássio foi o único elemento analisado que recebeu um modelo de perda por escoamento, isso em razão da sua grande quantidade em comparação aos demais nutrientes.

A menor perda foi do magnésio, com 0,18944 kg ha<sup>-1</sup> e a ordem decrescente da perda dos nutrientes foi: K > P > Ca > Mg (Tabela 18). Já Wang et al. (2019) observaram, quando analisaram as perdas de nutrientes por escoamento superficial de diferentes declives, a ordem decrescente das perdas dada como: Ca > K > Mg > P. Apesar disso, perda em grande quantidade de Ca pode contribuir na acidificação do solo (WANG et al., 2019).

Oliveira et al. (2015) analisaram a água da enxurrada em seus experimentos, bem como quantificaram maiores teores de potássio que fósforo. De acordo com os autores, a explicação disso provém da maior solubilidade do potássio, que facilita seu transporte pela água, além de estar em maior quantidade no solo que o fósforo.

A perda total de água obteve um valor próximo ao de perda de solo, o que corrobora com a comparação feita por Bertol et al. (2014). Como as coletas de água duraram 3 meses, pode-se, portanto, simular as perdas anuais multiplicando os valores por 4 (pois 3 meses × 4 = 12 meses = 1 ano). Dessa forma, a perda de solo teria como valor estimado de 630,56 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Este valor situou-se abaixo do limite de tolerância para Latossolo Vermelho distrófico típico, que é de 11.100 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (ZOLIN et al., 2016).

Cândido et al. (2014) também encontraram, por meio de coletas da perda de solo em Latossolo Vermelho distrófico típico, valores próximos em torno de 505 a 853 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Já em Latossolo Amarelo álico coeso de textura franco-arenosa, Lima et al. (2015) obtiveram perda de solo de 3.912 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

#### **4.8 Sugestões para trabalhos futuros**

Os coeficientes de determinação ficaram muito aquém do desejado nos modelos da seção 4.6 Modelos. Portanto, as propostas futuras serão de utilizar modelos de regressão por quadrados mínimos parciais para relacionar as quatro variáveis: densidade do solo, macroporosidade, massa seca da palha e cobertura verde. Na natureza, no caso, esses fatores atuam de forma concomitante.

Além disso, para os submodelos de palha e cobertura verde, uma outra opção será utilizar séries de Fourier para simular dados de vários anos. Vale salientar que as séries de Fourier são equações trigonométricas, portanto, podem ser adequadas aos dados periódicos. No SPD do Oeste do Paraná, no caso, ocorre anualmente a rotação de culturas entre milho e soja.

## 5. CONCLUSÕES

1. De modo geral, as maiores perdas de água, solo e nutrientes estão relacionadas com maior densidade e menor macroporosidade do solo.
2. A relação entre a massa seca da palha e a cobertura verde foi inversamente proporcional, mostrando que a combinação entre palha e cobertura verde se mostrou efetiva para o controle da erosão ao longo do tempo.
3. A função definida por partes foi adequada para estimar valores de cobertura verde ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADVIENTO-BORBE, M. A. A. et al. Water quality of surface runoff and lint yield in cotton under furrow irrigation in Northeast Arkansas. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 613, p. 81-87, 2018.

ALMEIDA, W. S. de et al. Erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1110-1119, 2016.

AULER, A. C. et al. Densidade de agregados de solo: Uso da balança de Jolly em aulas de física experimental para educação em ciência do solo. **Revista Brasileira de Ensino da Física**, São Paulo, v. 39, n. 1, 2017.

BERTOL, I. et al. Water erosion in no-tillage monoculture and intercropped systems along contour lines. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p. 521-528, 2013.

BERTOL, I. et al. Soil water erosion under different cultivation systems and different fertilization rates and forms over 10 years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1918-1928, 2014.

BERTOL, I. et al. Nutrient and organic carbon losses, enrichment rate, and cost of water erosion. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, 2017.

BORGES, P. A. P.; PADOIN, E.L. Exemplos de métodos computacionais aplicados a problemas na modelagem matemática. **ERAD—Escola Regional de Alto Desempenho**, São Paulo, v. 6, p. 5-20, 2006.

BOSCH, D. D. et al. Dissolved nitrogen, chloride, and potassium loss from fields in conventional and conservation tillage. **Transactions of the ASABE**, Raleigh, v. 58, n. 6, p. 1559-1571, 2015.

BRAMORSKI, J.; TRIVELIN, P. C. O.; CRESTANA, S. Nitrogen loss by erosion from mechanically tilled and untilled soil under successive simulated rainfalls. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 1204-1211, 2015.

BROCH, D. T.; KLEIN, V. A. Maximum soil density of Entisols as a function of silt content. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 12, 2017.

CÂNDIDO, B.M. et al. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na bacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, 2014.

CANOPEO APP. **Canopeo Web**. Oklahoma State University Department of Plant and Soil Sciences. Disponível em: <<http://canopeoapp.com>>. Acesso em: 24 de Jul. 2018.

CARVALHO, D. F. D. et al. Water erosion and soil water infiltration in different stages of corn development and tillage systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 11, p. 1072-1078, 2015.

CATEN, A.; MINELLA, J.P.G.; PEDRO, R.A. Desintensificação do uso da terra e sua relação com a erosão do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 1006-1014, 2012.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 5 Safra 2017/18 - Quinto levantamento, Brasília, p. 1-140, fevereiro 2018.

COSTA, N. R. et al. Atributos do Solo e Acúmulo de Carbono na Integração Lavoura-Pecuária em Sistema Plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, 2015.

DECHEN, S. C. F. et al. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, São Paulo, v. 74, n. 2, 2015.

DIAS, C. **Simplificação do Plantio Direto reduz eficiência da lavoura**. Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2014. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/1909275/simplificacao-do-plantio-direto-reduz-eficiencia-da-lavoura>>. Acesso em: 24 de Jul. 2018.

DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; EVRARD, O. Measuring and modelling soil erosion and sediment yields in a large cultivated catchment under no-till of Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 174, p. 24-33, 2017.

DRESCHER, M. S. et al. Fertilizer shanks to promote soil decompaction in the seeding operation. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 3, 2017.

EDUARDO, E. N. et al. Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em Argissolo Vermelho-Amarelo, sob condições de chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 5. ed. Brasília, DF, 2018.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa, 1997.

FARIAS, V. L. da S. et al. Modeling of phosphorus losses by water erosion. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 38, n. 1, p. 149-157, 2018.

FILHO, M. V. M. et al. Modelos para estimativa do subfator cobertura-manejo (Cill) relativo à erosão entressulcos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 603-611, Dec. 2004.

FILHO, O. J. V. et al. Diagnóstico e reabilitação agroambiental de trecho de bacia hidrográfica por sensoriamento remoto e turbidez da água. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1099-1109, 2016.

GAO, X. et al. Effects of soil erosion on soybean yield as estimated by simulating gradually eroded soil profiles. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 145, p. 126-134, 2015.

GUBIANI, P. I. et al. Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, 2015.

GUIMARÃES, C. C. B.; VALLADARES, G. S.; MARTINS, C. M. Uso das terras e declividade no sertão central do Ceará, Brasil. **Revista Nordestina de Biologia**, João Pessoa, v. 24, n. 1, p. 3-18, 2016.

GUIMARÃES, R. M. L. et al. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, 2013.

GVOZDENOVICH, J. J. et al. ¿Puede wepp mejorar la predicción de la erosión de suelos respecto a USLE?. **Ciencia del suelo**, Buenos Aires, v. 35, n. 2, p. 259-272, 2017.

HERRADA, M. R.; LEANDRO, W. M.; FERREIRA, E. P. de B. Leguminosas isoladas e consorciadas com milho em diferentes sistemas de manejo do solo no feijão orgânico. **Terra Latinoamericana**, Chapingo, v. 35, n. 4, p. 293-299, 2017.

KAUFMANN, D. S. et al. Impacts of Pig Slurry Applied to Two Different Soils on Nutrient Transport by Runoff. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 43, 2019.

KEESSTRA, S. et al. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 551, p. 357-366, 2016.

LEITE, M. H. S. et al. Loss of water and nutrients in different soil tillage systems subjected to natural rainfall in the state of Mato Grosso, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 38, n. 6, p. 864-873, 2018.

LEVENBERG, K. A method for the solution of certain problems in least squares. **Quarterly of Applied Mathematics**, Providence, v.2, p.164-168, 1944.

LIMA, C. A. de et al. Práticas agrícolas no cultivo da mandioca e suas relações com o escoamento superficial, perdas de solo e água. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 4, p. 697-706, 2015.

LIMA, C.B.; SANTOS, R.F.; SIQUEIRA, J. Análise da variação das temperaturas mínimas para Cascavel-PR. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Curitiba, v. 1, p. 1-21, 2012.

MARIOTI, J. et al. Erosão hídrica em semeadura direta de milho e soja nas direções da pendente e em contorno ao declive, comparada ao solo sem cultivo e descoberto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, 2013.

MARQUARDT, D. An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, New York, v. 11, p. 431-441, 1963.

MAZURANA, M. et al. Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 1, p. 60-71, 2017.

MELLO, C. R. de et al. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 1, p. 7-25, 2016.

MENDONÇA, P. G. et al. Spatial uncertainty of nutrient loss by erosion in sugarcane harvesting scenarios. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 1181-1189, 2015.

MIGUEL, P. et al. Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, 2014.

MORAES, M. T. de et al. Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 53, n. 4, p. 464-477, 2018.

NASCIMENTO, V. do et al. Economic analysis of rice and common bean production in succession to green manure crops and mechanical soil decompression in Brazilian Savannah. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 63, n. 3, 2016.

OLIVEIRA, L. C. de et al. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica em uma estrada florestal na Serra Catarinense. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 655-665, jul./set. 2015.

OLIVEIRA, D. M. S.; LIMA, R. P. de; VERBURG, E. E. J. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejetos líquidos suíno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, Campina Grande, v. 19, n. 3, 2015.

OLIVETTI, D. et al. Spatial and temporal modeling of water erosion in dystrophic Red Latosol (oxisol) used for farming and cattle raising activities in a sub-basin in the South of Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 39, n. 1, p. 58-67, 2015.

OUYANG, W. et al. Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 613, p. 798-809, 2018.

PANDEY, A. et al. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. **Catena**, Amsterdam, v. 147, p. 595-620, 2016.

PROSDOCIMI, M. et al. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 547, p. 323-330, 2016.

RAMOS, Júlio César et al. Influência das condições de superfície e do cultivo do solo na erosão hídrica em um Cambissolo Húmico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, 2014.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, Canoas, v.27, p.29-48, 2003.

RÉUS, T. F.; JÚNIOR, C. A. P. da S.; FONTENELE, H. B. Efeito do excesso de peso dos veículos comerciais de carga a partir de uma análise empírico-mecânica. **Revista CIATEC-UPF**, Passo Fundo, v. 8, n. 2, p. 50-61, 2016.

RODRIGUES, V. A. et al. Avaliação do escoamento e interceptação da água das chuvas. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 01, 2015.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. D. S.; REICHERT, J. M. Compactação causada pelo tráfego de feller buncher e skidder em um Neossolo Regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, 2015.

SILVA, B. P. A. da et al. Efeito residual de doses de nitrogênio aplicadas em pastos de capim-braquiária sobre a produção de milho para silagem em sistemas integrados. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 18, p. 1-13, 2017.

SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. de. Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física de um Latossolo vermelho cultivado com cana-de-açúcar. **Mercator-Revista de Geografia da UFC**, Fortaleza, v. 14, n. 3, 2015.

SILVA, F. R. D.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. D. Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, 2014.

STATSOFT, INC. **Statistica (data analysis software system)**, version 10. 2011

SZYMCZAK, D.A. et al. Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de Pinus taeda L. na região sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 4, 2014.

TAO, W.; WU, J.; WANG, Q. Mathematical model of sediment and solute transport along slope land in different rainfall pattern conditions. **Scientific Reports**, London, v. 7, p. 44082, 2017.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing [Internet]**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2015.

RAMOS, Júlio César et al. Influência das condições de superfície e do cultivo do solo na erosão hídrica em um Cambissolo Húmico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, 2014.

UNEP. **The Economics of Land Degradation in Africa, ELD Initiative**. Bonn, German: 2015. Disponível em: <[http://www.eld-initiative.org/fileadmin/pdf/ELD-unep-report\\_07\\_spec\\_72dpi.pdf](http://www.eld-initiative.org/fileadmin/pdf/ELD-unep-report_07_spec_72dpi.pdf)>. Acesso em: 16 Jul. de 2018.

VANWALLEGHEM, T. et al. Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. **Anthropocene**, Boulder, v. 17, p. 13-29, 2017.

VOLK, L.B.D.S; COGO, N.P. Erosão hídrica, em três momentos da cultura do milho, influenciada por métodos de preparo do solo e semeadura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, 2014.

WANG, W. et al. Nutrition loss through surface runoff from slope lands and its implications for agricultural management. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 212, p. 226-231, 2019.

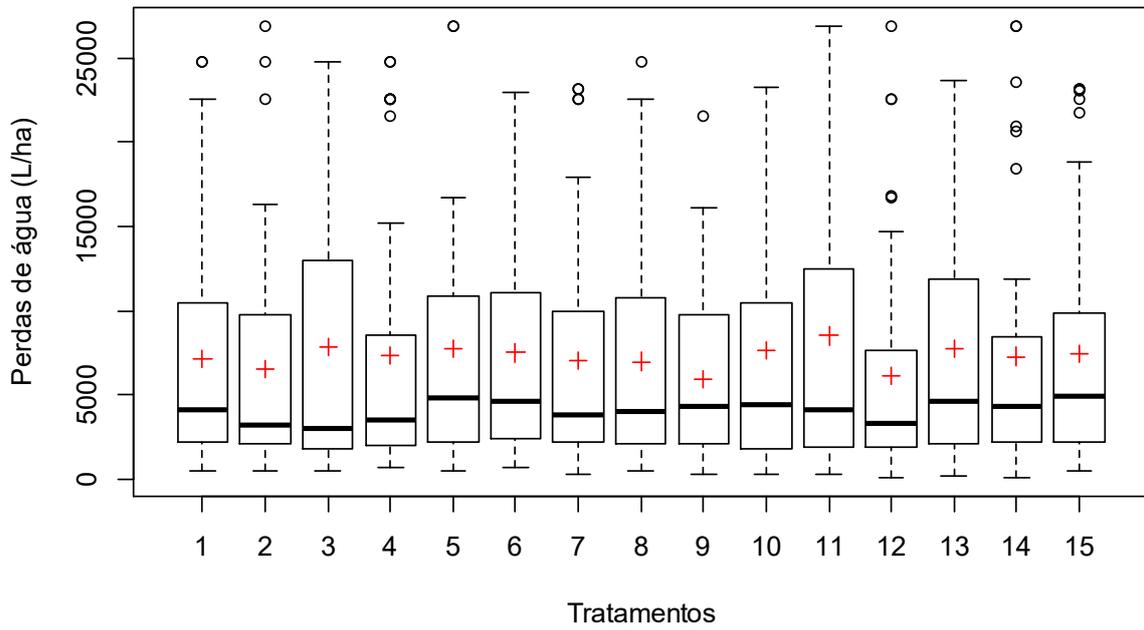
WANG, Z. et al. Simulating crop yield, surface runoff, tile drainage and phosphorus loss in a clay loam soil of the Lake Erie region using EPIC. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 204, p. 212-221, 2018.

WREGE, M. S. et al. **Atlas climático da região sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012.

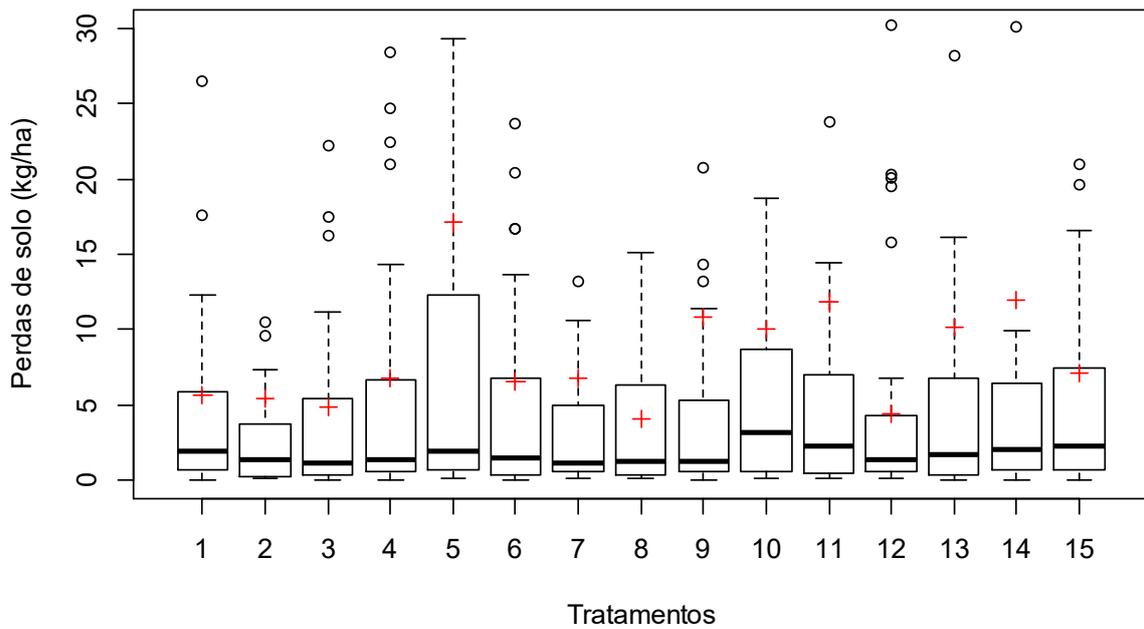
XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.1743-1750, 1992.

ZOLIN, C. A. et al. Perda de solo e água sob integração lavoura-floresta e em sucessão soja-milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1223-1230, 2016.

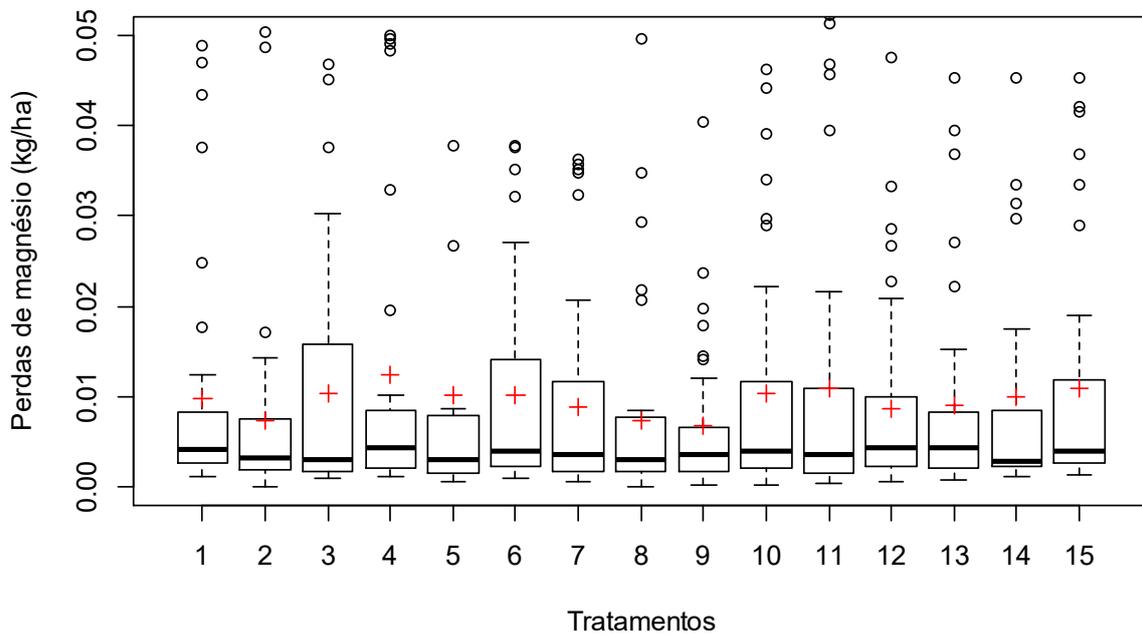
## Anexo 1



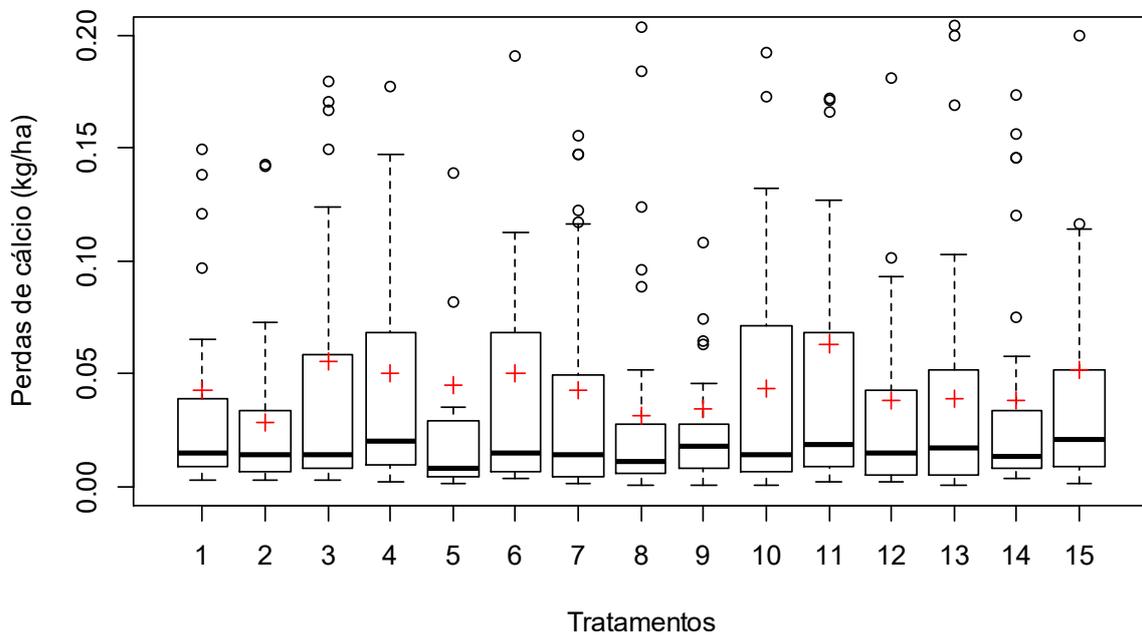
**Figura 32.** Boxplots das perdas de água, suas médias e algum dos pontos discrepantes.



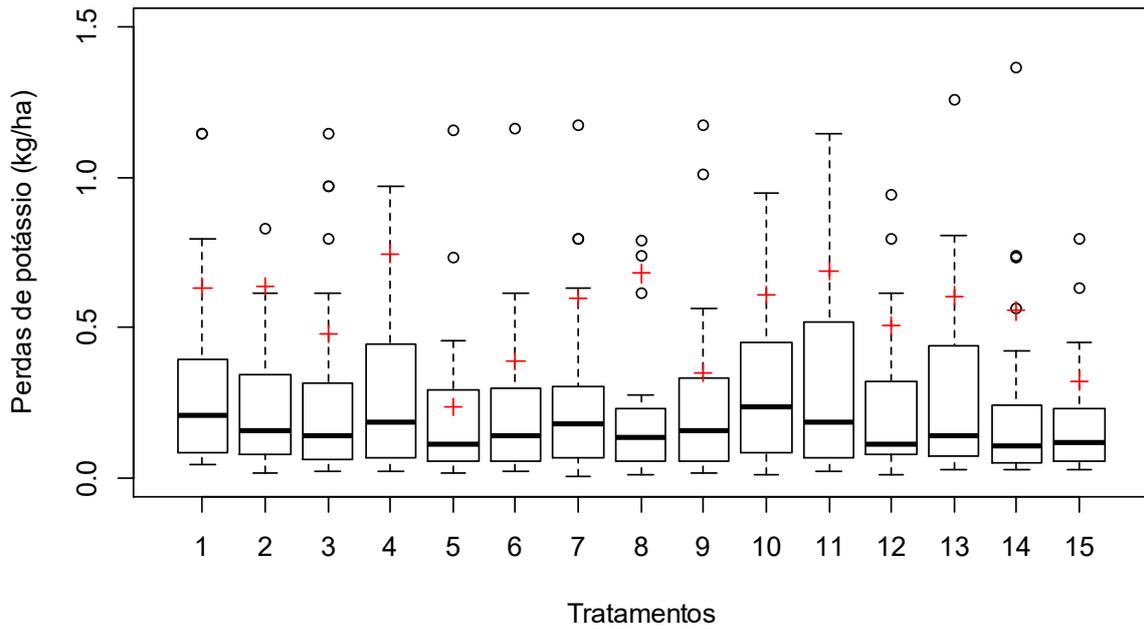
**Figura 33.** Boxplots das perdas de solo, suas médias e algum dos pontos discrepantes.



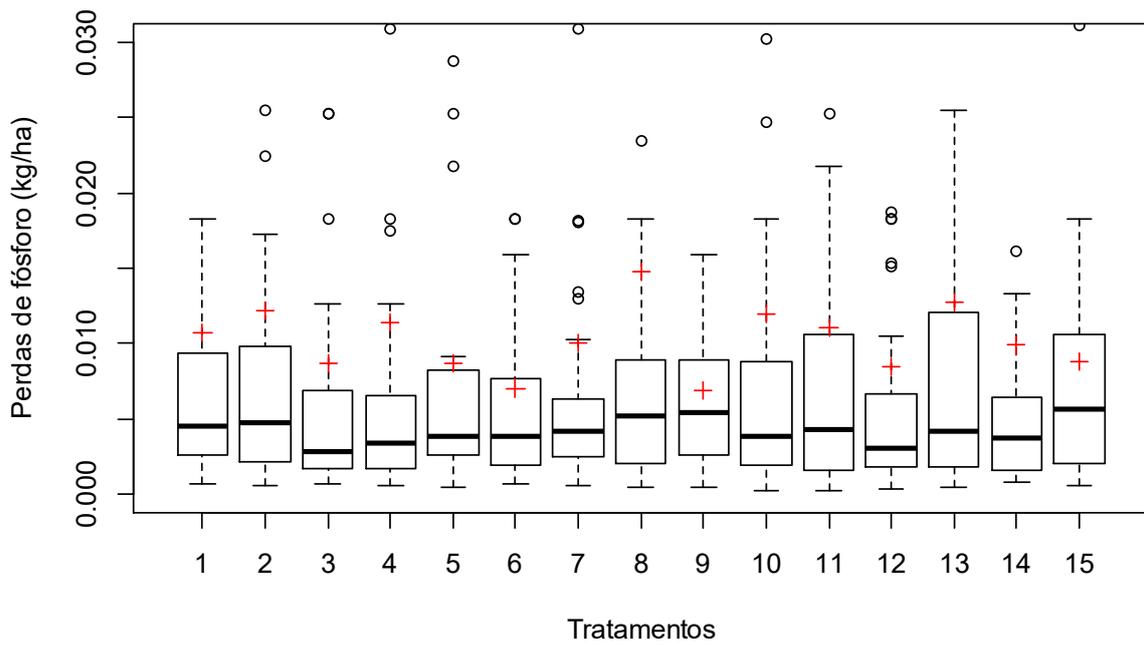
**Figura 34.** Boxplots das perdas de magnésio, suas médias e alguns dos pontos discrepantes.



**Figura 35.** Boxplots das perdas de cálcio, suas médias e alguns dos pontos discrepantes.



**Figura 36.** Boxplot das perdas de potássio, suas médias e alguns dos pontos discrepantes.



**Figura 37.** Boxplots das perdas de fósforo, suas médias e em alguns dos pontos discrepantes.

## Anexo 2

**Tabela 19.** Análise de variância (ANOVA) para perda de água

	GL	SQ	QM	F calc	Pr(>F)
P.água	28	5,0287e+08	17959747	0,3058	0,9998
Resíduo	547	3,2130e+10	58738816		

**Tabela 20.** Análise de variância (ANOVA) para perda de cálcio

	GL	SQ	QM	F calc	Pr(>F)
P.cálcio	28	1,1994e-07	4,2837e-09	0,8289	0,7196
Resíduo	538	2,7803e-06	5,1679e-09		

**Tabela 21.** Análise de variância (ANOVA) para perda de fósforo

	GL	SQ	QM	F calc	Pr(>F)
P.fósforo	28	4,8910e-09	1,7467e-10	0,3045	0,9998
Resíduo	539	3,0915e-07	5,7356e-10		

**Tabela 22.** Análise de variância (ANOVA) para perda de magnésio

	GL	SQ	QM	F calc	Pr(>F)
P.magnésio	28	2,236e-09	7,9867e-11	0,4616	0,9925
Resíduo	539	9,325e-08	1,7301e-10		

**Tabela 23.** Análise de variância (ANOVA) para perda de potássio

	GL	SQ	QM	F calc	Pr(>F)
P.potássio	28	0,0000181	6,4645e-07	0,2504	1
Resíduo	539	0,0013918	2,5821e-06		

**Tabela 24.** Análise de variância (ANOVA) para perda de solo

	GL	SQ	QM	F calc	Pr(>F)
P.água	28	0,100038	0,0035849	0,9177	0,5893
Resíduo	535	2,08981	0,0039062		

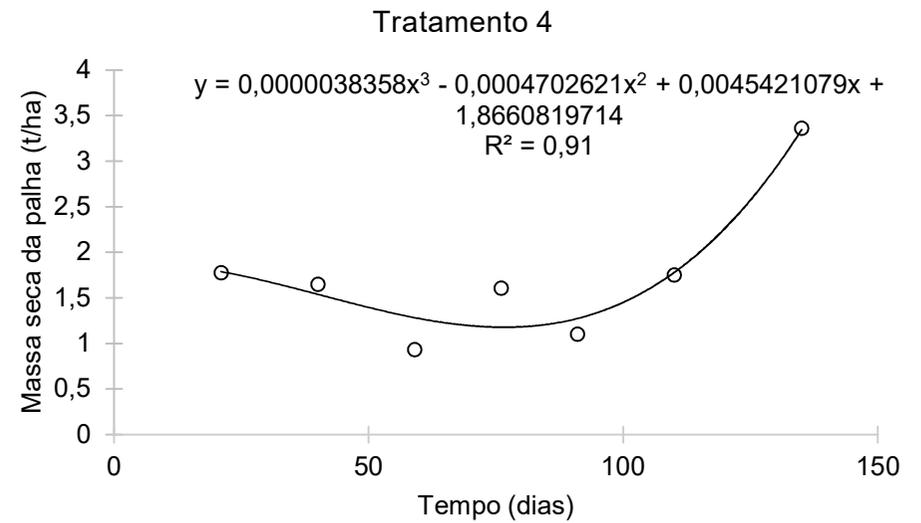
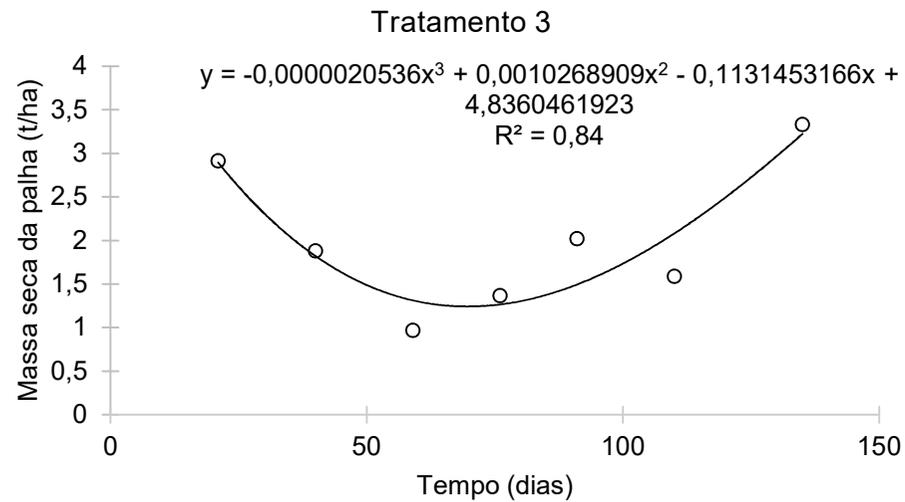
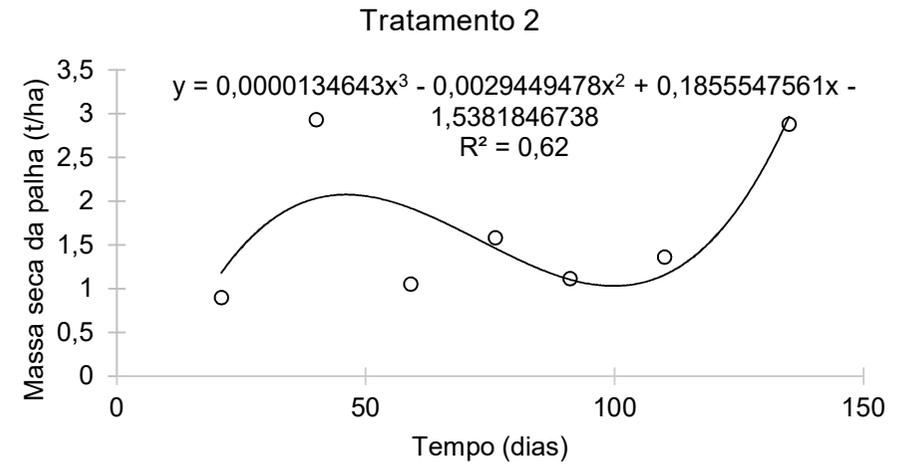
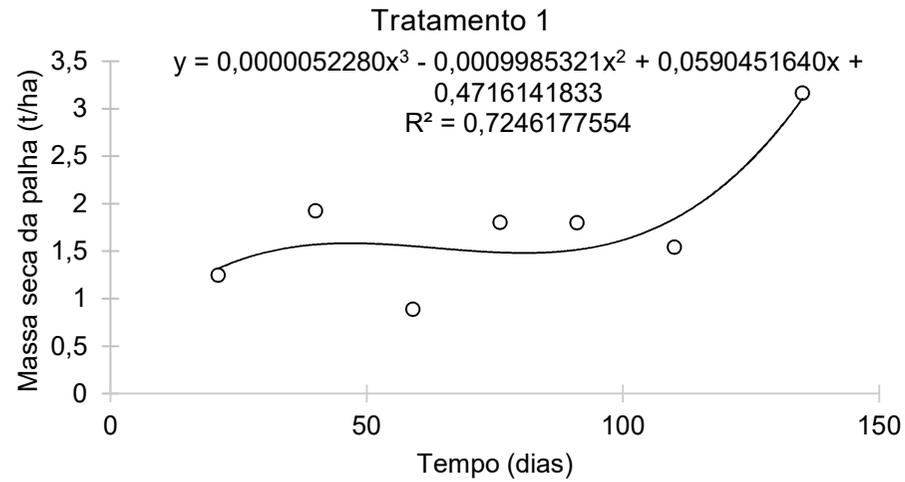
**Tabela 25.** Análise de variância (ANOVA) para massa seca da palha

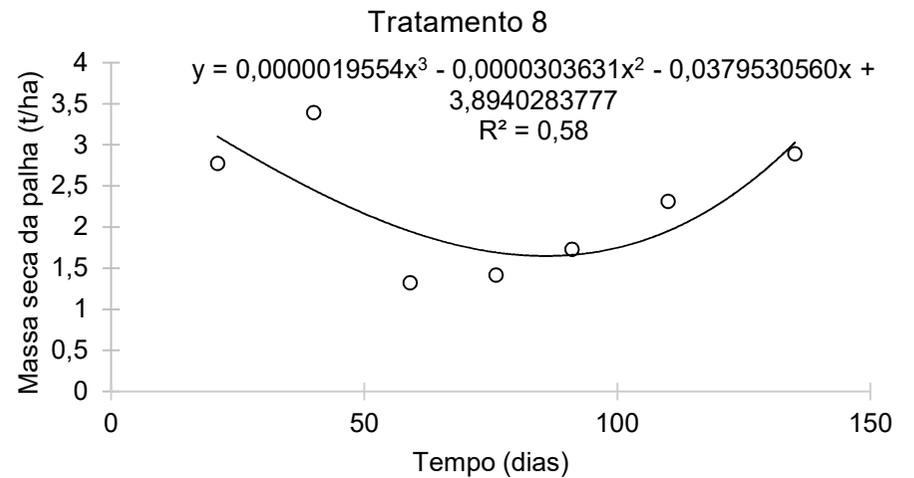
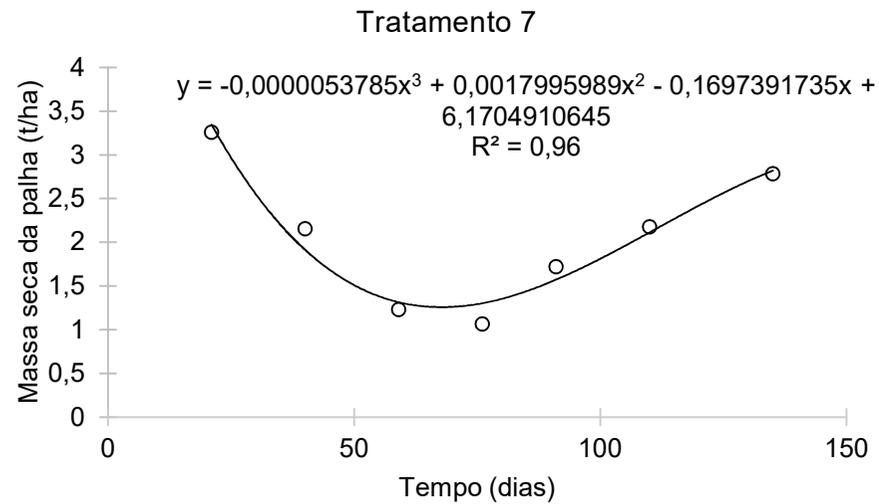
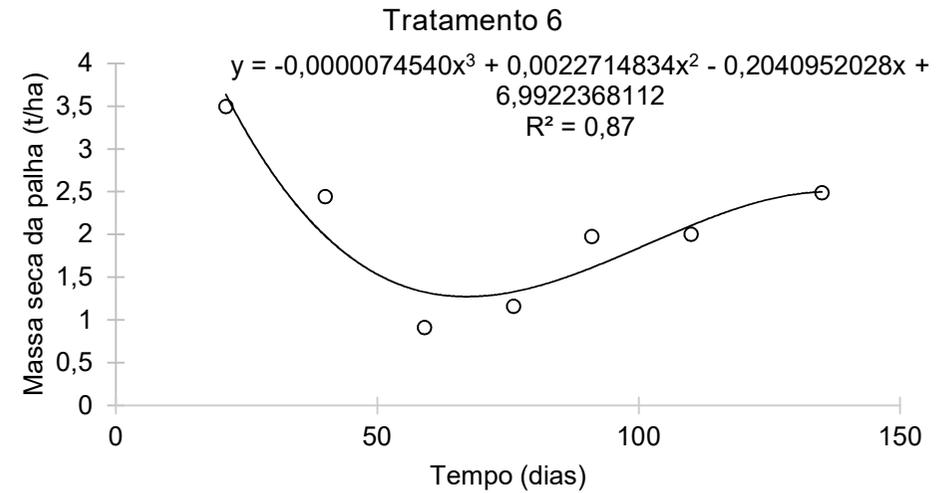
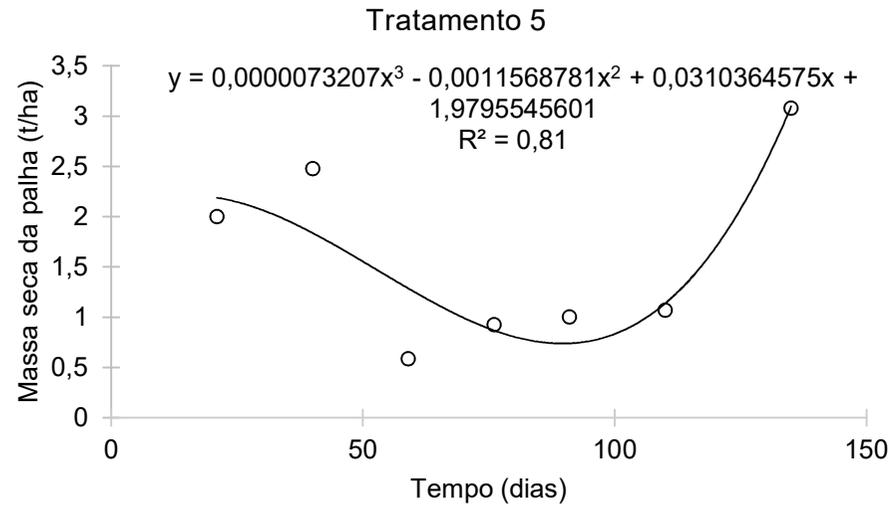
	GL	SQ	QM	F calc	Pr(>F)
Palha	28	2470	88,21	1,089	0,348
Resíduo	337	30543	81,02		

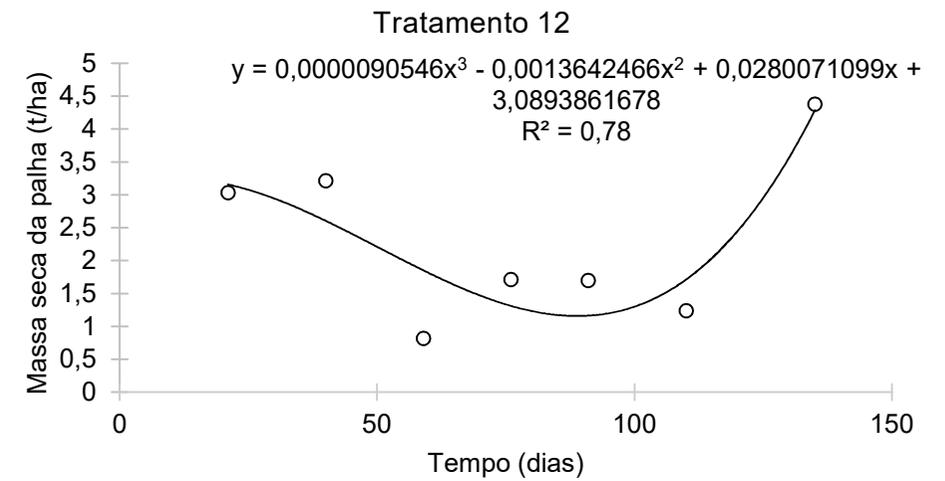
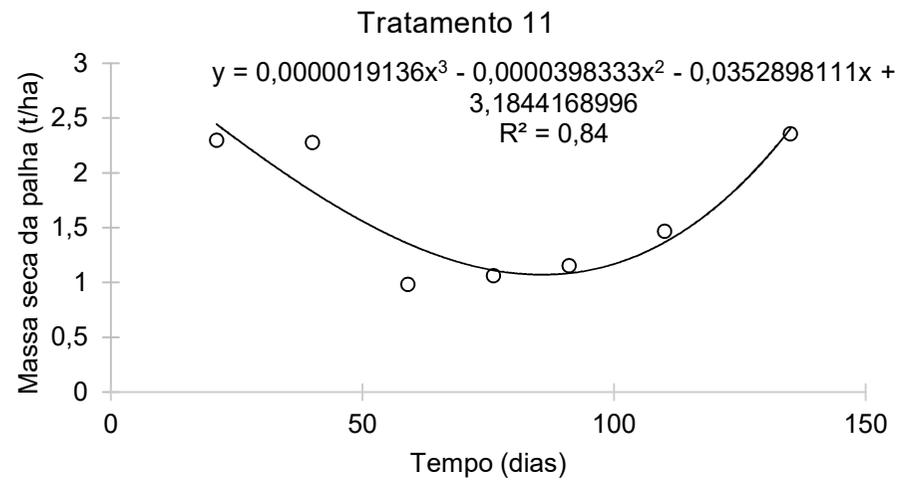
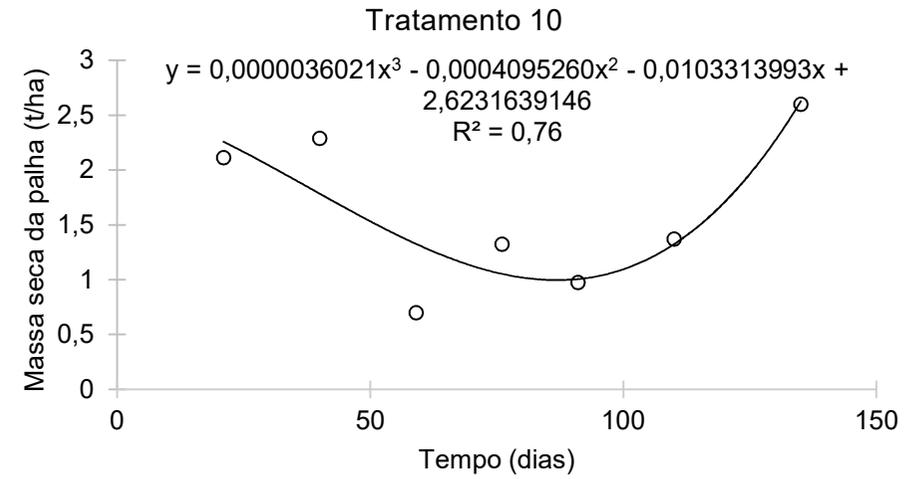
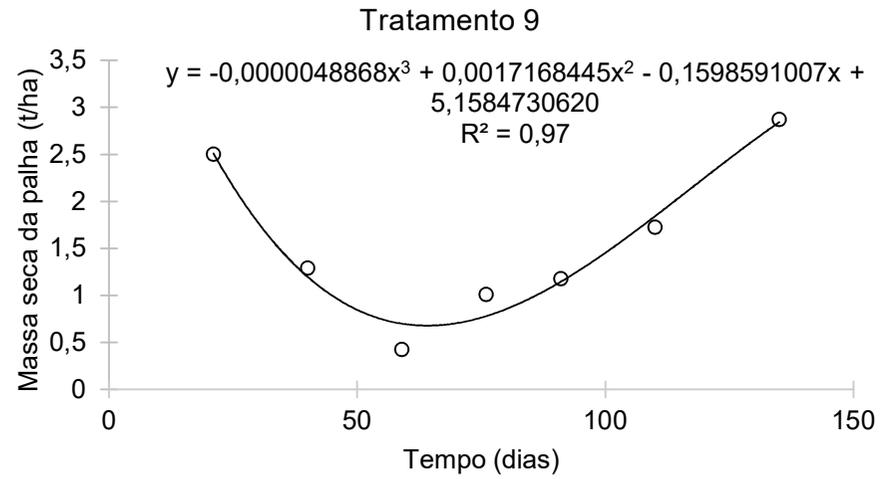
**Tabela 26.** Análise de variância (ANOVA) para cobertura verde

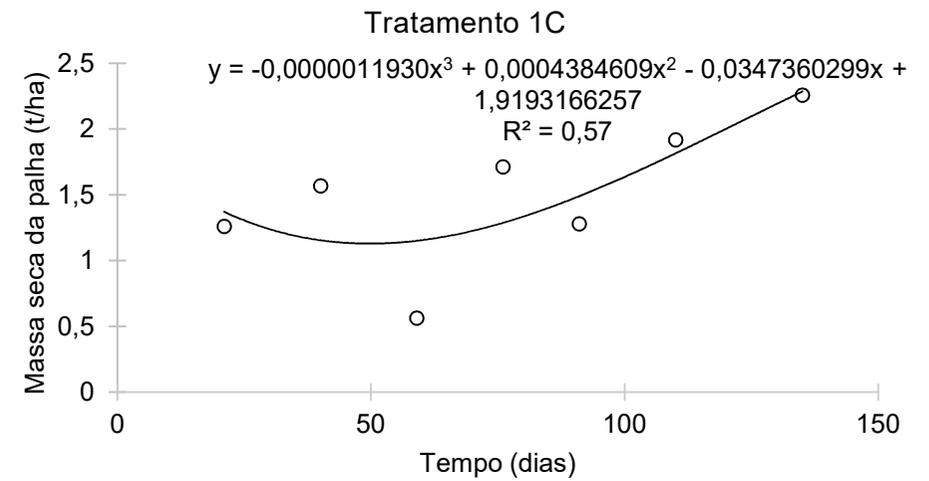
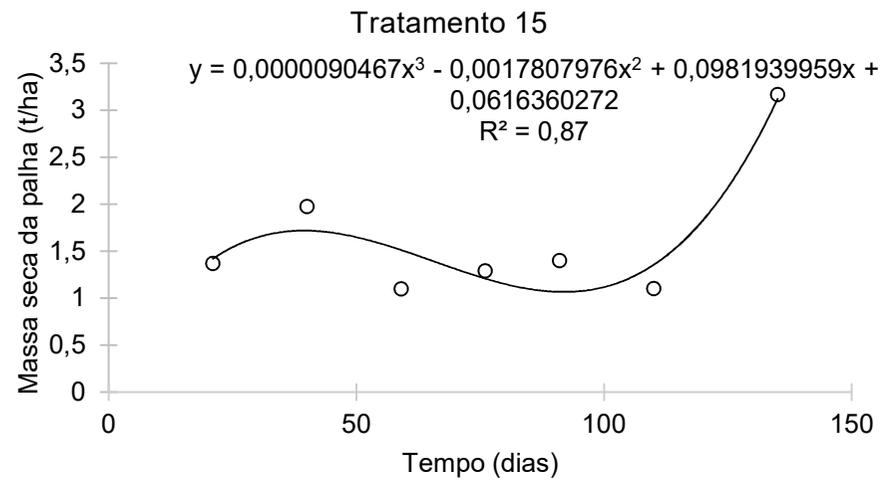
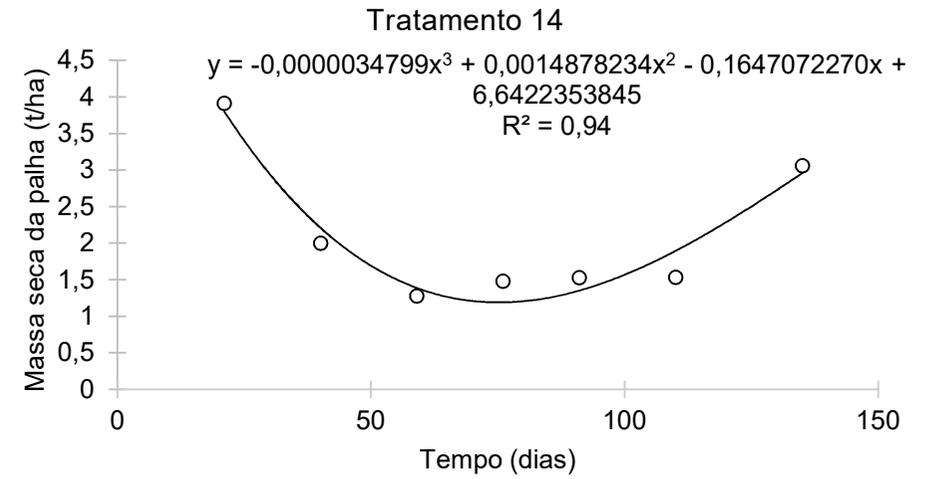
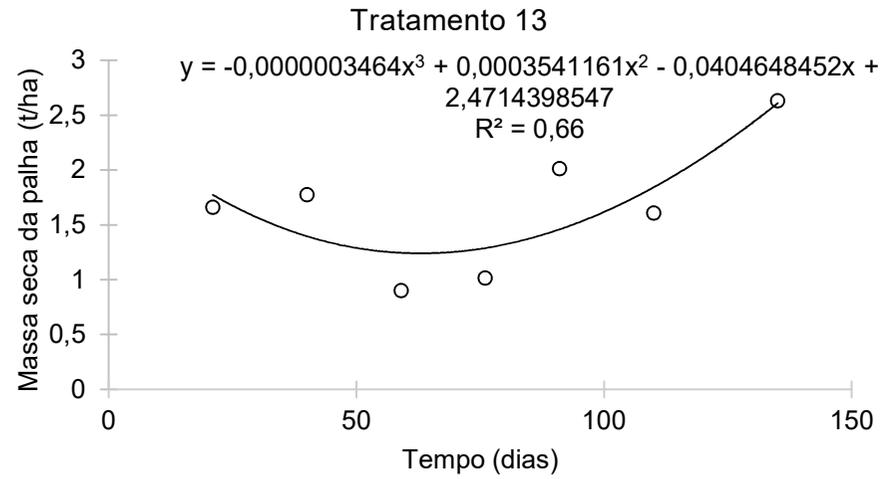
	GL	SQ	QM	F calc	Pr(>F)
Cobertura	28	381	13,6	0,008	1
Resíduo	319	531070	1664,8		

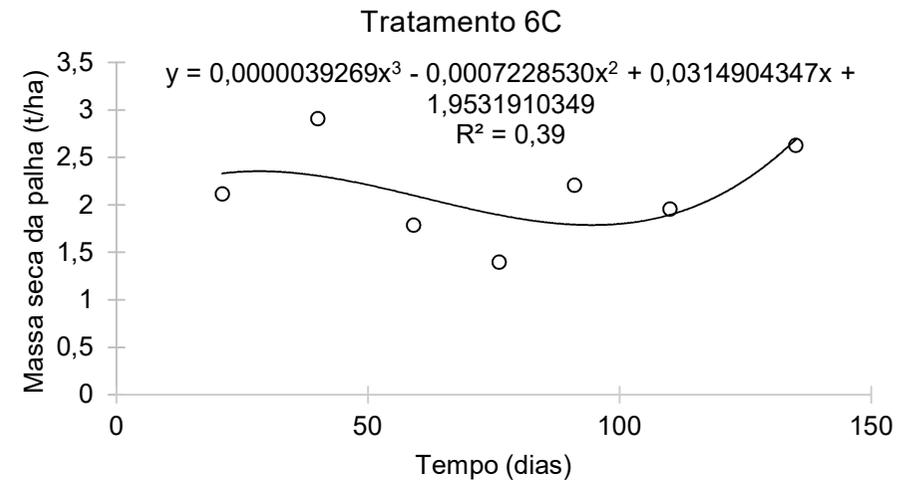
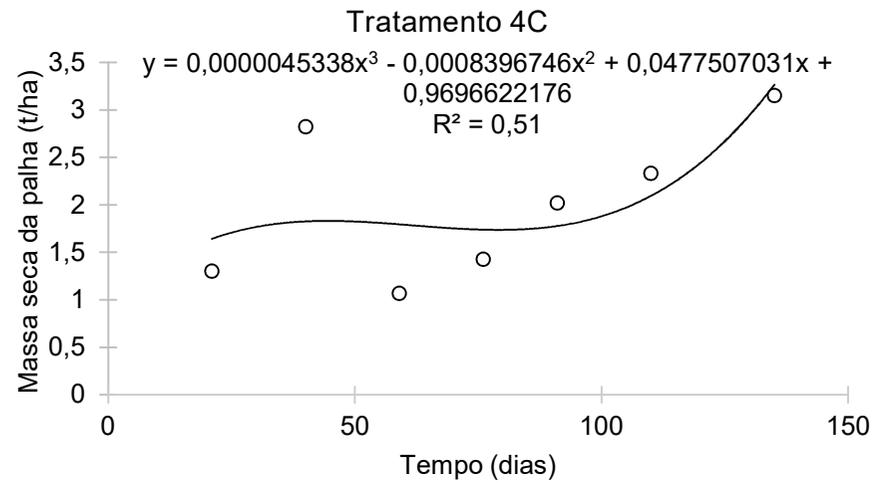
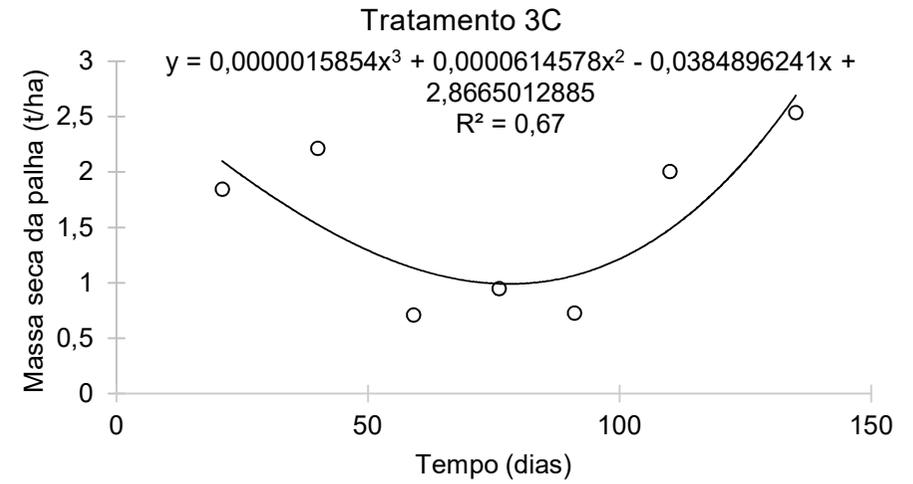
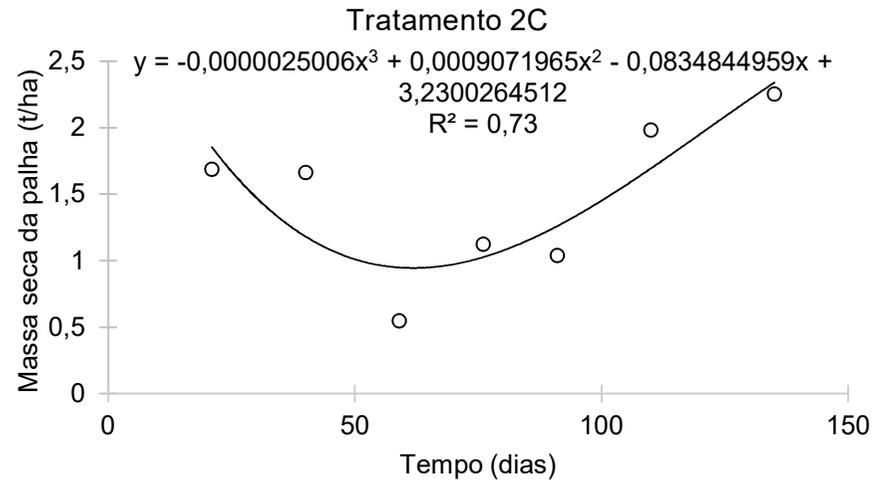
## Anexo 3

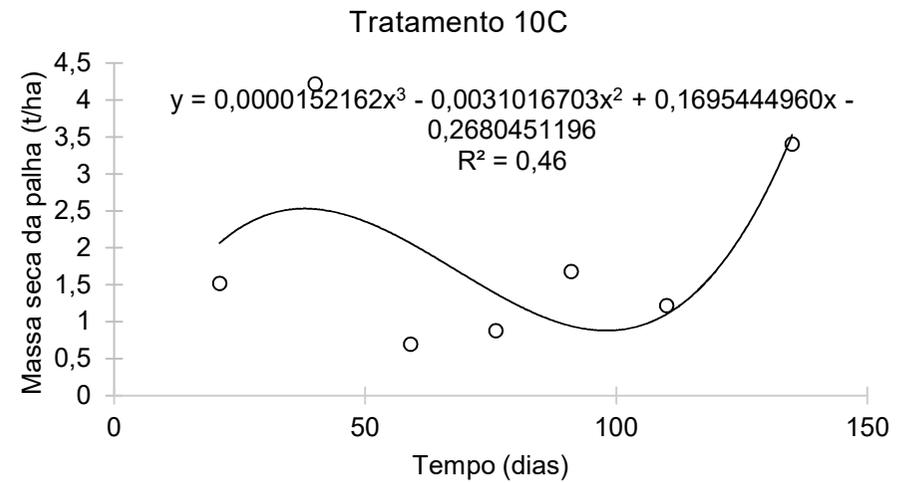
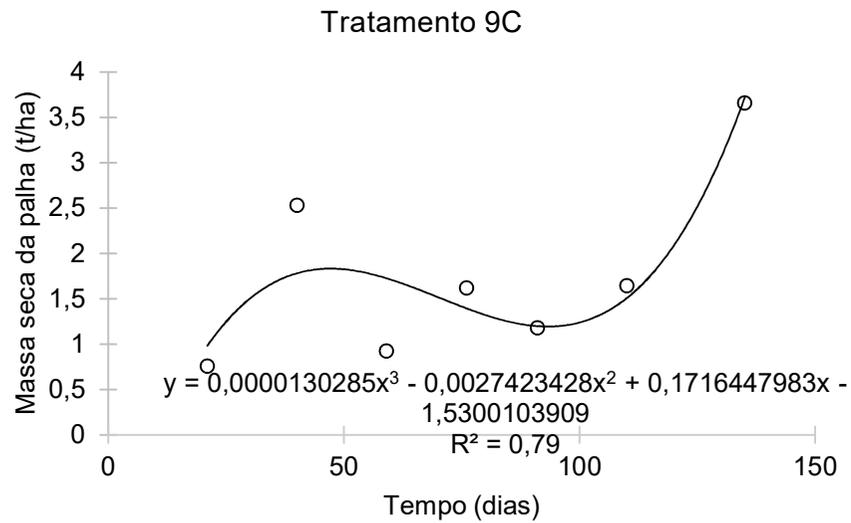
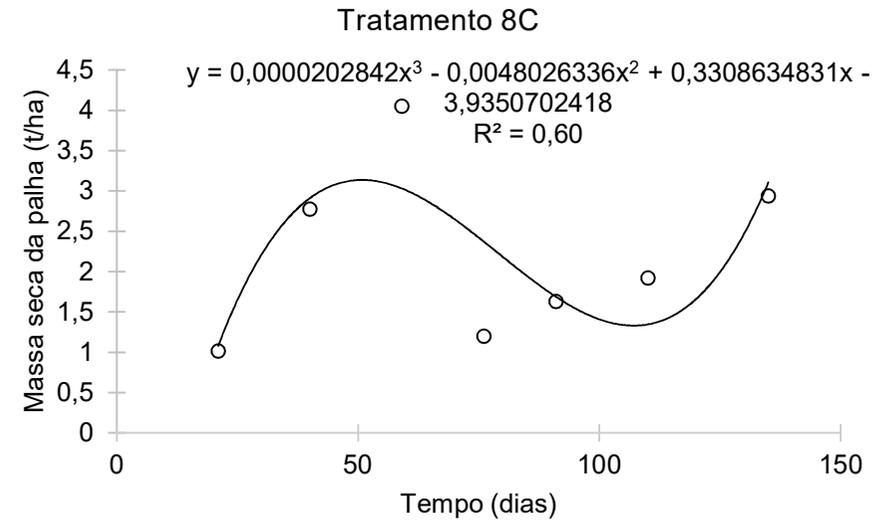
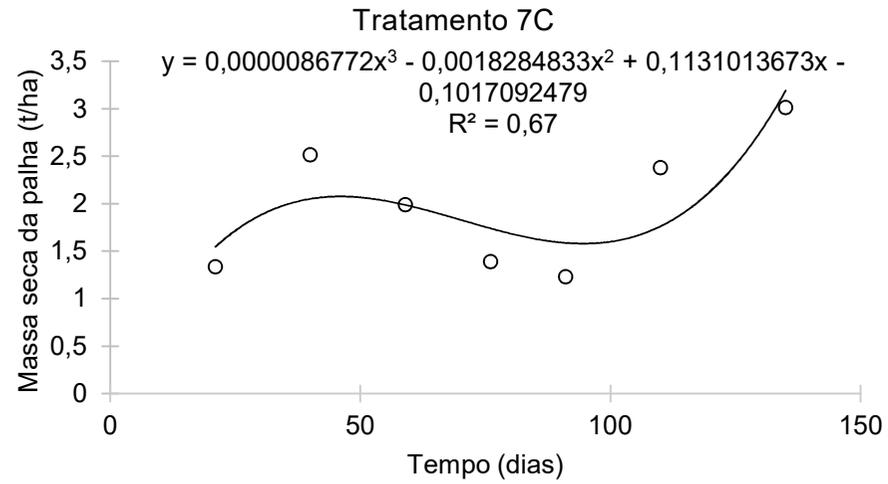


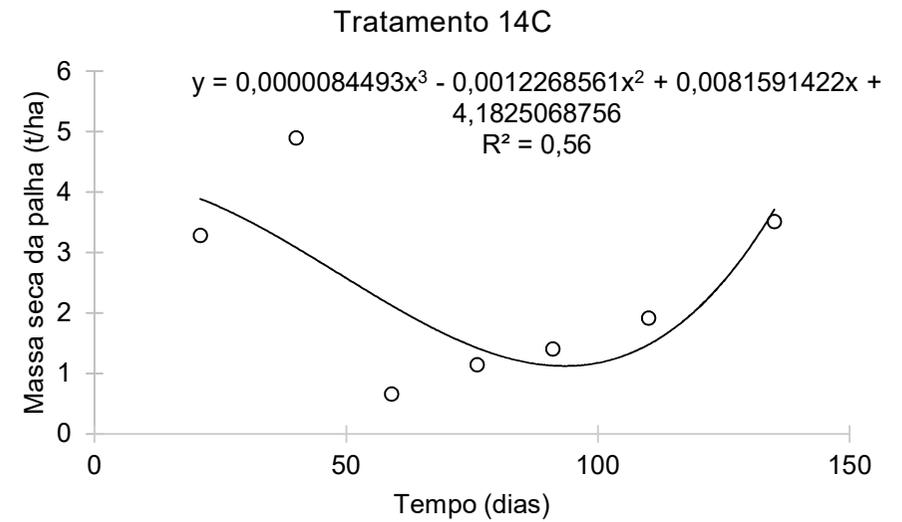
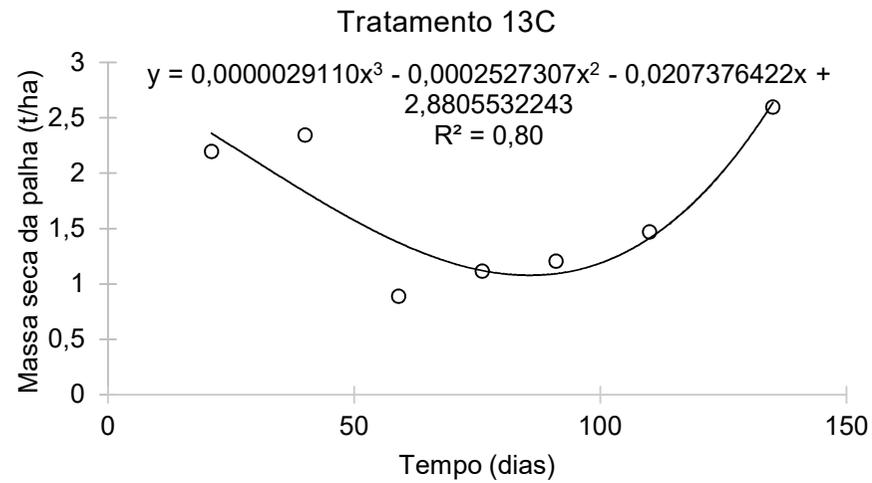
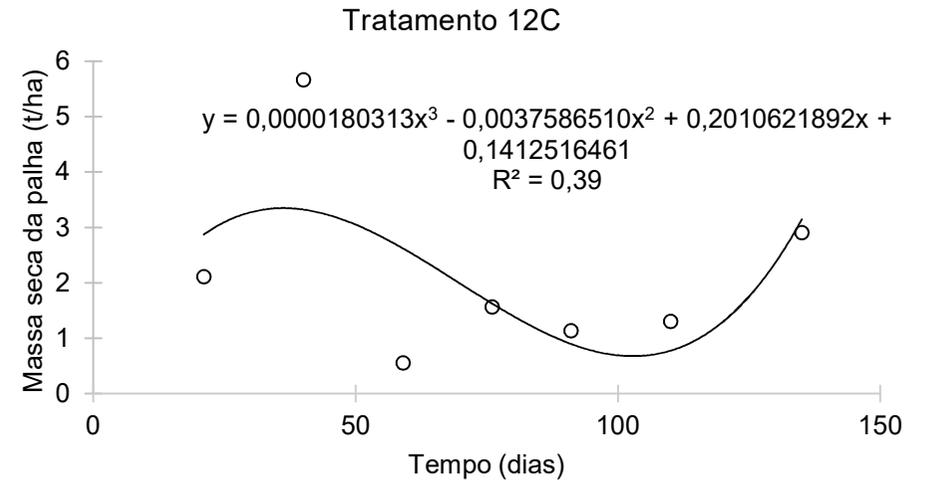
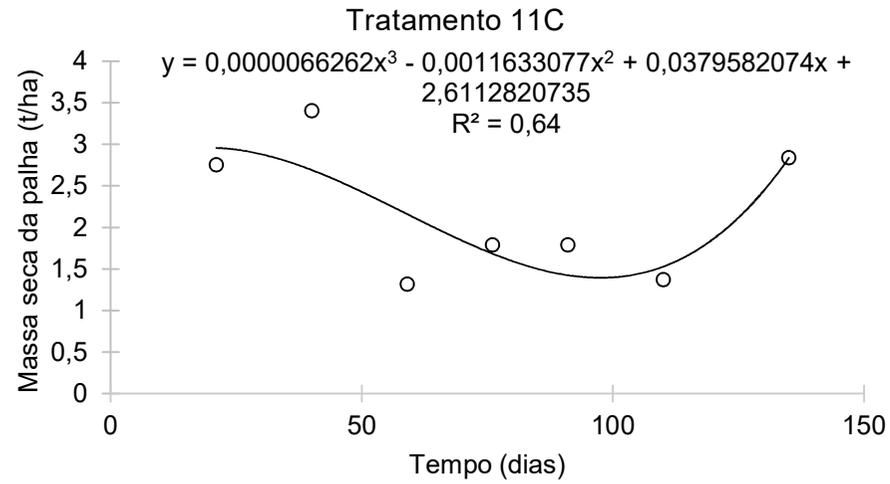


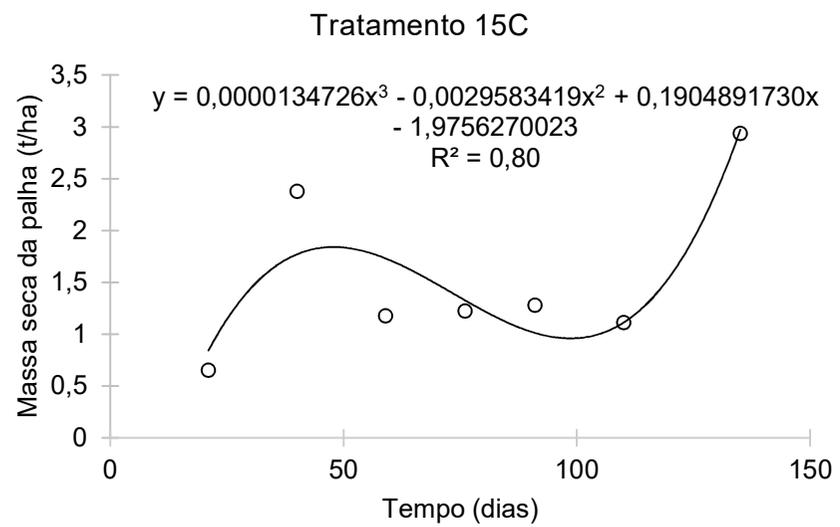








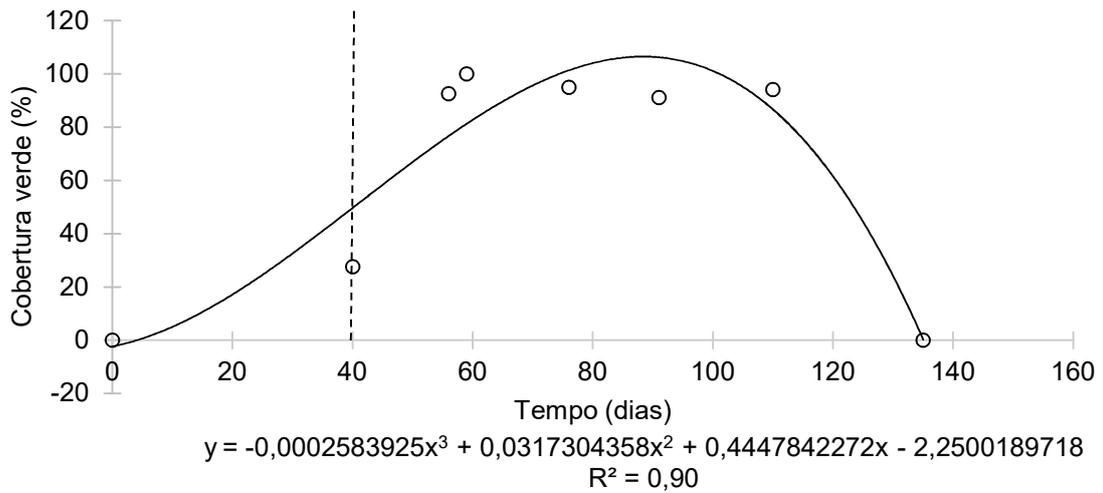




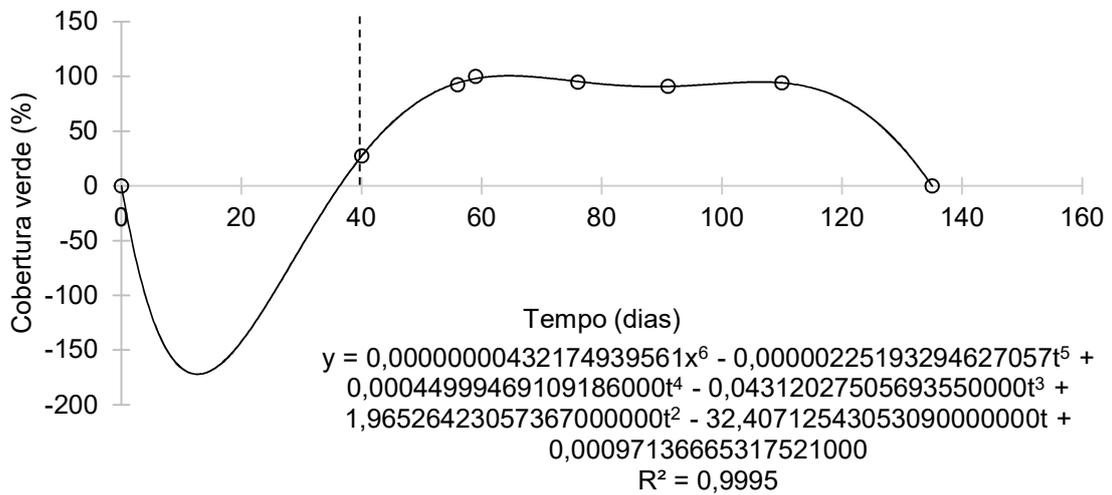
### Anexo 4

$$Cob_1(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

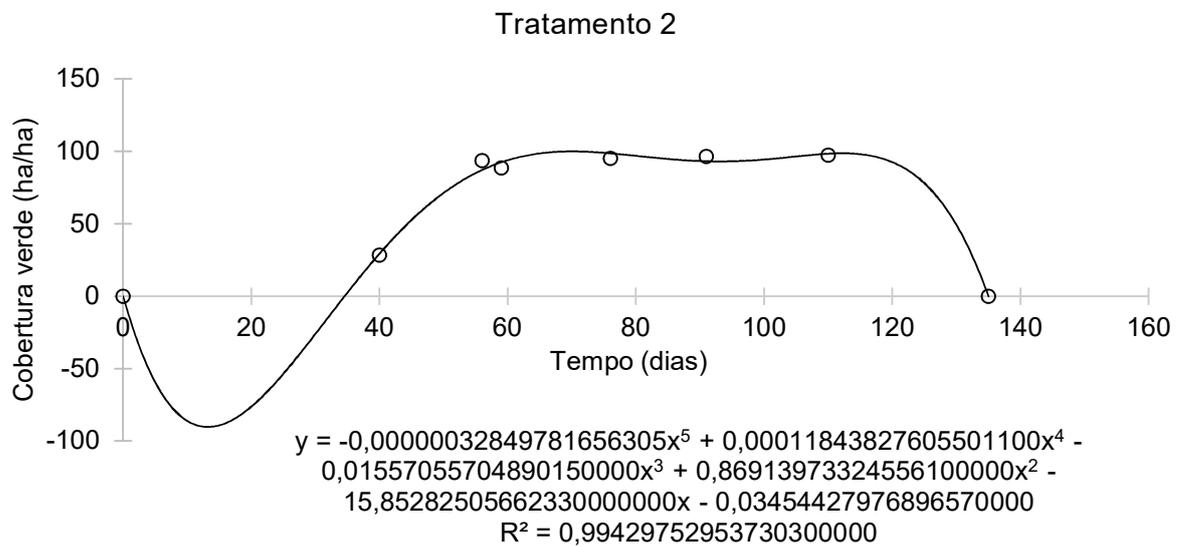
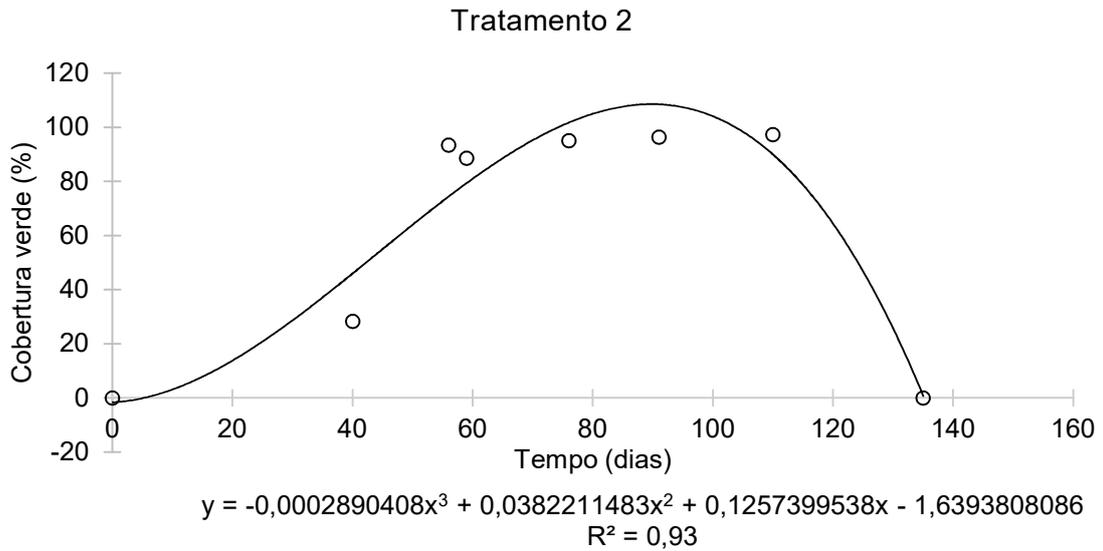
#### Tratamento 1



#### Tratamento 1

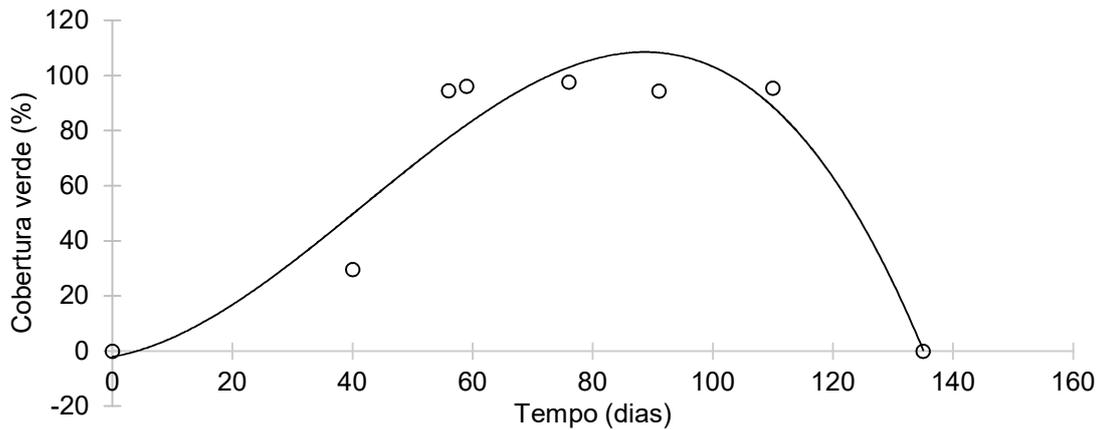


$$Cob_2(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^5 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



$$Cob_6(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

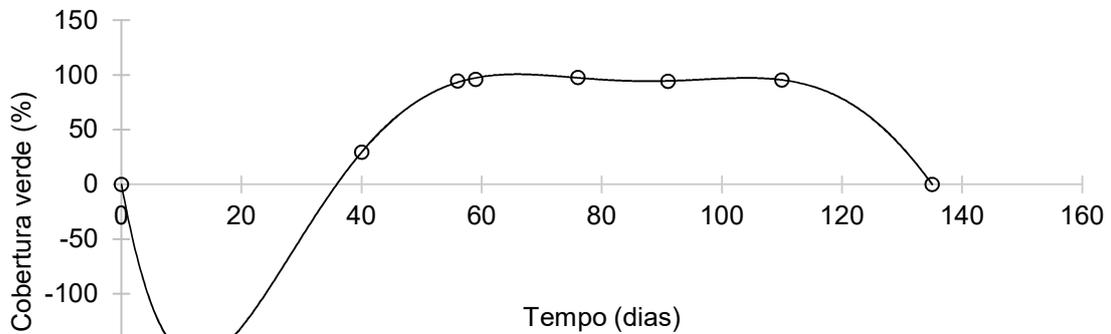
Tratamento 3



$$y = -0,0002687281x^3 + 0,0335670176x^2 + 0,3835160386x - 2,0346782265$$

$$R^2 = 0,92$$

Tratamento 3



$$y = 0,00000000417939190301x^6 - 0,00000215417111489036x^5 +$$

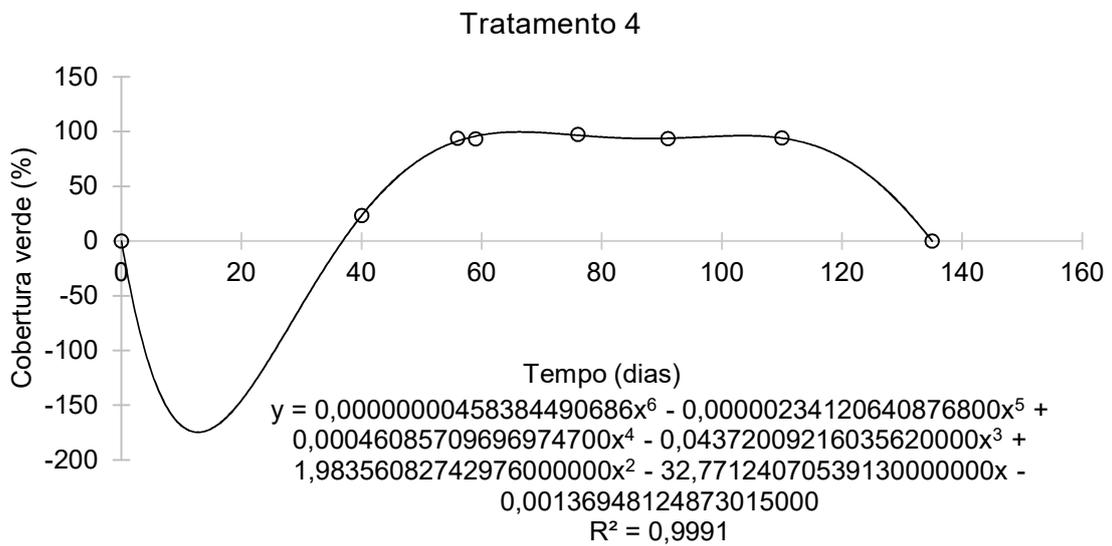
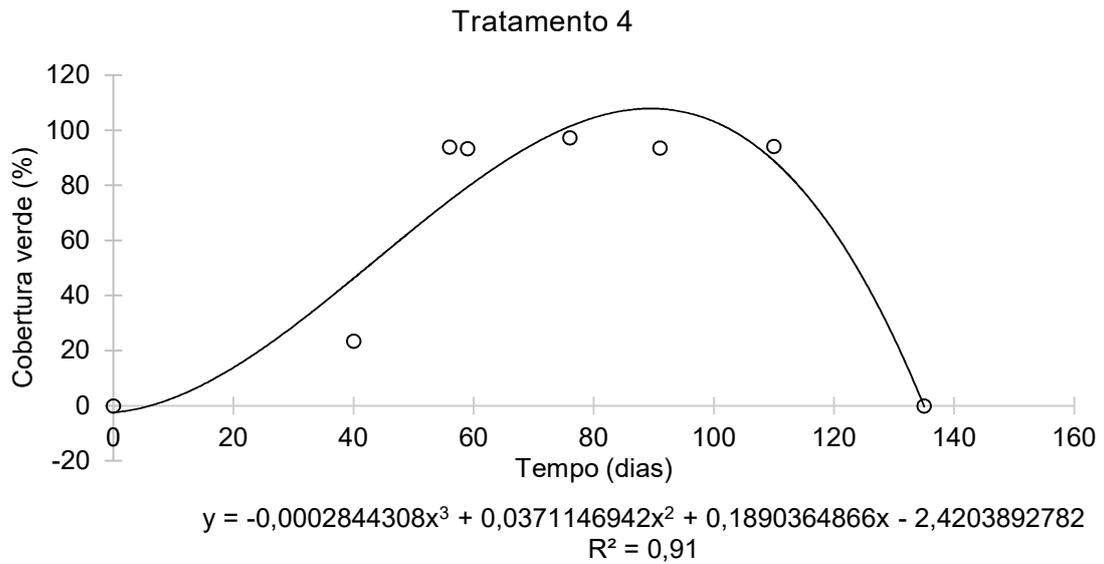
$$0,00042660327985544200x^4 - 0,04060328637547170000x^3 +$$

$$1,84214899995277000000x^2 - 30,19529519497880000000x -$$

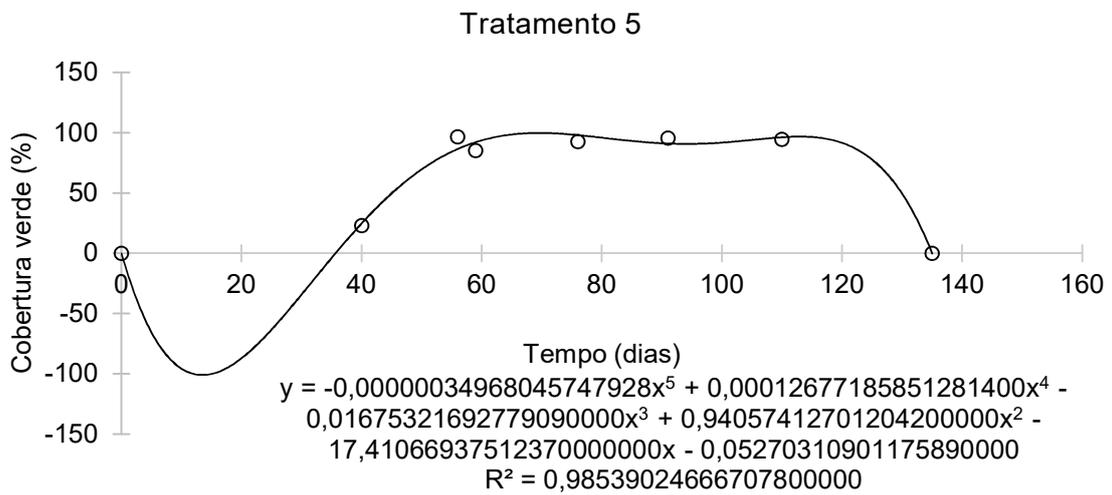
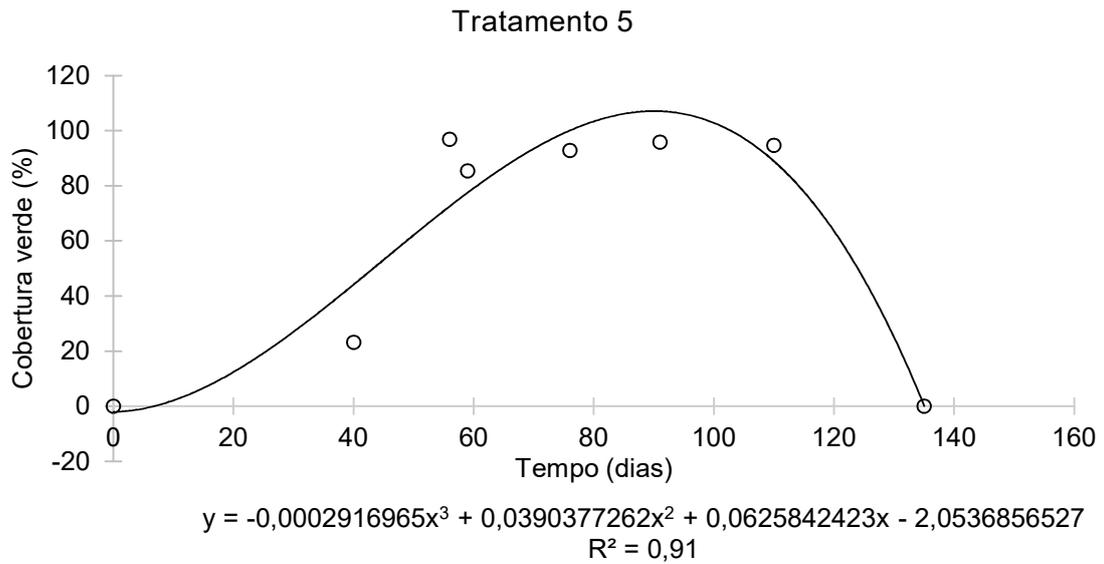
$$0,00067123069879926300$$

$$R^2 = 0,9998$$

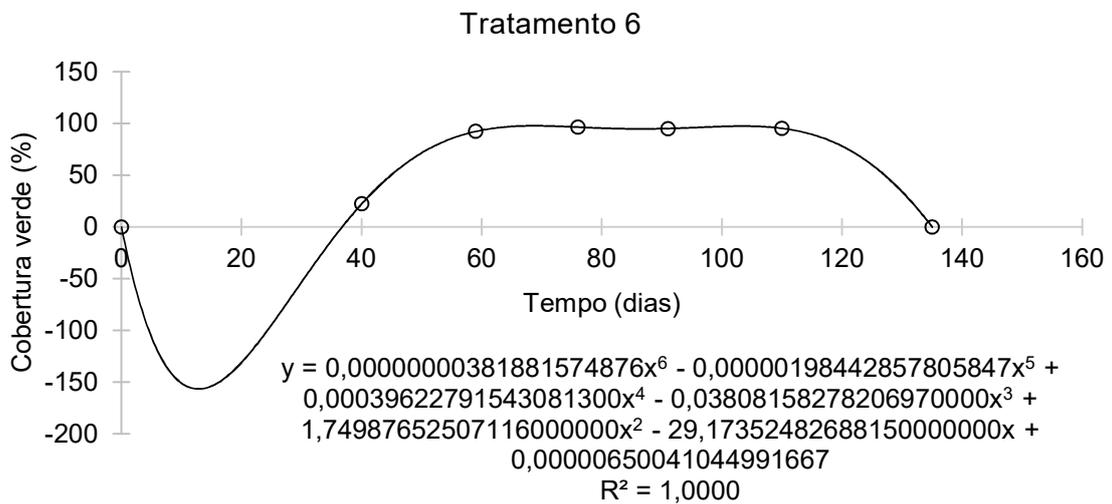
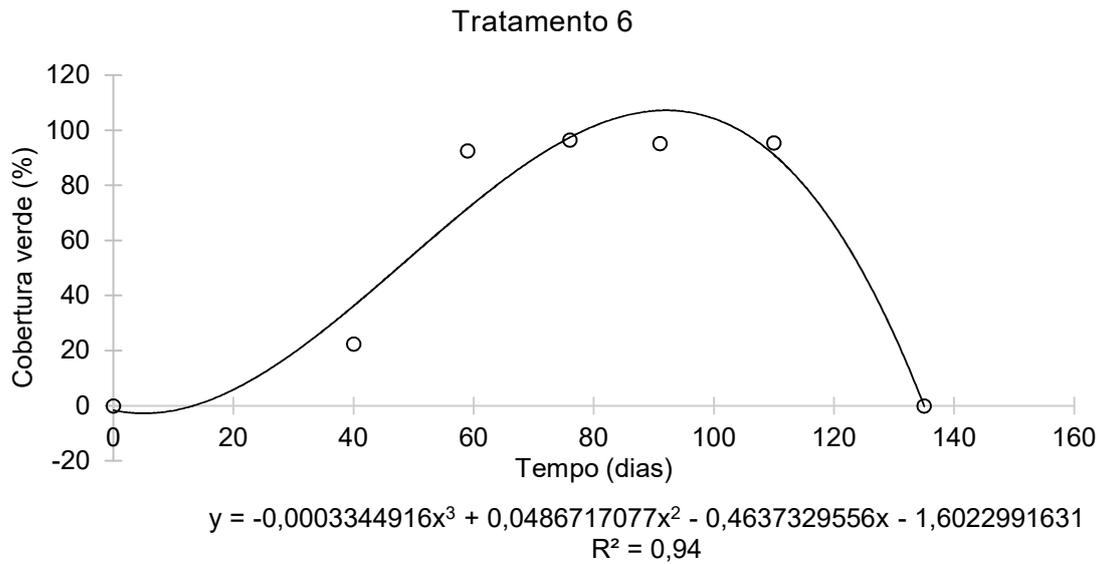
$$Cob_4(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



$$Cob_5(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^5 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

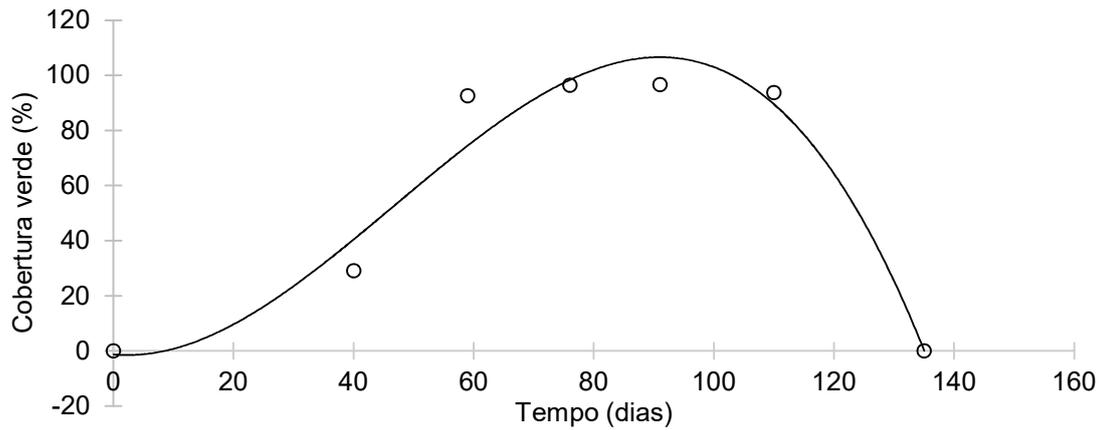


$$Cob_6(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



$$Cob_7(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

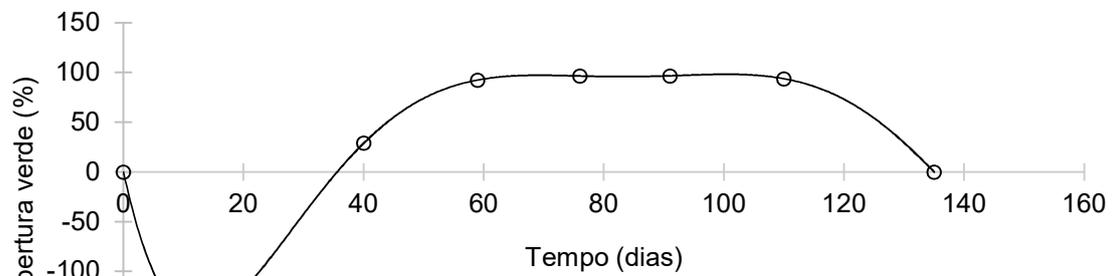
Tratamento 7



$$y = -0,0003103889x^3 + 0,0434291456x^2 - 0,1958752758x - 1,2724290516$$

$$R^2 = 0,96$$

Tratamento 7



$$y = 0,00000000423889878943x^6 - 0,00000212109782742054x^5 +$$

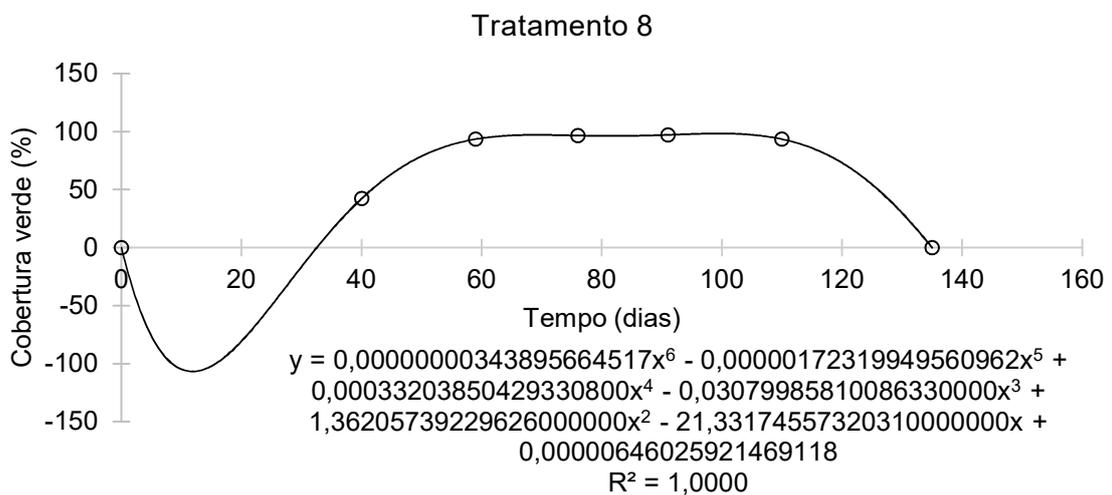
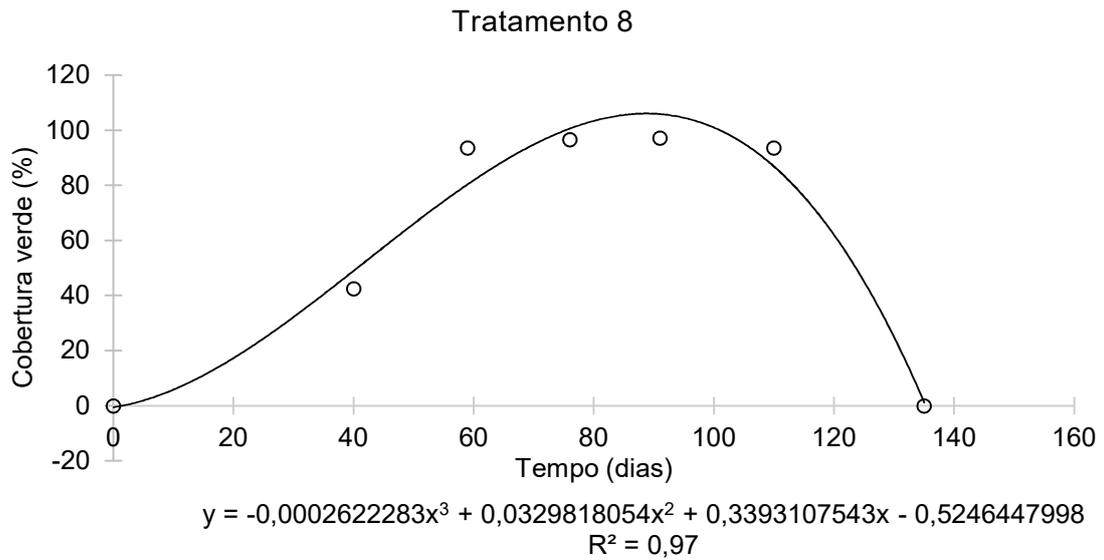
$$0,00040980977259508200x^4 - 0,03825884613434030000x^3 +$$

$$1,71287953751016000000x^2 - 27,80665604141540000000x +$$

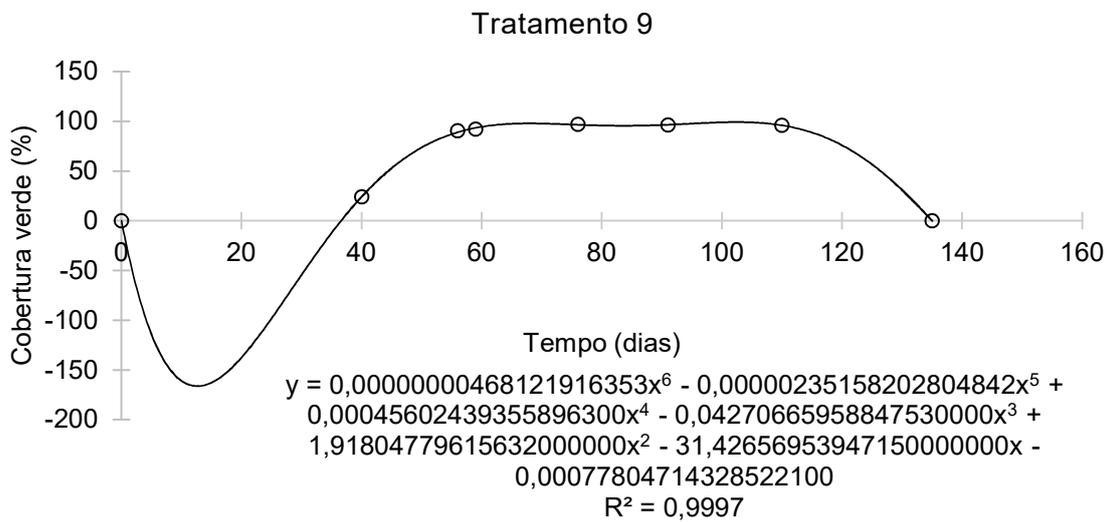
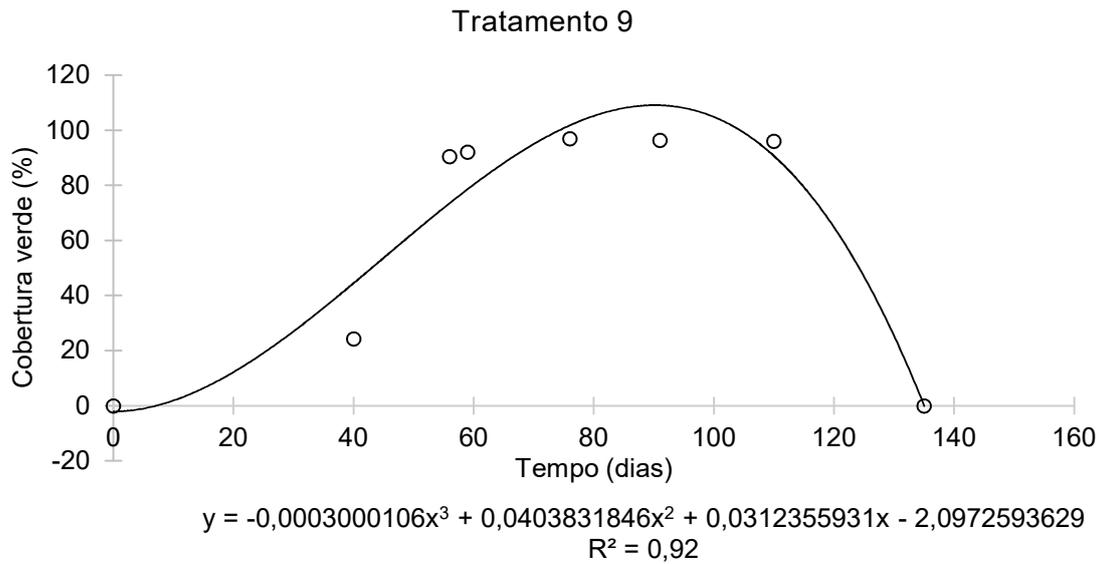
$$0,00000645744853500219$$

$$R^2 = 1,0000$$

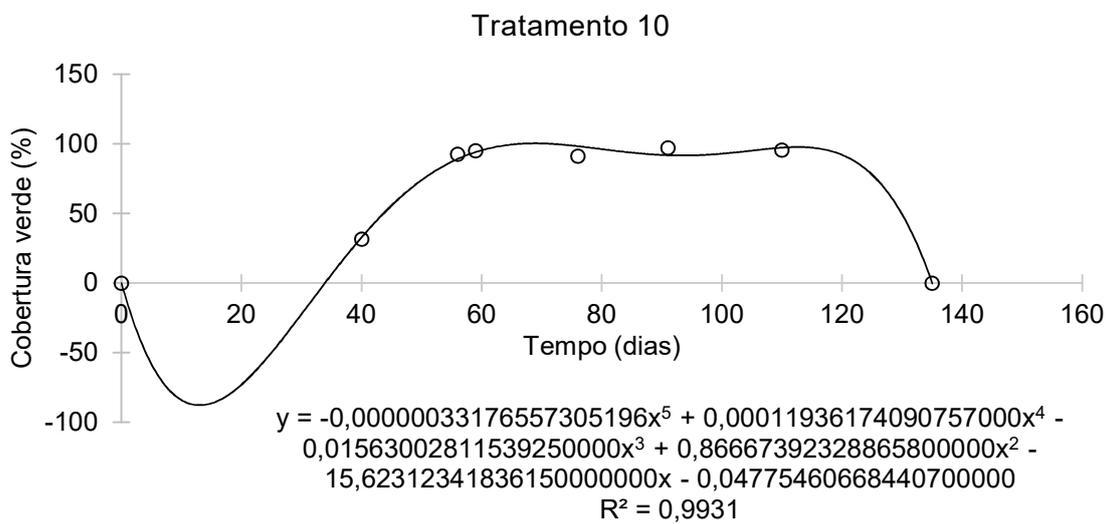
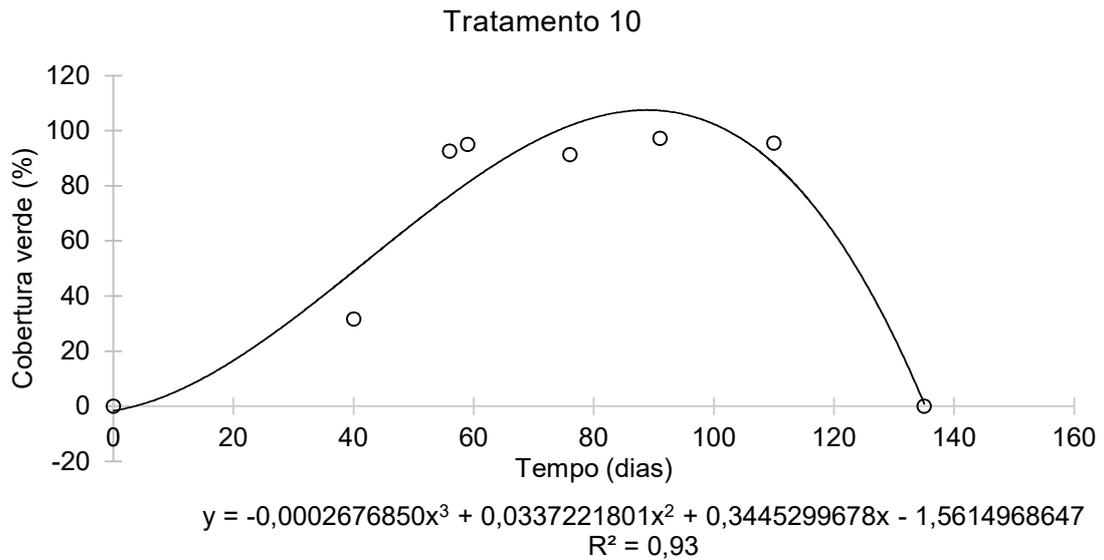
$$Cob_8(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



$$Cob_9(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

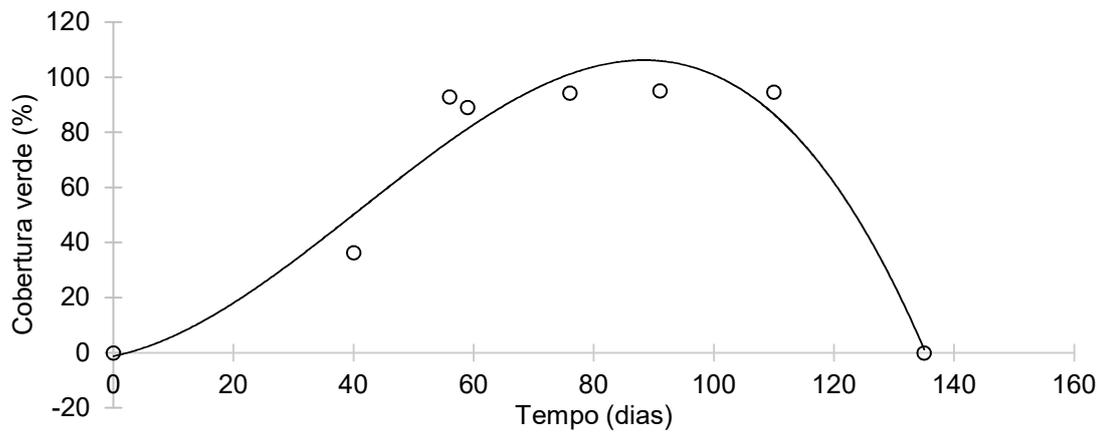


$$Cob_{10}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^5 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



$$Cob_{11}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

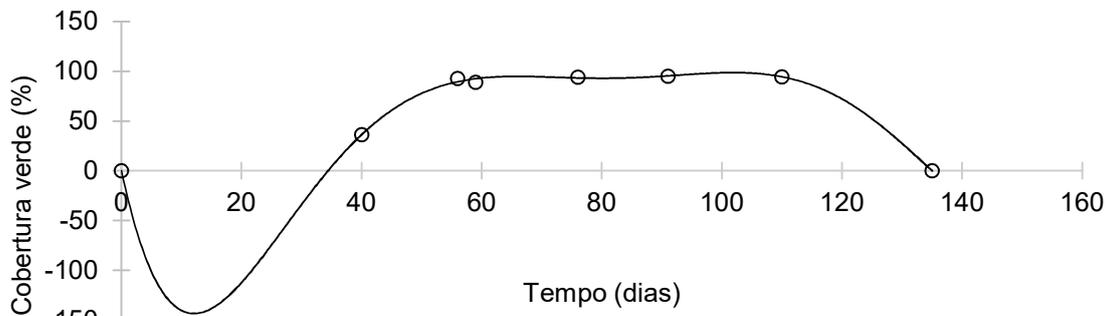
Tratamento 11



$$y = -0,0002550762x^3 + 0,0312951856x^2 + 0,4415765701x - 1,1664963129$$

$$R^2 = 0,94$$

Tratamento 11



$$y = 0,00000000497146323807x^6 - 0,00000242557168177171x^5 +$$

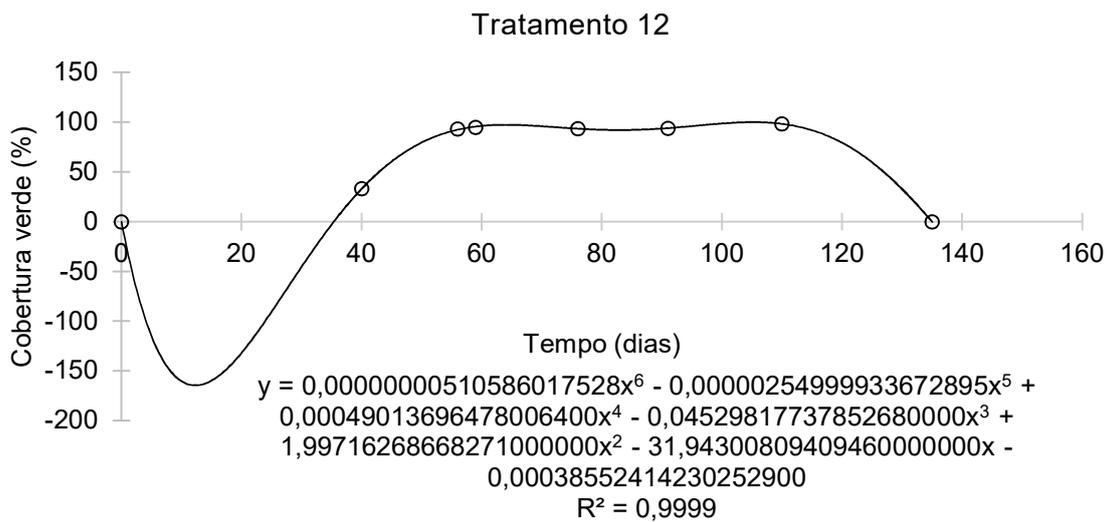
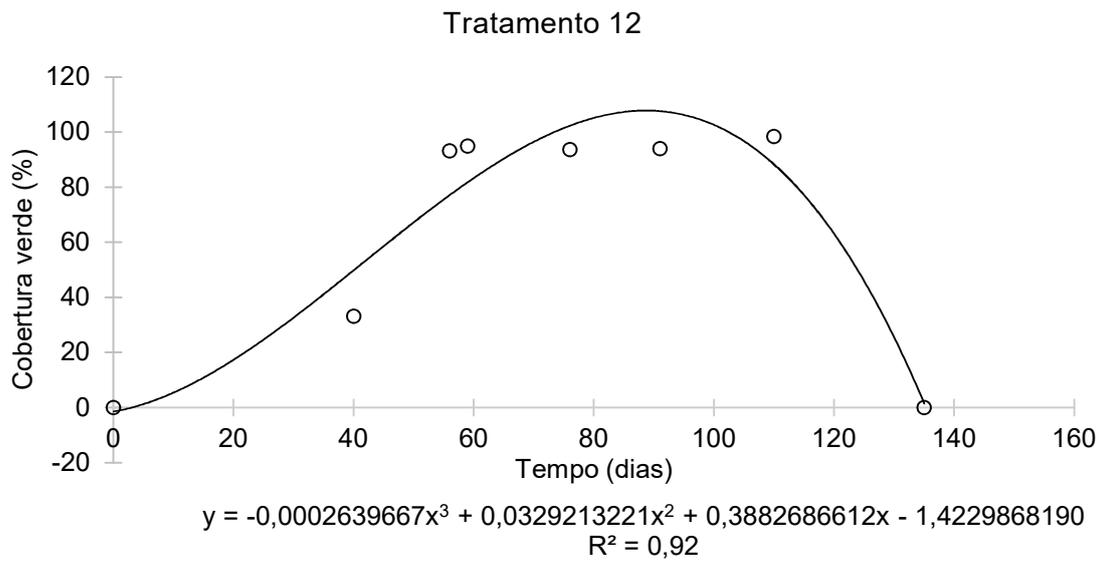
$$0,00045671534064695200x^4 - 0,04147753471465880000x^3 +$$

$$1,80233819496061000000x^2 - 28,34546383435370000000x -$$

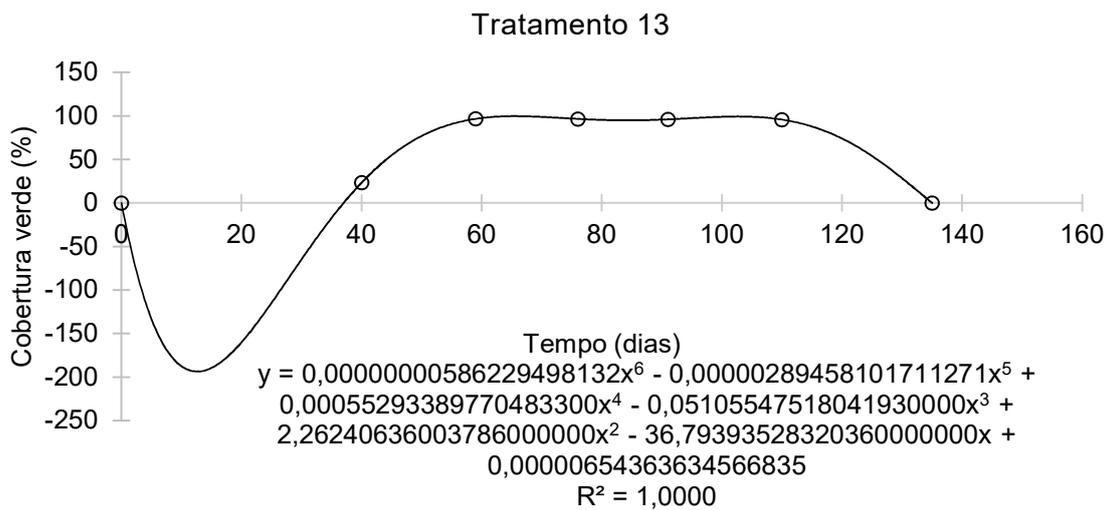
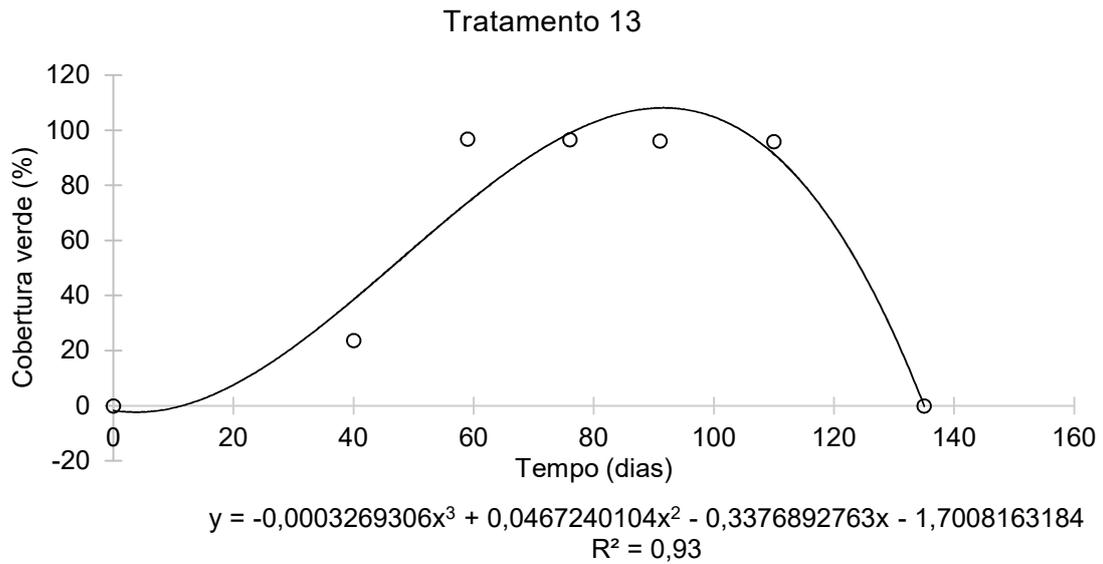
$$0,00190315760573867000$$

$$R^2 = 0,9981$$

$$Cob_{12}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

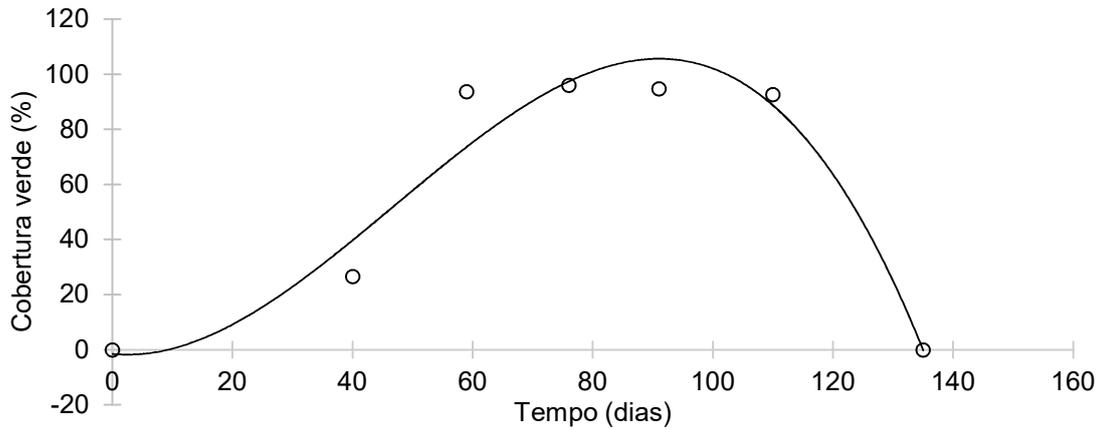


$$Cob_{13}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



$$Cob_{14}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

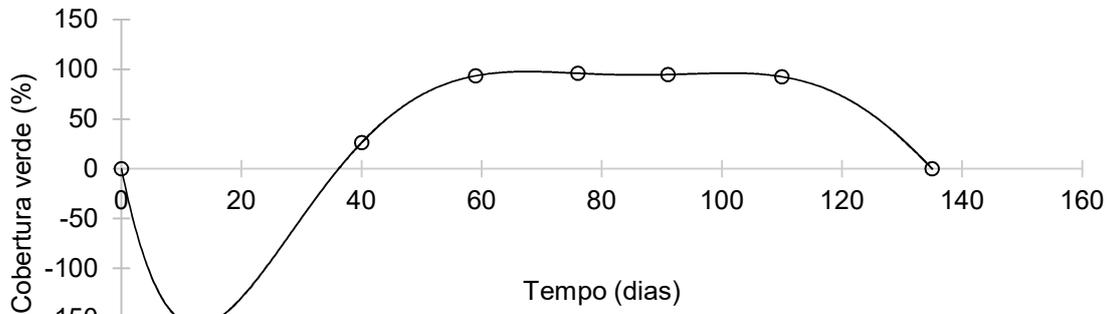
Tratamento 14



$$y = -0,0003091505x^3 + 0,0433341302x^2 - 0,2056996160x - 1,5211269423$$

$$R^2 = 0,94$$

Tratamento 14



$$y = 0,00000000439587771945x^6 - 0,00000221628876612145x^5 +$$

$$0,00043134992396431900x^4 - 0,04053711206574920000x^3 +$$

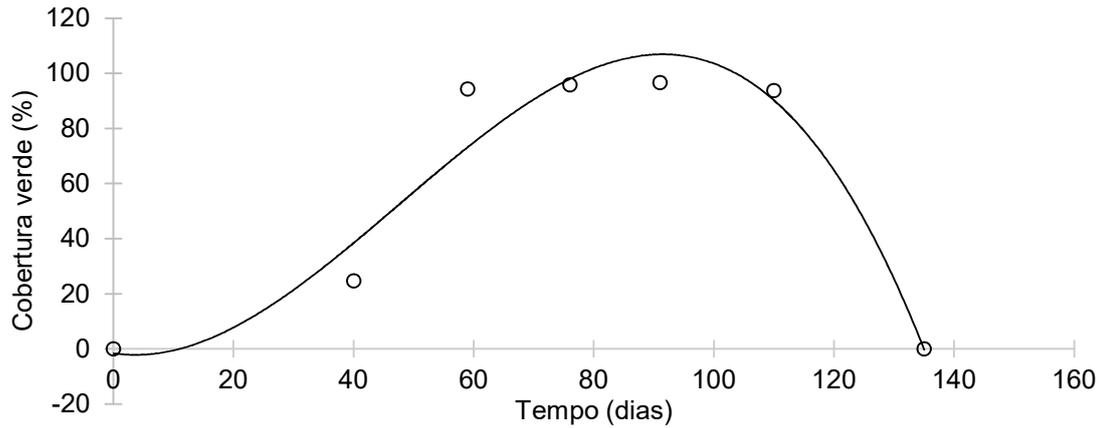
$$1,82520736569131000000x^2 - 29,86762420518790000000x +$$

$$0,00000637292373539822$$

$$R^2 = 1,0000$$

$$Cob_{15}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

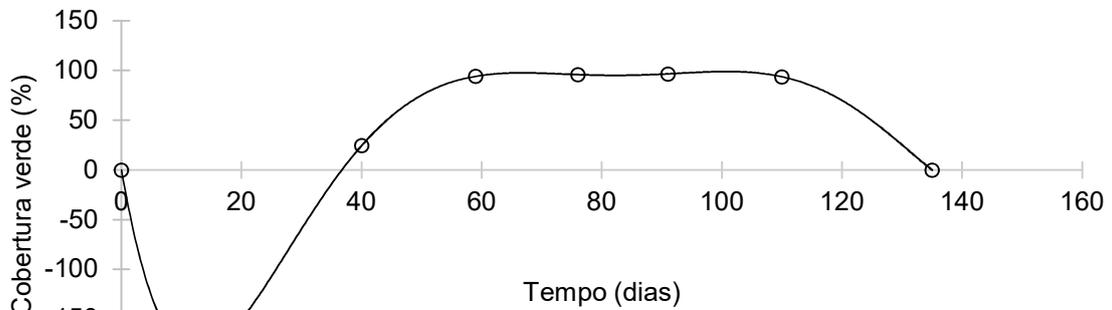
Tratamento 15



$$y = -0,0003221365x^3 + 0,0459187482x^2 - 0,3182918530x - 1,5953057298$$

$$R^2 = 0,94$$

Tratamento 15



$$y = 0,00000000587649239122x^6 - 0,00000286271563443297x^5 +$$

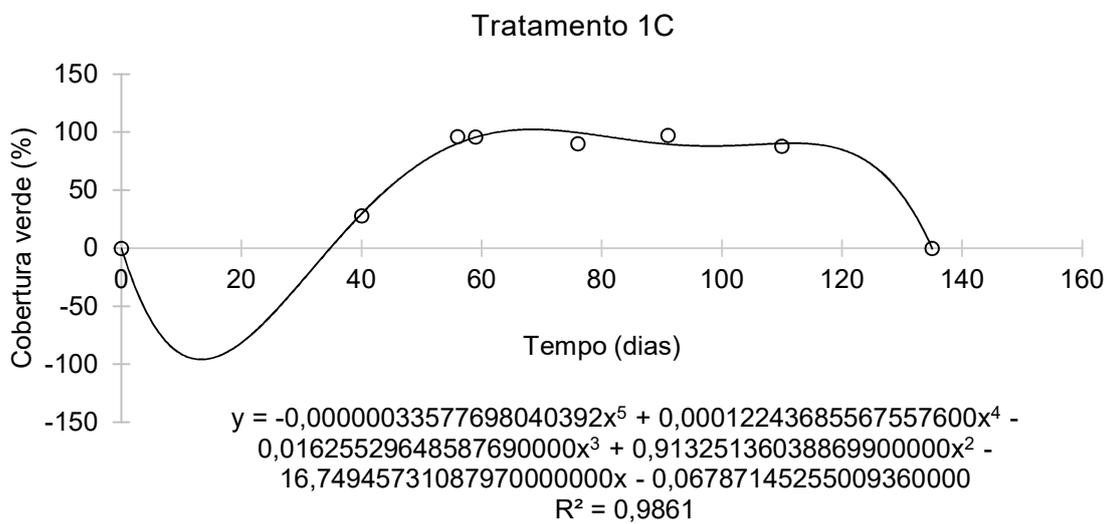
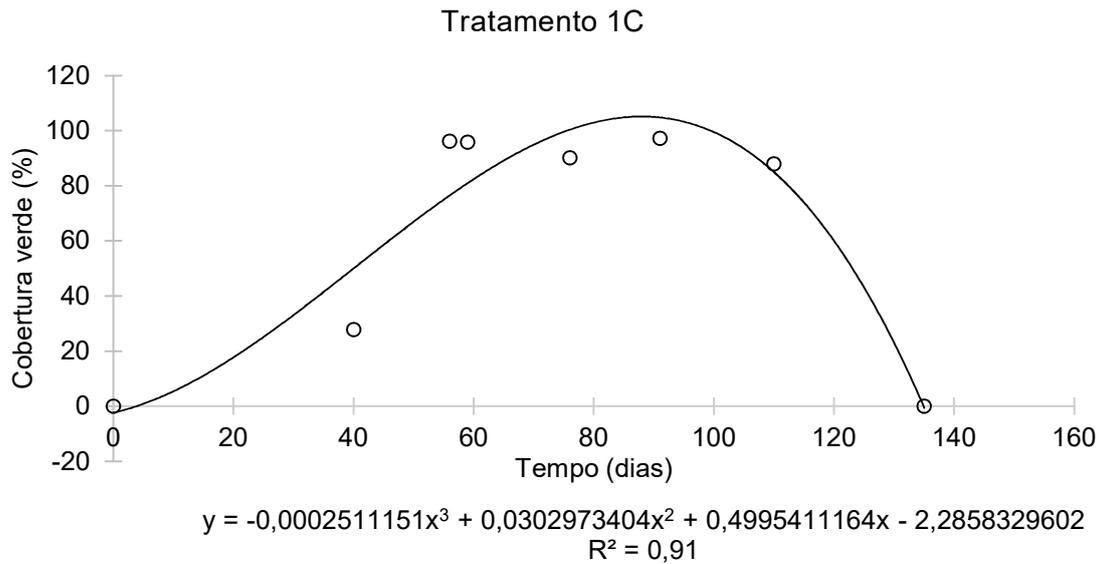
$$0,00054031234058982100x^4 - 0,04938358068898200000x^3 +$$

$$2,17069366367650000000x^2 - 35,04995815129950000000x +$$

$$0,00000645007787625218$$

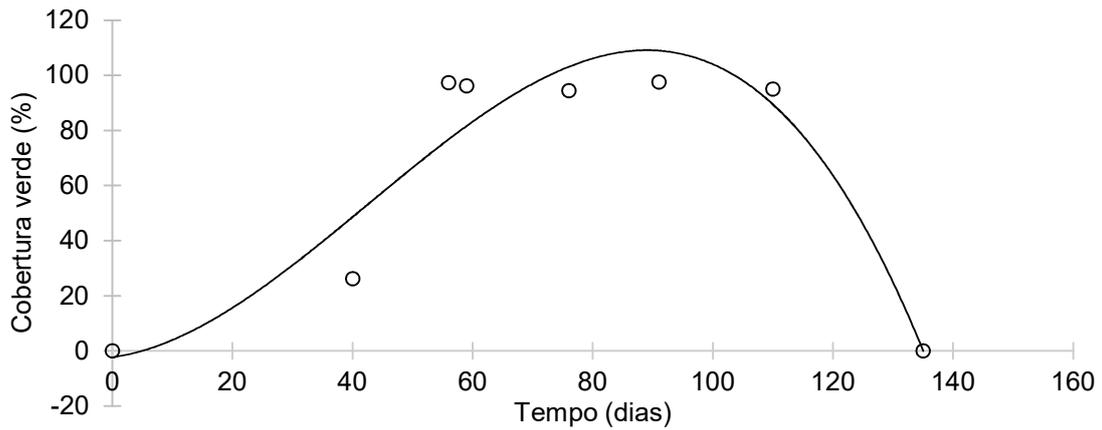
$$R^2 = 1,0000$$

$$Cob_{1c}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^5 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



$$Cob_{2c}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

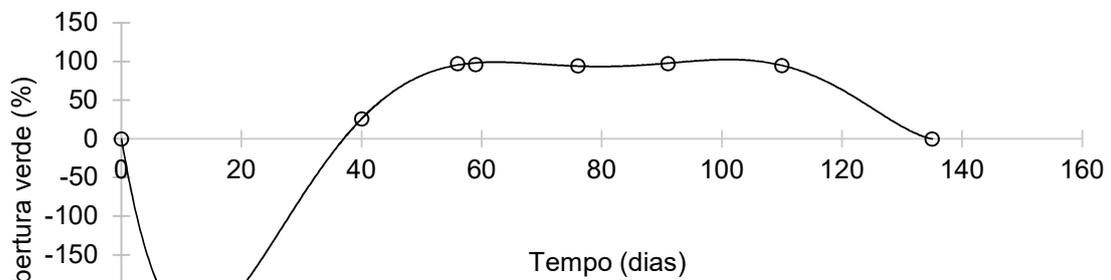
Tratamento 2C



$$y = -0,0002778918x^3 + 0,0354008946x^2 + 0,3023106801x - 2,2606901684$$

$$R^2 = 0,91$$

Tratamento 2C



$$y = 0,00000000916804541426x^6 - 0,00000431436359792092x^5 +$$

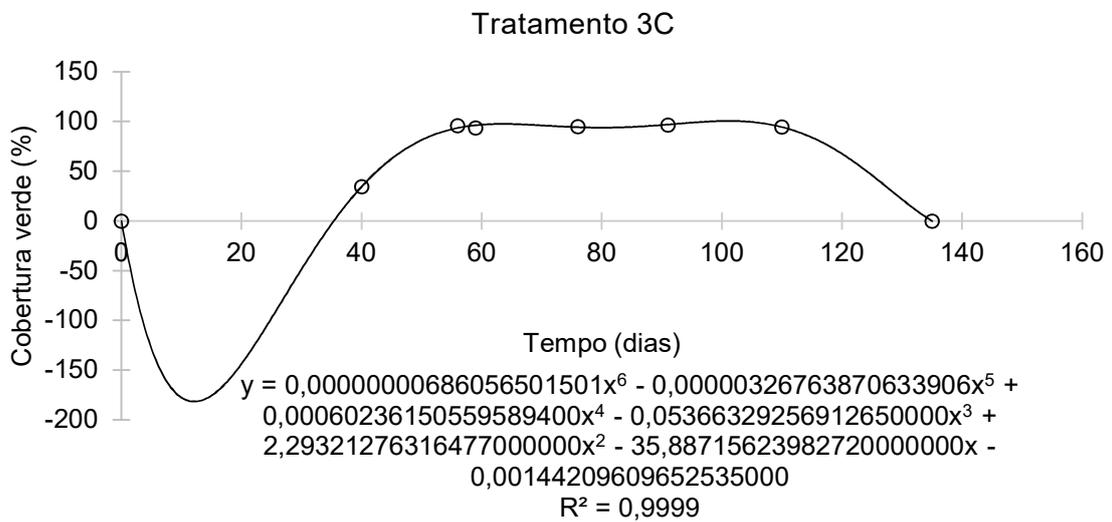
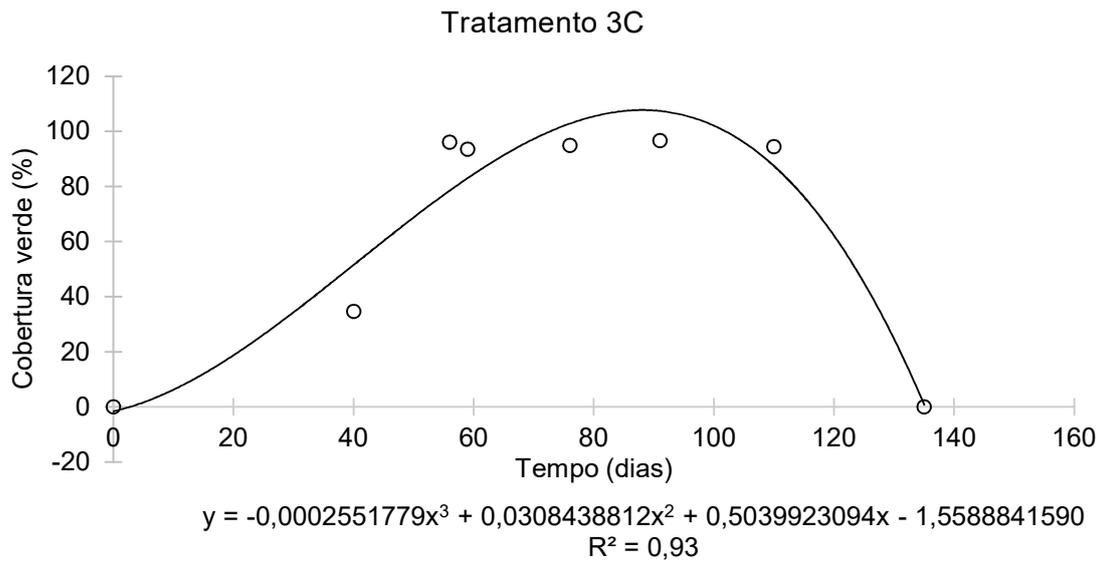
$$0,00078713114845463400x^4 - 0,06950427588549250000x^3 +$$

$$2,95163356039848000000x^2 - 46,47252836904950000000x -$$

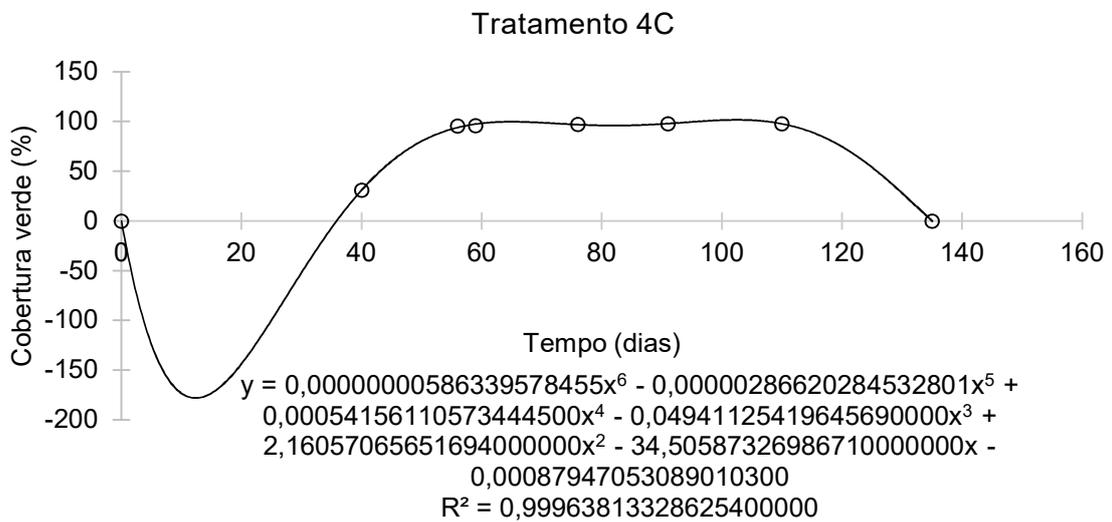
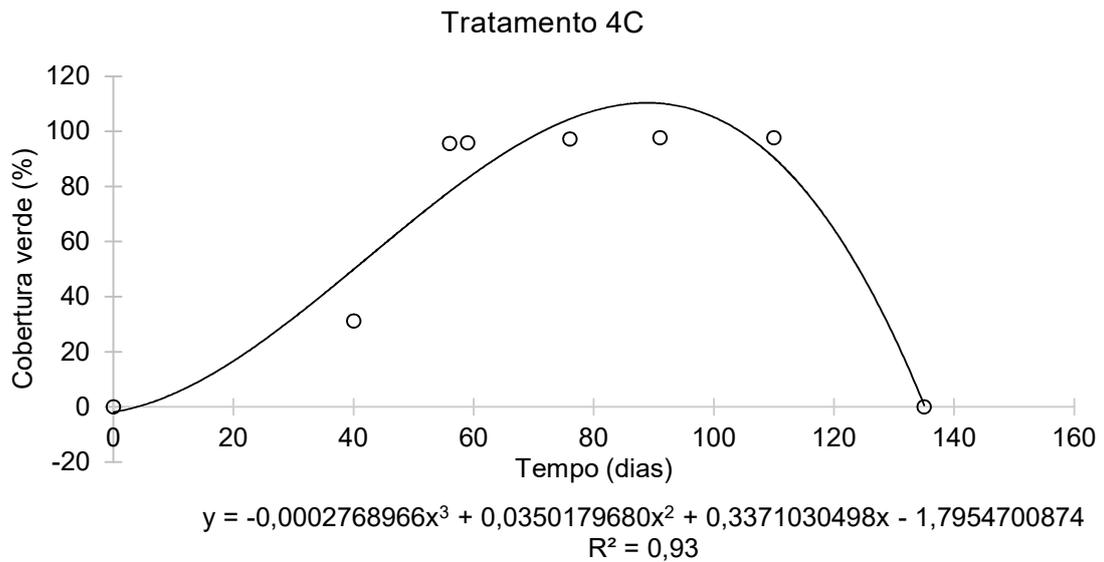
$$0,00109102770511527000$$

$$R^2 = 0,9994$$

$$Cob_{3c}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

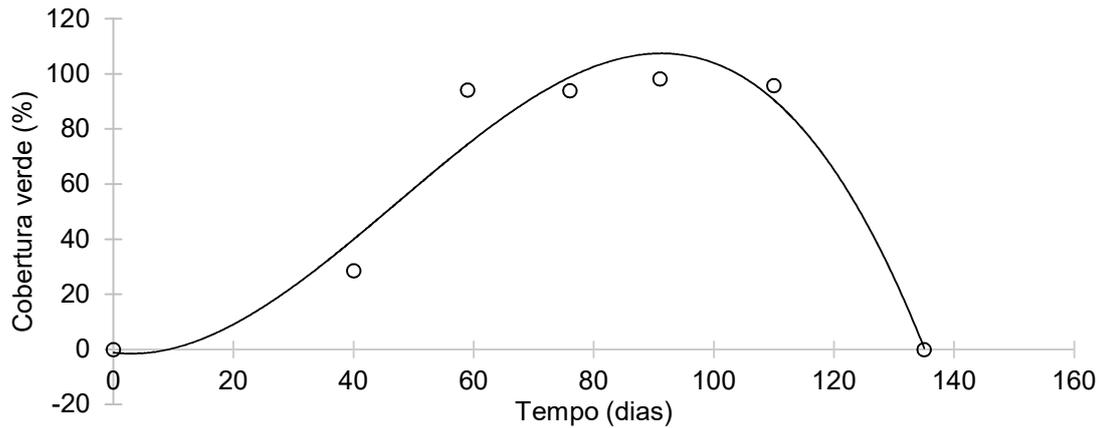


$$Cob_{4C}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



$$Cob_{6C}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^5 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

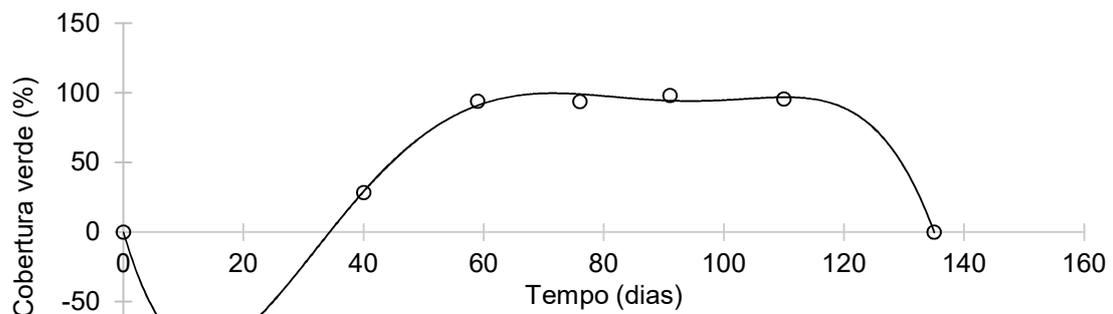
Tratamento 6C



$$y = -0,0003164523x^3 + 0,0446634034x^2 - 0,2501006610x - 1,1729027625$$

$$R^2 = 0,95$$

Tratamento 6C



$$y = -0,00000030066966452859x^5 + 0,00010871505826176600x^4 -$$

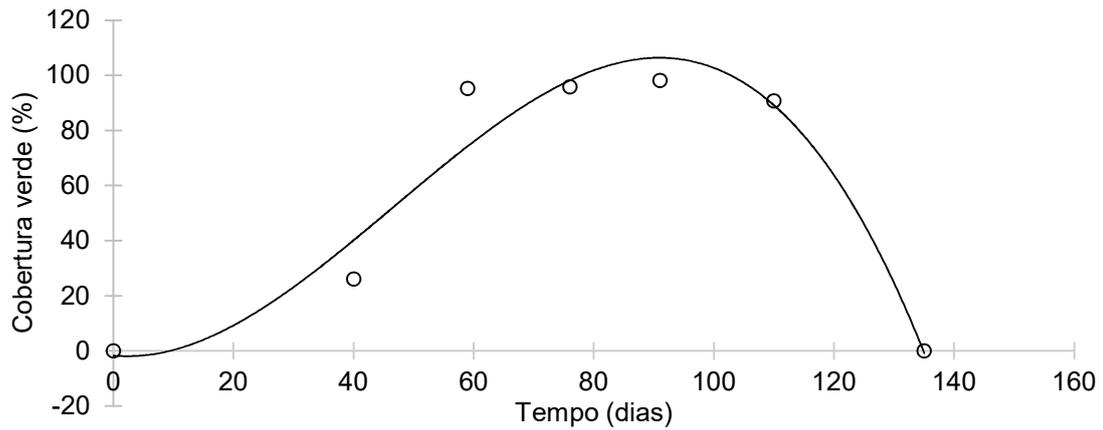
$$0,01436653759411040000x^3 + 0,80719331822354000000x^2 -$$

$$14,75376524627060000000x - 0,02958134546111070000$$

$$R^2 = 0,9961$$

$$Cob_{7c}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

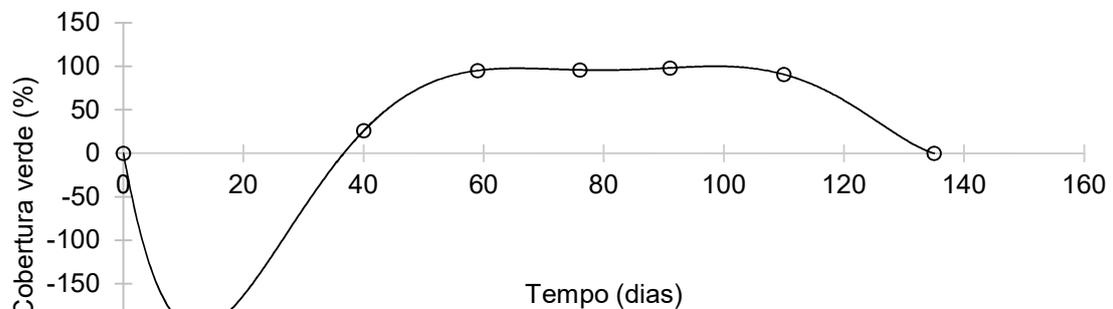
Tratamento 7C



$$y = -0,0003113674x^3 + 0,0435296257x^2 - 0,1947730794x - 1,6986003556$$

$$R^2 = 0,95$$

Tratamento 7C



$$y = 0,00000000743144739661x^6 - 0,00000351231149510467x^5 +$$

$$0,00064449902357210900x^4 - 0,05737672016857690000x^3 +$$

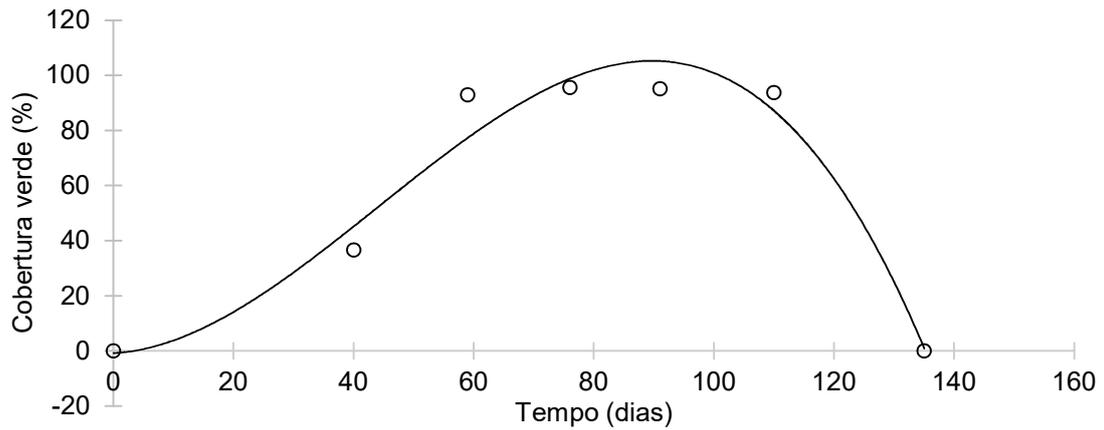
$$2,46244958030002000000x^2 - 39,06138134666250000000x +$$

$$0,00000634810658084461$$

$$R^2 = 1,0000$$

$$Cob_{8c}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

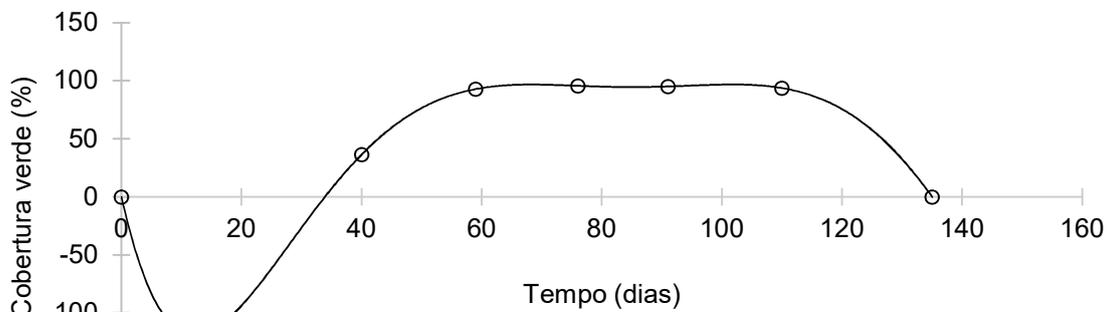
Tratamento 8C



$$y = -0,0002785694x^3 + 0,0367707354x^2 + 0,1258824809x - 0,8075758088$$

$$R^2 = 0,96$$

Tratamento 8C



$$y = 0,00000000332871201772x^6 - 0,00000171089882361475x^5 +$$

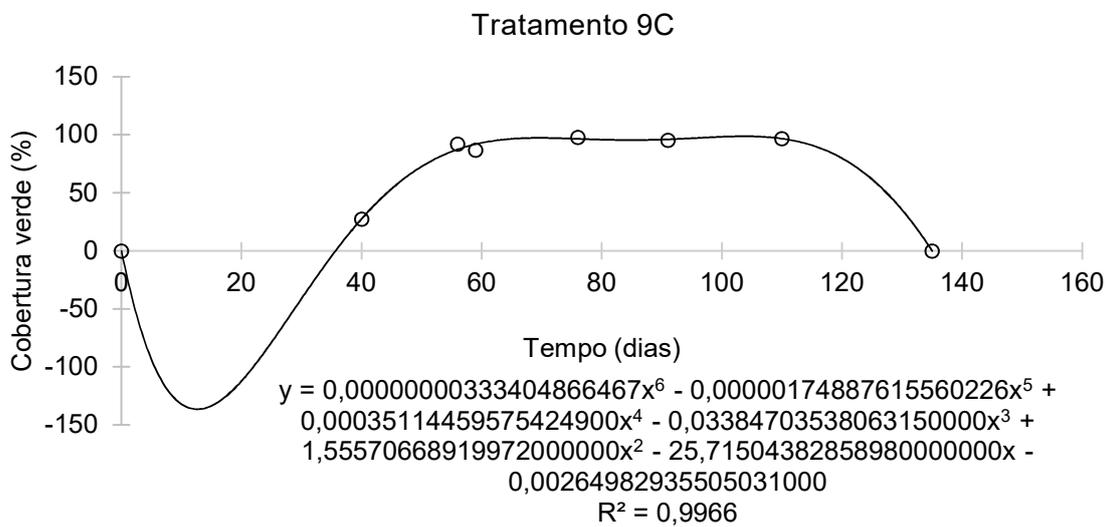
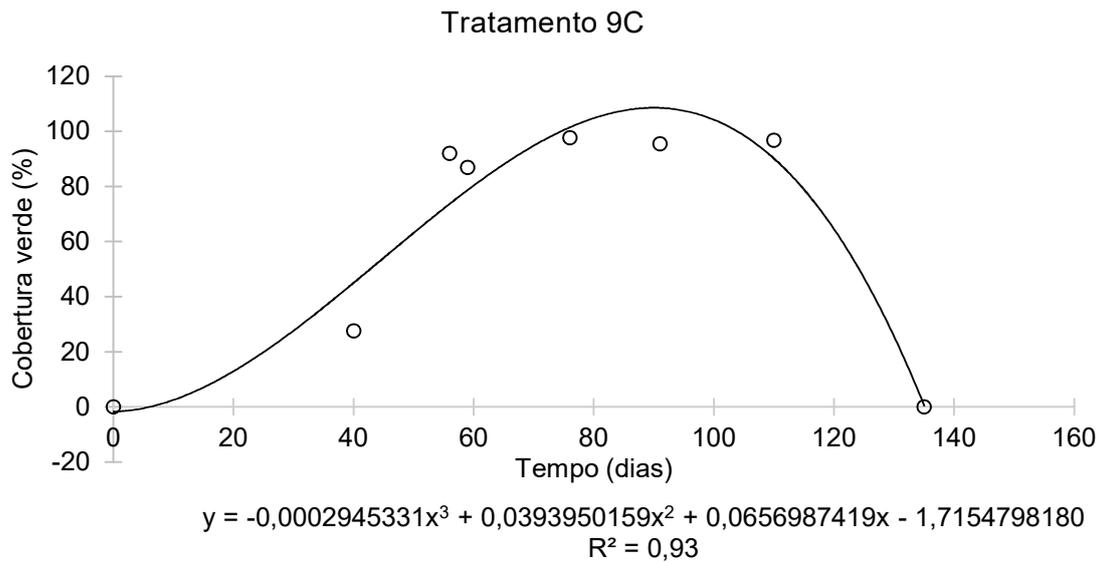
$$0,00033726287684388000x^4 - 0,03193912009533050000x^3 +$$

$$1,44042692592484000000x^2 - 23,14476823748560000000x +$$

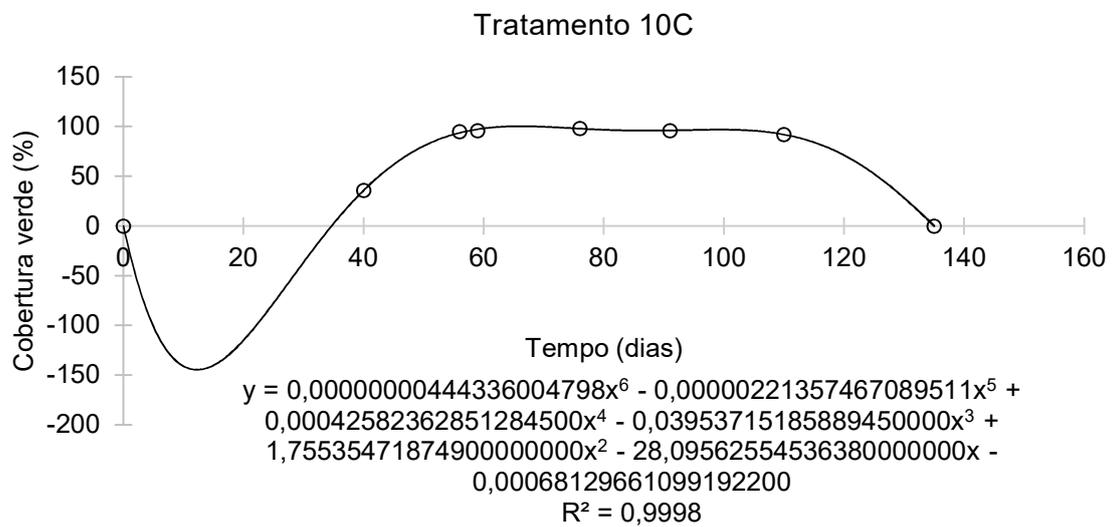
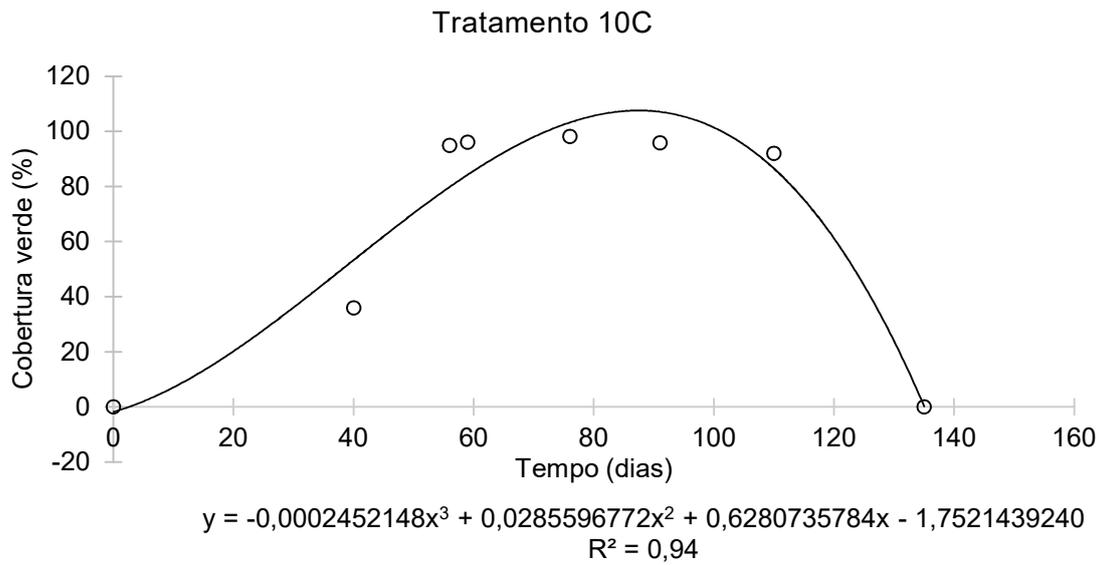
$$0,00000642392376448697$$

$$R^2 = 1,0000$$

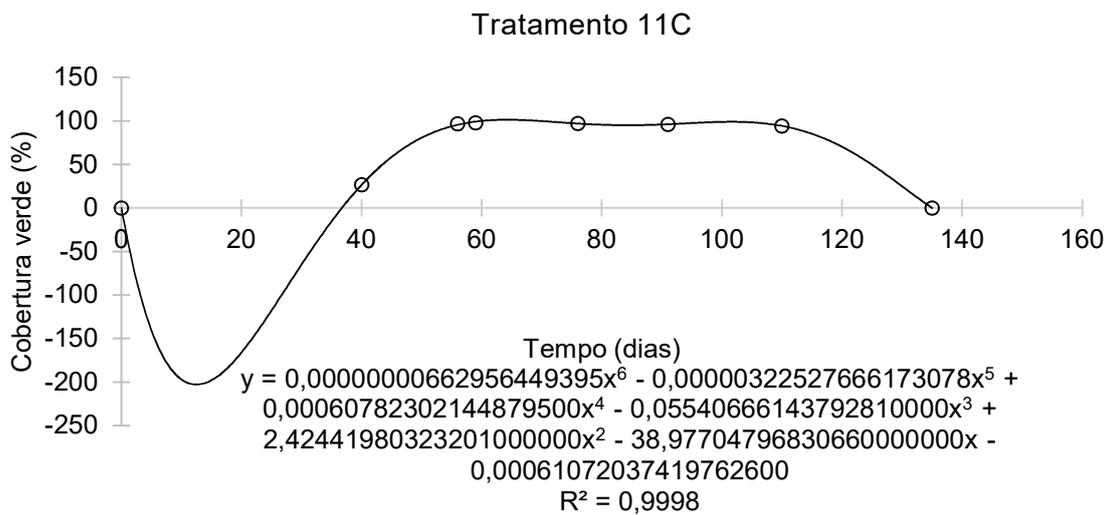
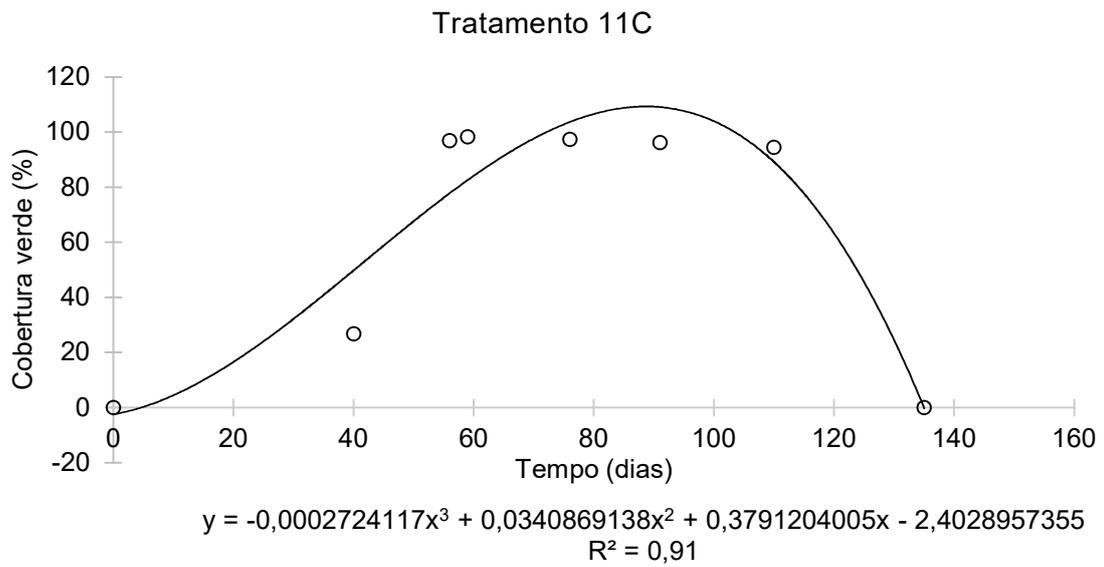
$$Cob_{6c}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



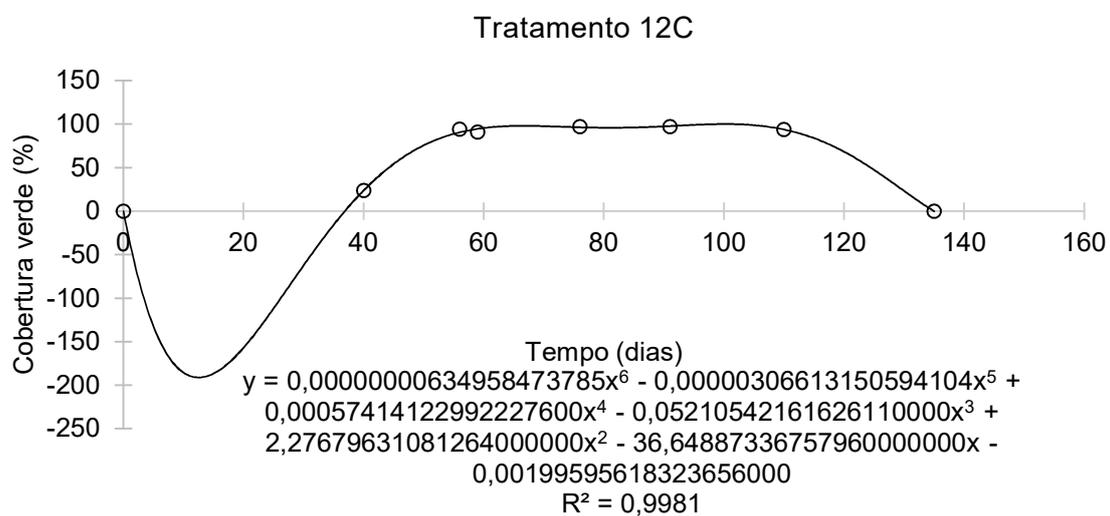
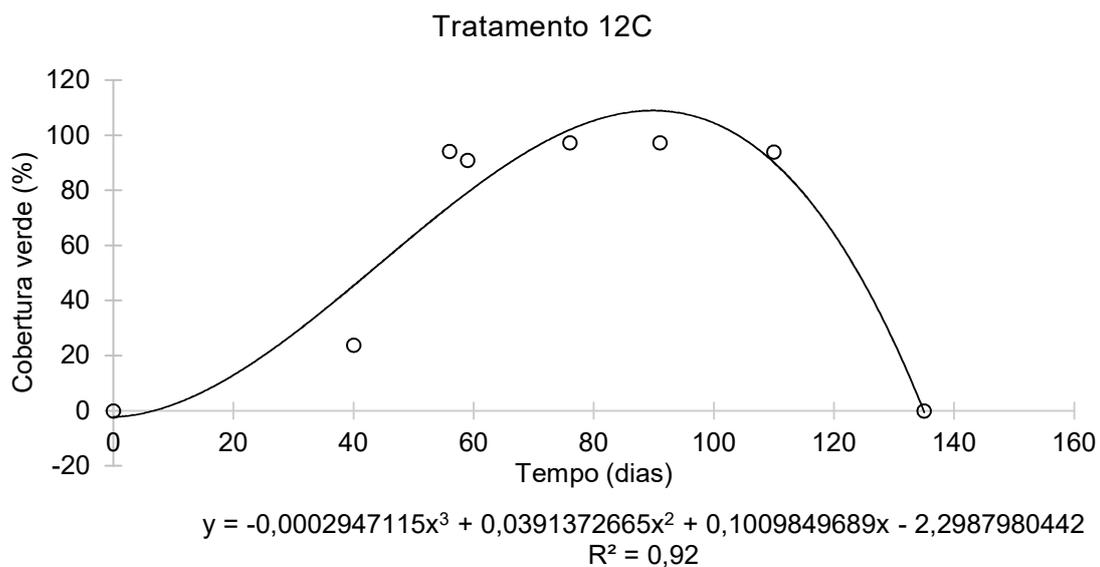
$$Cob_{10c}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



$$Cob_{11c}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

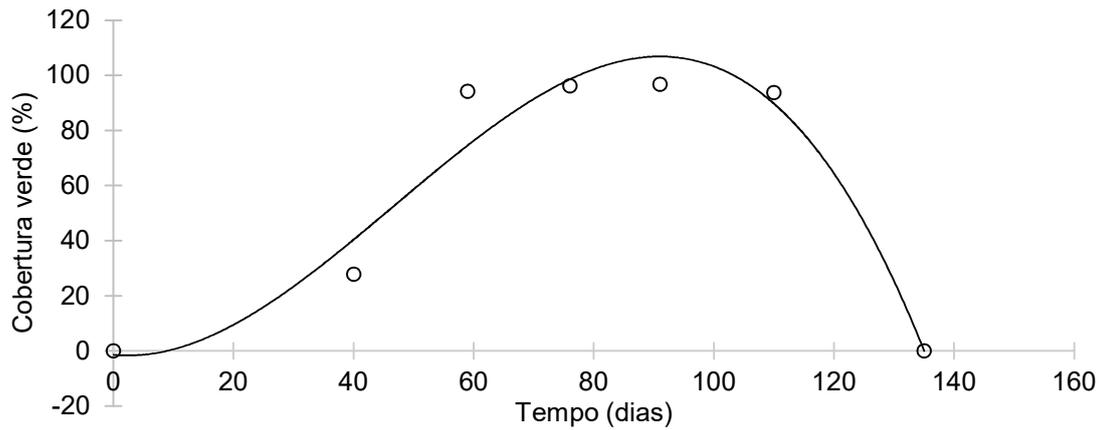


$$Cob_{12c}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



$$Cob_{13}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

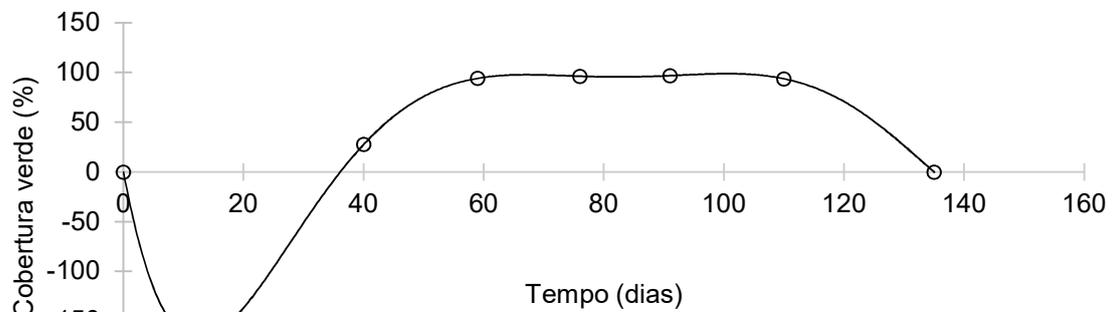
Tratamento 13C



$$y = -0,0003117911x^3 + 0,0436505307x^2 - 0,2001988053x - 1,4167569859$$

$$R^2 = 0,95$$

Tratamento 13C



$$y = 0,00000000532587424840x^6 - 0,00000260930281256733x^5 +$$

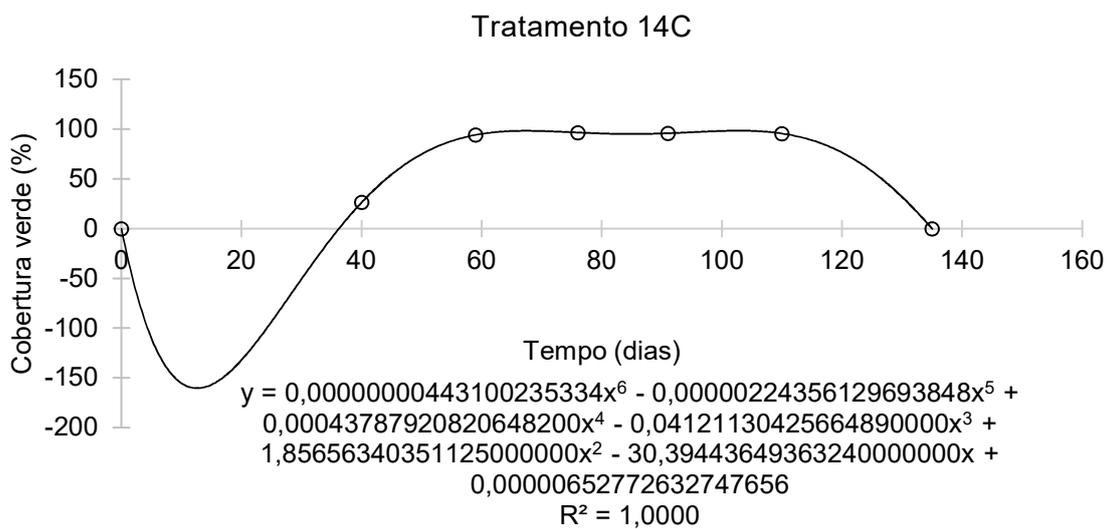
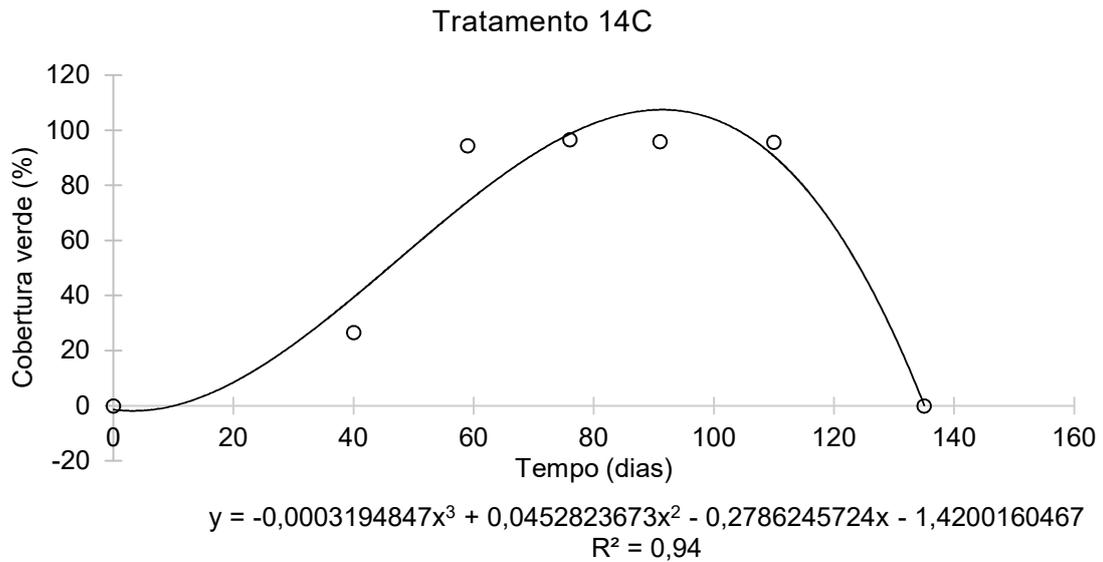
$$0,00049482990949201200x^4 - 0,04540909891238700000x^3 +$$

$$2,00173423440719000000x^2 - 32,25285476422860000000x +$$

$$0,00000645697980417026$$

$$R^2 = 1,0000$$

$$Cob_{14C}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$



$$Cob_{15}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 a_i t^i, & t < 40 \\ \sum_{i=0}^6 b_i t^i, & t \geq 40 \end{cases}$$

