

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**Alexandre Ferigolo Alves**

**EXCESSO HÍDRICO E SEU EFEITO NO CRESCIMENTO E NA  
PRODUTIVIDADE DA MANDIOCA**

Santa Maria, RS  
2020

**Alexandre Ferigolo Alves**

**EXCESSO HÍDRICO E SEU EFEITO NO CRESCIMENTO E NA PRODUTIVIDADE DA  
MANDIOCA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. PhD. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS  
2020

Ferigolo Alves, Alexandre  
EXCESSO HÍDRICO E SEU EFEITO NO CRESCIMENTO E NA  
PRODUTIVIDADE DA MANDIOCA / Alexandre Ferigolo Alves.-  
2020.  
49 p.; 30 cm

Orientador: Nereu Augusto Streck  
Coorientador: Alencar Junior Zanon  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2020

1. EXCESSO HÍDRICO E SEU EFEITO NO CRESCIMENTO E NA  
PRODUTIVIDADE DA MANDIOCA I. Streck, Nereu Augusto II.  
Zanon, Alencar Junior III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

---

©2020

Todos os direitos autorais reservados a Alexandre Ferigolo Alves. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: alexandreferigolo@gmail.com

**Alexandre Ferigolo Alves**

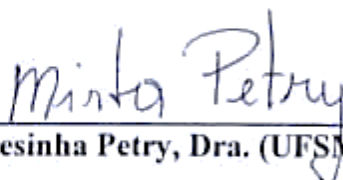
**EXCESSO HÍDRICO E SEU EFEITO NO CRESCIMENTO E NA PRODUTIVIDADE DA  
MANDIOCA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

**Aprovado em 23 de outubro de 2020:**



**Nereu Augusto Streck, PhD. (UFSM) – Videoconferência  
(Presidente/Orientador)**



**Mirta Teresinha Petry, Dra. (UFSM) – Videoconferência**



**Luana Fernandes Tironi, Dra. (EMATER RS/ASCAR) – Videoconferência**

## **DEDICATÓRIA**

*A minha família, por me motivar, me apoiar em minhas escolhas e sempre estar ao meu lado.*

*A minha namorada, por ser minha companheira e me acompanhar nos momentos bons e difíceis de nossas vidas e por sempre me dar suporte para o que for preciso.*

*As pessoas que me apoiaram verdadeiramente durante a jornada.*

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a Deus por iluminar os meus passos, me dar saúde, por me presentear com soluções ao meu problema de visão, colocar pessoas boas em meu caminho e por acompanhar minha jornada.

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de realizar esse estudo.

Ao professor Nereu Augusto Streck e Alencar Junior Zanon pela orientação e ensinamentos durante todo mestrado.

Aos integrantes do comitê de orientação

Aos meus colegas e amigos

Aos Colegas e amigos da Equipe Simanihot pela parceria, condução dos experimentos e análises dos dados e principalmente pelo espírito de equipe.

A EMATER/ASCAR pela parceria no acompanhamento de experimentos em lavouras de produtores.

As instituições, produtores e universidades pela parceria na realização dos experimentos.

A todas as pessoas que auxiliaram durante a jornada.

Aos integrantes da banca examinadora por aceitar o convite.

Ao CNPq e CAPES pelo auxílio financeiro através de bolsas.

Aos colegas da sala 2 pela parceria e convívio ao longo dos anos.

A todas as pessoas que não foram mencionadas, mas que me incentivaram a realizar este sonho.

**MUITO OBRIGADO.**

## RESUMO

### EXCESSO HÍDRICO E SEU EFEITO NO CRESCIMENTO E NA PRODUTIVIDADE DA MANDIOCA

AUTOR: Alexandre Ferigolo Alves  
ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

A mandioca é caracterizada como sensível ao excesso hídrico. Períodos de alagamento interferem diretamente na disponibilidade de oxigênio no solo, afetando os processos aeróbios das plantas. Os objetivos desse estudo foram: (i) caracterizar os efeitos do excesso hídrico no solo no crescimento e desenvolvimento da mandioca; (ii) identificar práticas de manejo que reduzam o impacto do excesso hídrico na produtividade de mandioca, (iii) estimar o potencial de produtividade (PP) para quantificar a lacuna de produtividade (LP). Os efeitos do excesso hídrico foram avaliados através de experimentos em vasos e a campo e para obter o PP foi utilizado o modelo Simanihot. A LP foi calculada através da diferença entre o PP e as produtividades do experimento a campo. O cultivo em vasos indicou maiores danos na mandioca após exposição de 96 e 120 horas de excesso hídrico. A cada 24 horas de excesso hídrico, cerca de 20% das plantas não emergiram e, depois de 96 horas de excesso, a emergência foi nula. A campo, o uso de camalhões garantiu cerca de 60% da emergência. No início do desenvolvimento das plantas, 96 e 120 horas de excesso hídrico resultou em senescência prematura das folhas. O uso de camalhão é uma prática de manejo que reduz o impacto do excesso hídrico. O PP foi de 11,95 t ha<sup>-1</sup> de folha, 61,5 t ha<sup>-1</sup> de haste e 60,4 t ha<sup>-1</sup> de raiz, sendo que plantios nos meses de agosto e setembro expressaram os máximos PP. Foram encontradas LP de até 27 t ha<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** estresse hídrico, oxigênio, manejo, modelo, camalhão.

## ABSTRACT

### WATER EXCESS AND ITS EFFECT ON CASSAVA GROWTH AND PRODUCTIVITY

AUTHOR: Alexandre Ferigolo Alves

ADVISOR: Nereu Augusto Streck

Cassava is characterized as sensitive to excess of water. Flooding periods directly interfere with the availability of oxygen in the soil, affecting the aerobic processes of the plants. The objectives of this study were: (i) to characterize the effects of excess water on the soil on cassava growth and development; (ii) to identify management practices that reduce the impact of excess water on cassava productivity, and (iii) to estimate the yield potential (PP) and quantify the yield gap (LP). The effects of excess water were evaluated through experiments in vases and in the field and to obtain the PP, the Simanihot model used was. The LP calculated was through the difference between the PP and the yield of the field experiment. Cultivation in vases indicated greater damage to cassava after exposure of 96 and 120 hours of excess water. After 24 hours of excess water about 20% of the plants did not emerge and after 96 hours of excess the emergence of plants was null. In the field, the use of raised beds guaranteed about 60% of the emergency. At the beginning of plant development, 96 and 120 hours of excess water resulted in premature senescence of the leaves. The use of raised beds is a management practice that reduces the impact of excess water. The PP was 11.95 Mg ha<sup>-1</sup> for leaves, 61.5 Mg ha<sup>-1</sup> for stems and 60.4 Mg ha<sup>-1</sup> for roots, and plantings in the months of August and September expressed the maximum PP of up to 27 Mg ha<sup>-1</sup>.

**Keywords:** excess water, oxygen, management, model, raised beds.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Local dos experimentos no Rio Grande do Sul – Santa Maria. ....	21
Figura 2. Camalhões utilizados no experimento a campo. ....	23
Figura 3. Emergência (a), velocidade de emergência (b) porcentagem de emergência (c) e densidade final de plantas (d) submetidas a horas de excesso hídrico na fase plantio à pré-emergência (experimento 1, em vasos). A densidade inicial foi de 5 manivas plantadas em cada tratamento. ....	27
Figura 4. Maniva com tecido vegetal normal (coloração verde), sem sinais de morte celular (a), e maniva com tecido vegetal morto (coloração amarronzada), devido a morte das células (b). ....	28
Figura 5. Evolução do número de folhas e altura de plantas de mandioca submetidas a zero horas de excesso hídrico (a), 24 horas de excesso hídrico (b), 48 horas de excesso hídrico (c), 72 horas de excesso hídrico (d) na fase de plantio à pré-emergência (experimento 1, em vasos). O excesso hídrico foi imposto 8 dias após o plantio e as avaliações iniciaram semanalmente após a emergência e estabilidade das plantas, transcorridos 26 dias após imposição do excesso. ....	29
Figura 6. Regressão do número de folhas e da altura de planta (a), área foliar (b) e da massa seca de folha, haste e raiz (d) aos 69 dias após plantio, submetidas a horas de excesso hídrico. Evolução da área foliar (c) das plantas de mandioca em cada tratamento submetidas a horas de excesso hídrico, na fase plantio à pré-emergência (experimento 1 em vasos). *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. ns = não significativo. ....	30
Figura 7. Evolução do número de folhas e da altura de plantas de mandioca durante o período experimental submetidas a zero horas de excesso hídrico (a), 24 horas de excesso hídrico (b), 48 horas de excesso hídrico (c), 72 horas de excesso hídrico (d), 96 horas de excesso hídrico (e) e 120 horas de excesso hídrico (f) na fase do início de desenvolvimento (experimento 2, em vasos). O excesso hídrico foi imposto 38 dias após plantio quando as plantas apresentaram 9 folhas. ....	31
Figura 8. Regressão do número de folhas e da altura de planta (a), área foliar (b) e da massa seca de folha, haste e raiz (d) aos 69 dias após plantio submetidas a horas de excesso hídrico, e evolução da área foliar (c) das plantas de mandioca submetidas a horas de excesso hídrico, na fase do início de desenvolvimento (experimento 2 em vasos). O excesso hídrico foi imposto 38 dias após plantio quando as plantas apresentaram 9 folhas. **Significativo a 1% de probabilidade e *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. ....	32

Figura 9. Paineis a-f: Plantas de mandioca submetidas a 0 horas e a 96 horas de excesso hídrico após 4 dias da imposição do excesso. Paineis b-d: Plantas de mandioca submetidas a 0 horas e a 96 horas de excesso hídrico 24 horas após drenagem do excesso. Paineis e-f: Plantas de mandioca submetidas a 0 horas e a 96 horas de excesso hídrico 13 dias após imposição do excesso. Paineis g-h: Planta de mandioca submetida a 96 horas de excesso hídrico 30 dias após imposição do excesso. O excesso hídrico foi imposto 38 dias após plantio quando as plantas apresentaram 9 folhas (experimento 2, em vasos). ..... 33

Figura 10. Regressão (a, c, e, g) e comparação de médias (b, d, f, h) da emergência (a, b), velocidade de emergência (c, d), porcentagem de emergência (e, f) e da densidade final (g, h) de plantas de mandioca no manejo com e sem camalhão submetidas a horas de excesso hídrico. Valores médios (b, d, f, h) seguidos pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste t de Student a ( $p < 0,05$ ). ..... 36

Figura 11. Evolução do número de folhas (a, b, c, d) de plantas de mandioca submetidas a zero horas de excesso hídrico (a), 48 horas de excesso hídrico (b), 96 horas de excesso hídrico (c) e 144 horas de excesso hídrico (d). Regressão do número de folhas (e), índice de área foliar (f), massa seca de folha, haste e raiz (g, h) aos 250 dias após plantio, no manejo com camalhão submetidas a horas de excesso hídrico. O manejo sem camalhões não apresentou plantas suficientes para avaliações destas variáveis. .... 37

Figura 12. Precipitação e temperatura média (a), balanço hídrico diário (b) durante a fase de plantio à pré-emergência do experimento a campo. O excesso hídrico foi imposto aos 8 dias após plantio. A barra trastejada vermelha indica o período que o tratamento não poderia sofrer excesso hídrico e a barra sólida preta indica o período que o excesso hídrico foi submetido nos tratamentos. T1, T2, T3 e T4 são os tratamentos em camalhão submetidos a 0, 46, 96 e 144 horas de excesso hídrico respectivamente. T5, T6, T7 e T8 são os tratamentos sem camalhão submetidos a 0, 46, 96 e 144 horas de excesso hídrico respectivamente (a, b). ..... 38

Figura 13. Gráfico de regressão com desvio padrão do potencial de produtividade da parte aérea e raiz em relação a época de plantio. Valores médios simulados através do modelo Simanihot nos últimos 15 anos. \*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ns=não significativo. <sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ). ..... 39

Figura 14. Potencial produtivo simulado para o mês de plantio em setembro na safra 2018/2019, produtividade e lacuna de produtividade dos tratamentos submetidos a horas de excesso hídrico no manejo sobre camalhões. .... 42

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Quadrado médio da análise de variância para as variáveis: emergência (EM), velocidade de emergência (VE), porcentagem de estabelecimento (PE) e densidade final (DF) das plantas de mandioca em função das fontes de variação. ....	35
---	----

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	13
1.1. OBJETIVOS.....	14
1.1.1. <b>Objetivo geral</b> .....	14
1.1.2. <b>Objetivo específico</b> .....	14
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
2.1. A CULTURA DA MANDIOCA.....	15
2.2. FENÔMENO ENOS .....	16
2.3. MODELAGEM MATEMÁTICA NA AGRICULTURA.....	17
2.4. ÁGUA NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA.....	18
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	20
3.1. EXPERIMENTO EM VASOS .....	21
3.2. EXPERIMENTO EM CAMPO.....	22
3.3. AVALIAÇÕES REALIZADAS NOS EXPERIMENTOS .....	24
3.4. ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO.....	25
3.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	26
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	26
4.1. RESPOSTA FISIOLÓGICA E MORFOLÓGICA DAS PLANTAS DE MANDIOCA SOB EXCESSO HÍDRICO EM AMBIENTE CONTROLÁVEL .....	26
4.2. RESPOSTA FISIOLÓGICA E MORFOLÓGICA DAS PLANTAS DE MANDIOCA SOB EXCESSO HÍDRICO EM NÍVEL DE LAVOURA .....	35
4.3. ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO.....	38
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	43
REFERÊNCIAS .....	44
ANEXO .....	50

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O aumento populacional e as mudanças na economia mundial forçam a adaptação dos sistemas de produção e constantes incrementos em produtividade para garantir a segurança e soberania alimentar (GRASSINI et al., 2014). A cultura da mandioca se destaca neste cenário por ser uma cultura de baixo custo de produção, que reduz a fome e a pobreza rural, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico, tendo sido eleita pela Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação como alimento do século XXI. (FAO, 2020, TIRONI et al, 2019, TAGLIAPIETRA et al, 2019). As produtividades de raízes tuberosas no Brasil e Rio Grande do Sul são muito baixas 15 e 17 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente (IBGE, 2020), em comparação com produtividades encontradas na Colômbia e Índia (75 e 90 t ha<sup>-1</sup>), África Oriental (50 e 60 t ha<sup>-1</sup>) e em experimentos conduzidos em instituições de pesquisa no Brasil (20 t ha<sup>-1</sup> e 33 t ha<sup>-1</sup>) (COCK et al., 1979; OBIERO 2004; NTAWURUHUGA 2006; TIRONI et al., 2015).

A cultura da mandioca apresenta elevado potencial produtivo de raízes tuberosas, podendo-se explorar essa capacidade produtiva, desde que se conheça os fatores que interferem na produção. Conhecer o potencial e os fatores que causam a lacuna de produtividade de uma cultura, em determinado país ou região, é de extrema importância para a tomada de decisão em nível mundial (VAN ITTERSUM et al. 2013; GRASSINI et al., 2015; ZANON et al., 2016; DENG et al., 2019). O método mais robusto para estimar o potencial de produtividade das culturas é através de modelos agrícolas (VAN ITTERSUM et al. 2013), que descrevem, de forma simples, os processos ecofisiológicos das plantas por meio de equações matemáticas (STRECK et al., 2003). Nesse sentido, o modelo Simanihot foi desenvolvido para a cultura da mandioca (TIRONI et al., 2017), um modelo mecanístico, baseado em processos, que descreve o crescimento, desenvolvimento e a produtividade da cultura.

Durante o ciclo de desenvolvimento, os fatores que reduzem e causam a lacuna de produtividade das culturas são de origem climática, ambiental e de manejo (VAN ITTERSUM et al., 2013). O excesso hídrico é um dos principais fatores, sendo que longos períodos de alagamento interferem na disponibilidade de oxigênio no solo para as plantas, podendo ocorrer hipoxia (baixa quantidade de O<sub>2</sub>) ou anoxia (ausência de O<sub>2</sub>) (SAIRAM et al., 2008; DIAS FILHO, 2012). A cultura da mandioca é sensível ao excesso hídrico, e a maior parte das regiões produtoras de mandioca no sul do Brasil apresentam excedente hídrico no solo devido à baixa demanda atmosférica no período de plantio (agosto a novembro). No Rio Grande do Sul, a ocorrência do estresse hídrico é ainda maior, pois além das elevadas precipitações no período

de plantio, as áreas de cultivo normalmente estão em solos mal drenados, como Argissolos presentes em área de baixada e Planossolos (STRECK, et al., 2008; STEFANELLO et al., 2017).

No estabelecimento do excesso hídrico, a transferência de O<sub>2</sub> do ar para o solo é alterada, e sem a reposição, o O<sub>2</sub> dissolvido remanescente no solo é rapidamente consumido pelas plantas e/ou micro-organismos, e o tempo necessário para esgotar totalmente os níveis de oxigênio no solo se dá após 24 horas do início do excesso hídrico (DREW, 1997; ARMSTRONG et al., 1994; MARSCHNER, 1995; DREW ET AL., 2000; LIESACK, SCHNELL & REVSBECH, 2000). Nas plantas não adaptadas a ambientes alagados, a falta do O<sub>2</sub> como acceptor final de elétrons na cadeia respiratória, paralisa e inibe gradativamente a respiração das células, desregulando a rota da glicólise e o Ciclo de Krebs (TAIZ et al., 2017). Assim, produtos fermentativos como o etanol e o lactato são produzidos na cadeia respiratória, diminuindo a produção de energia a cada substrato metabolizado para 2 ATP, sendo que, em condições aeróbicas, a cada substrato metabolizado gera-se 36 ATP de energia (TAIZ et al., 2017).

As perdas de produtividade em mandioca devido ao excesso hídrico, na maioria das vezes, estão associadas a prejuízos na brotação das manivas após o plantio, e morte de plantas provocadas por doenças de solo (TIRONI et al., 2019). Uma alternativa de manejo a ser testada para o cultivo da mandioca em áreas onde ocorre excesso hídrico é a construção de drenos e camalhões, já estudados para a cultura da soja (SARTORI et al., 2015), milho (FARACO et al., 2016) e tabaco (ZALUSKI & ANTONELLI, 2014).

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

Caracterizar os efeitos do excesso hídrico no solo no crescimento da mandioca, identificar práticas de manejo que reduzam o impacto do estresse hídrico na produtividade de mandioca, estimar através do modelo Simanihot, o potencial de produtividade afim de quantificar a lacuna de produtividade (LP).

### 1.1.2. Objetivo específico

- a) Avaliar, através de experimento em vasos, os efeitos na cultura da mandioca submetida a horas de excesso hídrico em diferentes fases de desenvolvimento:

plantio a pré-emergência e no início do desenvolvimento, quando as plantas apresentarem 9 folhas, estágio V9.

- b) Avaliar, através de experimento em campo, os efeitos do excesso hídrico na fase de plantio a pré-emergência da mandioca.
- c) Quantificar os efeitos de práticas de manejo como o cultivo com e sem camalhões sobre o excesso hídrico na cultura da mandioca.
- d) Utilizando o modelo Simanihot, estimar o potencial produtivo para a cultura da mandioca, afim de calcular a lacuna de produtividade da cultura da mandioca cultivada em solos hidromórficos.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. A CULTURA DA MANDIOCA**

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) tem como centro de origem na Amazônia no Brasil, e atualmente está presente na maioria dos países tropicais, devido à extensa disseminação pelos portugueses para a África, Ásia e Caribe nos séculos XVI e XVII (FAO, 2001; VILPOUX, 2011). Pertence à família Euphorbiaceae, apresenta látex em sua estrutura. Seu hábito de crescimento é indeterminado, sendo um arbusto perene, propagado vegetativamente por manivas, que são partes menores do caule (CÂMARA; GODOY, 1998).

A altura da planta é variável, dependendo do genótipo ou da forma de propagação, podendo apresentar porte ereto ou ramificado e, quando ramificado, pode se dividir em dicotômica, tricotômica ou tetracotômica (CARVALHO; FUKUDA, 2006). As flores são monóicas, com inflorescência tipo panícula e racemos compostos por flores masculinas e femininas, formada geralmente nas extremidades das ramificações simpodiais da planta (CARVALHO; FUKUDA, 2006).

No Estado do Rio Grande do Sul, o plantio de mandioca deve ser realizado nos meses de agosto a novembro (MALUF et al., 2011). Apesar de ser uma espécie perene, as raízes tuberosas podem ser colhidas de 6 a 24 meses após o plantio, dependendo da condição de cultivo e variedade. Em períodos prolongados de seca e frio, os agricultores priorizam a colheita entre 18-24 meses, ao passo que, em trópicos úmidos, pode ser colhida entre 6 a 7 meses (ALVES, 2006).

O crescimento e o desenvolvimento da cultura da mandioca são diretamente influenciados por variações de temperatura, fotoperíodo, radiação solar e disponibilidade

hídrica. Temperaturas abaixo de 16°C atrasam a brotação das manivas, reduzindo o peso seco das raízes e a taxa de crescimento foliar, e temperaturas acima de 37°C inibem a brotação (ALVES, 2002; ALVES, 2006). A mandioca necessita de precipitações de 1000 a 1500 mm anuais bem distribuídos para obter boas produtividades. Por ser cultivada em ambientes que oferecem baixas precipitações (<800 mm no ano), a planta desenvolveu certa tolerância a déficit hídrico (MALUF et al. 2011).

## 2.2. FENÔMENO ENOS

Estudos desenvolvidos por vários pesquisadores, para o Rio Grande do Sul e outros locais, concluíram que existe relação entre a variabilidade da produtividade de várias culturas e o efeito do fenômeno ENOS no Sul do Brasil (El Niño Oscilação Sul), como o de Mota (2000) , para o arroz, Fontana; Berlato (1996); Berlato et al.( 2005) milho, Paz et al.( 2012) para o algodão e Woli et al. (2013) amendoim.

O ENOS é um fenômeno natural, de interação atmosfera-oceano, gerado a partir de alterações dos padrões normais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial (BERLATO et al., 2005; SANTOS, 2016). É considerado um dos fenômenos atmosférico-oceânicos mais importantes na Terra, por ocasionar alterações na circulação atmosférica global, que influencia a temperatura e precipitação em todo o planeta, sendo o principal causador da variabilidade climática em diversas regiões do mundo (BERLATO et al., 2005; L'HEUREUX, 2014).

O fenômeno ENOS pode ser mensurado pelo Índice de Oscilação Sul (IOS) e pelo Índice Niño Oceânico (ONI), sendo o ONI o índice de monitoramento principal da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) para o El Niño e La Niña, que são as fases opostas do padrão climático do fenômeno ENOS (SUN et al., 2015; DAHLMAN, 2016). A NOAA considera condições de El Niño quando o ONI é 0,5°C ou superior, indicando que a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) da região equatorial do Oceano Pacífico (aproximadamente a região do chamado Niño 3.4) está mais quente que a média dos últimos 30 anos. Para condições de La Niña, o ONI deve ser -0.5°C ou inferior, indicando que a TSM está mais fria do que o habitual. (DAHLMAN, 2016). Na fase quente do fenômeno, denominada El Niño, ocorre anomalia positiva de precipitação pluvial, enquanto que na fase fria, denominada La Niña, há anomalia negativa, no Sul do Brasil (BERLATO et al., 2005).

O conhecimento das oscilações do ENOS pode auxiliar na tomada de decisão e na adoção de qual estratégia de manejo de solo e da cultura a ser utilizada, tendo em vista as



previsões de déficit ou excesso hídrico. No entanto, RS é uma das regiões mais afetadas pelo ENOS, pois quando se configura a fase El Niño, ocorre precipitação acima da média normal (GRIM, 2011). Assim, em anos de altas precipitações podem ocorrer impactos negativos no solo e/ou nas plantas, devido ao excesso de umidade no solo e na atmosfera, além de menor radiação solar. A cultura da mandioca se caracteriza pela sensibilidade ao excesso hídrico (STEFANELLO et al., 2017; TIRONI et al., 2019), particularmente no período de estabelecimento (PARDALES; YAMAUCHI, 2003). A maior parte das regiões produtoras de mandioca no RS apresenta áreas de solos mal drenados, como os Planossolos e por vezes imperfeitamente drenados, como os Argissolos (STRECK, 2008), dificultando o cultivo de mandioca em anos muito chuvosos.

Segundo o zoneamento de risco climático (ZARC) para o RS, o plantio de mandioca se estende de agosto a novembro, sendo que o período que reflete o maior potencial produtivo é de agosto a setembro (<http://w3.ufsm.br/simanihot>). O Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), demonstra, através da série histórica de 2004-2019, que nos meses de agosto e setembro ocorrem as maiores precipitações do ano, fato que ocasiona dificuldades de plantio a campo, quando não houver estratégias de manejo, como o cultivo em camalhões. Diante disto, em anos de El Niño ou com precipitações elevadas, o excesso hídrico pode causar danos à cultura.

### 2.3. MODELAGEM MATEMÁTICA NA AGRICULTURA

Modelos agrícolas podem ser utilizados para descrever de forma simples os processos ecofisiológicos de culturas agrícolas por meio de equações matemáticas, auxiliando a tomada de decisões (STRECK et al., 2003). Os modelos são alternativas para se adotar o manejo mais adequado, conforme as oscilações do clima e do ambiente sobre o desenvolvimento e crescimento das culturas. Os modelos procuram descrever as interações entre agroecossistemas, sendo uma simplificação da realidade, ferramenta que nos permite estudar o crescimento e desenvolvimento de plantas cultivadas (SHIN et al., 2006; SHIN et al., 2010; SAMBORANHA, 2012).

A produtividade de culturas agrícolas também pode ser simulada através dos modelos, os quais podem se agrupar em modelos empíricos e mecanísticos. Os modelos baseados em relações estatísticas, com ou sem relação de causa/efeito, ou seja, a partir dos dados inseridos são ajustadas equações matemáticas através de métodos estatísticos, são denominados modelos matemático-empíricos. Os modelos denominados matemáticos mecanísticos são os que através

de equações descrevem os processos, porém a uma necessidade de compreensão dos processos envolvidos no fenômeno de estudo e após procura-se relações matemáticas baseadas em soluções analíticas ou numéricas (STRECK et al., 2013).

Modelos matemáticos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade já tem sido propostos para as culturas de Arroz no Sul do Brasil (SimulArroz; STRECK et al., 2013) e gladiolo (PhenoGlad; UHLMANN et al., 2017), sendo que, para a cultura da mandioca, foi desenvolvido um modelo matemático dinâmico denominado Simanihot, que simula o crescimento, desenvolvimento e a produtividade da cultura para condições edafoclimáticas do Estado do Rio Grande do Sul (STRECK et al., 2015; TIRONI et al., 2017).

#### 2.4. ÁGUA NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA

As principais formas de precipitação de água líquida são a chuva ou as irrigações. Dependendo de sua variabilidade espaço-temporal, da capacidade de armazenamento do solo, assim como da condição de demanda atmosférica por vapor de água, o solo pode ser levado a uma condição de déficit ou excesso hídrico.

A água precipitada, ao atingir o solo, infiltra e/ou escoar, podendo ocorrer maior ou menor escoamento superficial, dependendo de sua intensidade, dependente das características físicas e declividade do solo. A água ao infiltrar no solo é retida nos microporos, ficando armazenada para ser consumida pelas plantas. Ao ser absorvida pelas plantas, é perdida através das folhas para a atmosfera pela transpiração, cujo vapor d'água, ao retornar à atmosfera em condições ideais, formam as nuvens, podendo ocasionar o retorno da água novamente a superfície por meio das chuvas (LACERDA, 2007).

A utilização de sistemas conservacionistas de preparo do solo pode afetar a capacidade de infiltração e armazenamento de água, quando comparados com sistemas convencionais (SALTON; MIELNICZUK, 1995; ROJAS; VAN LIER, 1999; COSTA et al., 2003). Sistemas de plantio direto e preparo mínimo tem por objetivo não revolver ou revolver o mínimo possível de solo. Manter resíduos culturais na superfície auxilia para a melhoria das condições físico-hídricas do solo, evitando a formação do chamado “selamento superficial”, resultando em aumento da estabilidade de agregados, estabelecimento de porosidade contínua (bioporos) e o equilíbrio entre a macro e microporosidade, fatores estes que contribuem para um maior volume de água disponível no solo (SALTO; MIELNICZUK, 1995).

O preparo convencional são geradas modificações na rugosidade superficial, que, com a incorporação de resíduos vegetais, diminuem a capacidade de infiltração, aumentando a

evaporação da água do solo, manejo este utilizado com maior abrangência no RS. A interferência da retenção da água se dá pelo manejo utilizado, granulometria e constituição do solo, onde as forças de adsorção são consequência da espessura do filme de água que recobre as partículas. Em solos com alto teor de argila e matéria orgânica, a retenção de água é maior (SILVA et al., 2005). Portanto, o volume de água que infiltra no solo via chuva ou irrigação, quando superior à capacidade de infiltração e/ou armazenamento do solo por um longo período, proporciona a saturação do mesmo. Quando isso acontece, o excesso de água é escoado sobre a superfície até alcançar um canal que a retire da zona de exploração agrícola. Se a quantidade escoada não é suficiente, ou a drenagem é deficiente, ocorre o alagamento do solo, que causa uma série de limitações ao metabolismo das plantas, devido ao excesso de umidade, exceto para plantas adaptadas, como o arroz irrigado.

Quando o solo se torna encharcado, a transferência de O<sub>2</sub> do ar para o solo é alterada, pois os poros do solo (macroporos) que geralmente estão ocupados por ar ficam preenchidos de água. Sem a reposição do ar, o O<sub>2</sub> dissolvido remanescente no solo é rapidamente consumido pelas plantas e/ou microorganismos, (DREW et al., 1997). A temperatura é um dos fatores mais relevantes para o consumo de oxigênio no solo, pois, com o aumento da temperatura (>20°C) pode acelerar o consumo do O<sub>2</sub> pelos microorganismos e pela respiração das raízes das plantas. Nessas condições, o tempo para esgotar totalmente os níveis de oxigênio do solo após é de 24 horas do início do excesso hídrico (ARMSTRONG et al., 1994; MARSCHNER, 1995; DREW et al., 2000; LIESACK; SCHNELL; REVSBECH, 2000).

Durante períodos de alagamento de curta duração, a disponibilidade de oxigênio no solo é baixa, ocorrendo hipoxia (SAIRAM et al., 2008). Já em solos com longo período de alagamento, onde os níveis de oxigênio são completamente ausentes, ocorre a anoxia (DIAS FILHO, 2012). A primeira resposta das plantas que não são adaptadas a ambientes alagados é metabólica e, devido a falta do O<sub>2</sub> como aceptor final de elétrons na cadeia respiratória, ocorre a paralisação e inibição gradativamente da respiração das células, desregulando a rota da glicólise e o Ciclo de Krebs; consequentemente, há redução na produção de ATP a cada substrato (glicose) metabolizado (TAIZ et al, 2017).

A falta de oxigênio na cadeia respiratória interfere na fosforilação oxidativa, e para os elétrons serem transferidos ao longo de uma cadeia de transporte, o oxigênio deve estar presente e atuar como aceptor final destes elétrons. Com a ausência do O<sub>2</sub> como aceptor final, a respiração ocorre apenas no citoplasma (anaeróbica), onde a rota da glicólise não irá operar, não ocorrendo a fosforilação e aprisionando o NADH, metabolizando o piruvato, produzindo

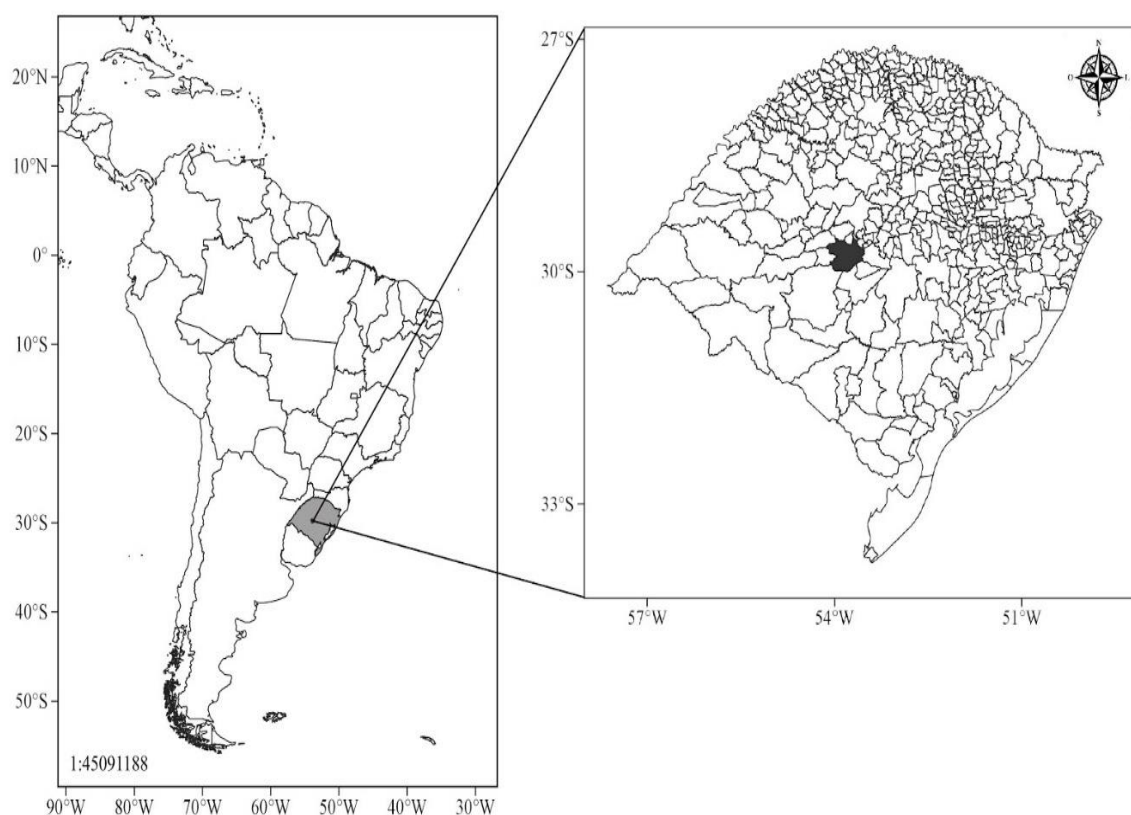
produtos da fermentação como o etanol e o lactato. Ao ocorrer o processo fermentativo na respiração, diminui a produção de energia a cada substrato metabolizado para 2 ATP, sendo que, em condições aeróbicas, a cada substrato metabolizado são gerados 36 ATP de energia (TAIZ et al, 2017). O acúmulo destes produtos tóxicos (etanol e lactato), juntamente com a diminuição do metabolismo energético, afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas e ocasionam injúrias e até mesmo morte das células (DREW, 1997).

As perdas de produtividade devido ao excesso hídrico, na maioria das vezes, estão associadas à prejuízos na brotação das manivas após plantio, morte de plantas e aparecimento de doenças que estes ambientes acabam favorecendo. Na fase de emergência, por exemplo, se ocorrer excesso hídrico e o alagamento do solo permanecer por um longo período, a produtividade pode ser comprometida, por diminuir o número de plantas estabelecidas (TIRONI et al., 2019). Outra fase importante em que se deve evitar o estresse hídrico é durante a acumulação de amido, pois, os produtores geralmente mantem a cultura por longo período no campo (até 24 meses) como forma de armazenamento, sendo que solos com excesso de umidade, o risco de ocorrer podridões radiculares é alto. Uma alternativa de manejo para o cultivo da mandioca em áreas onde ocorre excesso hídrico é a construção de drenos e camalhões antes do plantio, pois é um método que minimiza os efeitos do excesso de umidade, sendo eficaz para evitar alagamentos na superfície do solo, já estudados para a cultura da soja (SARTORI et al, 2015), milho (FARACO et al, 2016) e tabaco (ZALUSKI; ANTONELLI, 2014), proporcionando um melhor estabelecimento, crescimento e desenvolvimento das plantas.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O presente estudo consistiu de duas partes, a primeira com experimentos em vasos e de campo, e uma segunda, a simulação da produtividade, a partir dos dados obtidos nos experimentos. O experimento de campo foi conduzido em área experimental do departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Santa Maria. O clima da região é subtropical úmido, tipo Cfa, pela classificação de Koppen (ALVARES et a., 2013), apresentando temperatura média acima de 22°C no verão, com precipitação média anual superior a 1600 mm (FACCO, et al., 2012). Os experimentos foram conduzidos em um Planossolo, que apresentou 18% de argila (textura média), 1.5% de matéria orgânica, e pH em água de 5.5. Em condições de clima úmido, esses solos são classificados como hidromórficos, por serem mal drenados.

Figura 1. Local dos experimentos no Rio Grande do Sul – Santa Maria.



### 3.1. EXPERIMENTO EM VASOS

Dois experimentos foram conduzidos, no ano agrícola 2018/19 e 2019/20, visando identificar o período, em horas, que causa maiores danos na cultura devido ao excesso hídrico. O experimento foi conduzido em vasos, com imposição de excesso hídrico em diferentes fases de desenvolvimento. No experimento 1, o excesso hídrico foi imposto logo após o plantio das manivas, antes da emergência das plantas. No experimento 2, o excesso hídrico foi imposto no início do desenvolvimento, quando as plantas haviam atingido 9 folhas, estágio V9 (TIRONI, et al 2019). Os tratamentos foram posicionados nessas fases do desenvolvimento, porque a época de plantio que proporciona a expressão do potencial de produtividade da mandioca é de agosto a setembro, que também são os períodos onde ocorrem elevados índices de chuva e baixa demanda atmosférica, proporcionando maior risco climático por excesso hídrico.

Os vasos foram posicionados sobre bancadas com altura de 0,7 m da superfície, no centro de um telado coberto que apresentava dimensões entre 9 m de comprimento, 6 m de largura e 3 m de pé direito, com orientação Leste – Oeste, coberto com filme plástico

transparente e com as laterais semiabertas. Os vasos apresentaram dimensões de 23,5 cm de diâmetro na borda superior, 19 cm na borda inferior e 22 cm de altura, totalizando 9 litros, sendo preenchidos com solo característico de ambientes com excesso hídrico, corrigido conforme a análise química, mantendo a homogeneização e a mesma massa de solo em todos os vasos. Para ambos os experimentos, o plantio foi realizado na segunda quinzena de setembro, com a cultivar vassourinha, por ser a mais plantada no Sul do Brasil. Selecionou-se manivas homogêneas, deixando-as com 5 gemas; a profundidade de plantio foi de 5 cm, plantadas de forma horizontal. Cada vaso foi considerado como uma unidade experimental (UE), sendo que os tratamentos foram sorteados e dispostos no delineamento inteiramente casualizado. No dia anterior ao plantio, os vasos foram irrigados até a saturação, para que no dia do plantio o solo apresentasse umidade próxima a capacidade de campo. Os experimentos constaram de 6 tratamentos com 5 repetições, os quais foram: Testemunha = zero horas ou sem aplicação de excesso hídrico; T1= 24 horas de excesso hídrico; T2 = 48 horas de excesso hídrico; T3 = 72 horas de excesso hídrico; T4 = 96 horas de excesso hídrico e T5 = 120 horas de excesso hídrico. No experimento 1, os tratamentos iniciaram após 8 dias após o plantio. No experimento 2 os tratamentos foram submetidos ao excesso hídrico quando as plantas atingiram 9 folhas (38 dias após plantio). A condução de ambos experimentos teve duração de 69 dias após plantio.

A reposição do conteúdo de água nas UEs, antes da implantação dos tratamentos de excesso hídrico e após o excesso hídrico, foi realizada através de irrigações diárias, de forma a manter a umidade nos vasos próxima a capacidade de campo. No período dos tratamentos de excesso hídrico, utilizaram-se vasos externos, com dimensões maiores (30 cm de diâmetro na borda superior, 22 cm na borda inferior e 25 cm de altura), para auxiliar na manutenção do excesso hídrico nos vasos de plantio, onde as perfurações desses vasos externos foram fechadas com o auxílio de um filme plástico, evitando a passagem da água. Na aplicação dos tratamentos, adicionou-se água em ambos os vasos (externo e de plantio). Os vasos de plantio, por apresentarem perfurações no fundo, possibilitaram a ascensão da água do vaso externo para o vaso de plantio, mantendo o solo em excesso hídrico, em função do nível da água estabelecido no vaso externo. No período dos tratamentos de excesso hídrico, os vasos foram mantidos com uma lâmina de água em torno de 5 cm do nível do solo do vaso.

### 3.2. EXPERIMENTO EM CAMPO

O experimento foi implantado em um Planossolo, na segunda quinzena de setembro de 2018, em plantio convencional, onde, em parte da área foram confeccionados camalhões usando

enxada rotativa encanteiradora, apresentando 0,8 m de largura na base, 0,6 m de altura e 0,4 m de largura da crista (Figura 2). A adubação foi realizada de acordo com a análise de solo, aplicado na cova de plantio, e a densidade de plantas de mandioca foi de 15.625 plantas ha<sup>-1</sup>, no espaçamento de 0,8 m entre linha e 0,8 m entre plantas. Cada parcela constituída de 6 fileiras, com 10 plantas por fileira. A cultivar de mandioca utilizada foi a Vassourinha, selecionando-se manivas homogêneas, deixando-as com 5 gemas, a uma profundidade de plantio de 5 cm. O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, com parcelas subdivididas, sendo um experimento bifatorial, com fator qualitativo e quantitativo.

Figura 2. Camalhões utilizados no experimento a campo.



Os tratamentos testados foram: Fator A - com e sem camalhão e o Fator B - horas de excesso hídrico (0, 48, 96 e 144 horas), aplicadas 8 dias após o plantio, antes da emergência. Os tratamentos foram casualizados e, para garantir o excesso hídrico, foi utilizada a irrigação por inundação. Com auxílio de arame e fita colorida, identificaram-se cinco plantas em cada

parcela, para a realização de avaliações durante todo o ciclo de cultivo. A colheita foi realizada no dia 29 de maio de 2019.

### 3.3. AVALIAÇÕES REALIZADAS NOS EXPERIMENTOS

As variáveis observadas no experimento em vasos foram: data de emergência (EM), velocidade de emergência (VE), porcentagem de estabelecimento (PE), densidade final de plantas (DF), número de folhas (NF), altura de planta (AP), área foliar (AF), massa seca de folha (MSF), massa seca de haste (MSH) e massa seca de raiz (MSR). As variáveis observadas para a análise no experimento à campo foram: data de emergência (EM), velocidade de emergência (VE), porcentagem de estabelecimento (PE), densidade final de plantas (DF), número de folhas (NF), índice de área foliar (AF), massa seca de folha (MSF), massa seca de haste (MSH), massa seca de raiz (MSR) e produtividade de raiz ( $t\ ha^{-1}$ ).

A emergência foi avaliada diariamente até a estabilização do número de plantas emergidas e a data de emergência foi considerada quando 50% do total das manivas plantadas em cada tratamento apresentaram a primeira brotação visível acima do solo. A velocidade de emergência foi calculada através do seguinte cálculo:

$$VE = (N1/D1) + (N2/D2) + \dots (Nn/Dn) \quad (1)$$

em que: N1 é o número de plantas emergidas na primeira contagem; D1 é o número de dias após plantio para a primeira contagem; Nn é o número de plantas emergidas na última contagem; Dn é o número de dias após plantio para a última contagem;

Para avaliar a porcentagem de estabelecimento (PE), considerou-se o número de plantas por tratamento, que emergiram e se estabeleceram, apresentando duas folhas ou mais. A PE foi calculada através da seguinte expressão:

$$PE(\%) = \frac{(100 * NPE)}{NMP} \quad (2)$$

em que: NPE é o número de plantas estabelecidas (com mais de duas folhas abertas) no tratamento; NMP é o número total de manivas plantadas no tratamento.

A densidade final de plantas foi calculada diminuindo do número de manivas plantadas em cada UE do número total de manivas plantadas que não emergiram e/ou não se estabeleceram na unidade experimental. Após o estabelecimento das plantas, semanalmente foi realizada a contagem do NF, considerando a primeira folha da base até a última folha aberta do ápice (considerou-se como folha aberta quando os lóbulos não se tocavam mais). A AP foi medida através de uma régua, medindo da base da planta ao nível do solo até o ápice da planta,



e a AF foi realizada conforme metodologia de Tironi et al. (2015), medindo-se o comprimento longitudinal do lóbulo principal de cada folha com auxílio de uma régua, utilizando a seguinte equação:

$$AF = 0,1335x^{2,2376} \quad (3)$$

em que: x é o comprimento longitudinal do lóbulo central.

O IAF foi calculado somando-se as áreas individuais das folhas de cada planta dividindo-se pela área de solo ocupada pela planta. Para obter MSF, MSH e MSR, no experimento de vasos, foi coletada a planta de cada UE. No experimento a campo, foram coletadas as cinco plantas marcadas em cada parcela. As amostras foram particionadas em raiz, caule e folhas, sendo colocadas para secar em estufa a 60°C por 20 dias (tempo necessário para atingir massa constante). A produtividade de cada tratamento no experimento a campo foi calculada de acordo com a densidade final de cada parcela, e as LP foram determinadas pela diferença entre o PP estimado em setembro do ano agrícola 2018/2019 (simulado para mesmas condições e época de plantio em que ocorreu no experimento a campo) e a produtividade média dos tratamentos no experimento a campo:

$$LP = PP - PMn \quad (4)$$

em que: LP é a lacuna de produtividade do tratamento; PP é o potencial de produtividade estimado pelo modelo no ano agrícola 2018/2019; PMn é a produtividade média do tratamento avaliado.

### 3.4. ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO

O potencial de produtividade (PP) foi estimado para o período de 2004 a 2018, período necessário para uma estimativa robusta e confiável (GRASSINI et al., 2015), sendo utilizado o modelo Simanihot, já calibrado e validado para o Rio Grande do Sul (TIRONI et al., 2017). Para realizar as simulações, foram organizados os dados meteorológicos diários dos últimos 15 anos, das variáveis de temperatura mínima do ar, temperatura máxima do ar, temperatura média do ar, umidade relativa do ar e da velocidade do vento, obtidos da estação meteorológica de Santa Maria-A803 (INMET, 2019), localizada a 500 metros do experimento de campo. O modelo Simanihot foi rodado para Santa Maria/RS, Brasil, com a quantidade de CO<sub>2</sub> atmosférico de 400 ppm e a densidade de 15.625 plantas ha<sup>-1</sup>. As simulações foram realizadas com plantio no dia 11 dos meses de agosto, setembro, outubro e novembro de cada ano do período de 2004 a 2018. Devido à região de estudo apresentar risco de temperaturas abaixo de 3°C a partir da segunda quinzena de junho, a data de colheita em todas as épocas de plantio foi fixada no dia 15/06 de cada ano subsequente (2005-2019).

### 3.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

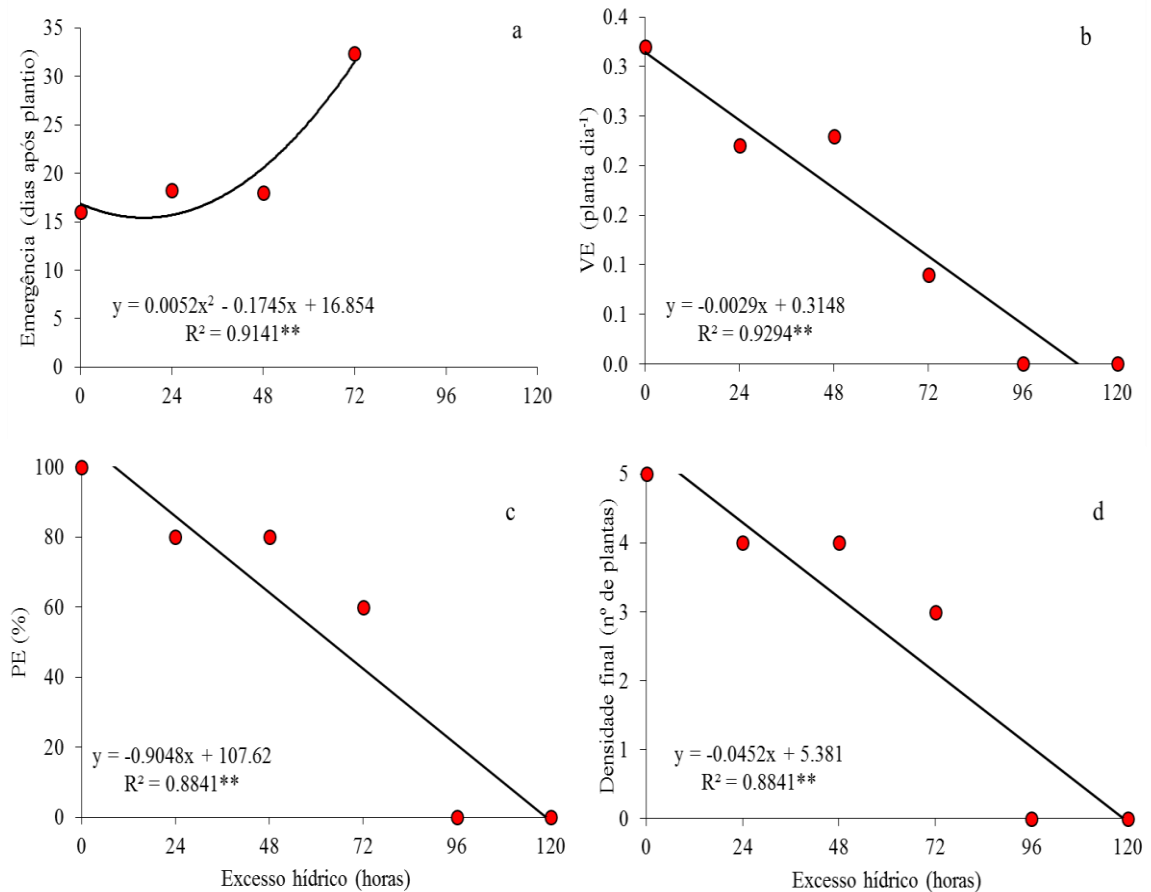
Para avaliar o efeito do excesso hídrico no crescimento e na produtividade da mandioca, os dados foram submetidos a análises de variância pelo teste F a 5% de probabilidade. Para dados quantitativos foram executadas análises de regressão e para dados qualitativos teste t de Student e Tukey para as comparações das médias em caso de significância estatística. O software utilizado para todas as análises estatísticas foi o SISVAR versão 5.7.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. RESPOSTA FISIOLÓGICA E MORFOLÓGICA DAS PLANTAS DE MANDIOCA SOB EXCESSO HÍDRICO EM AMBIENTE CONTROLÁVEL

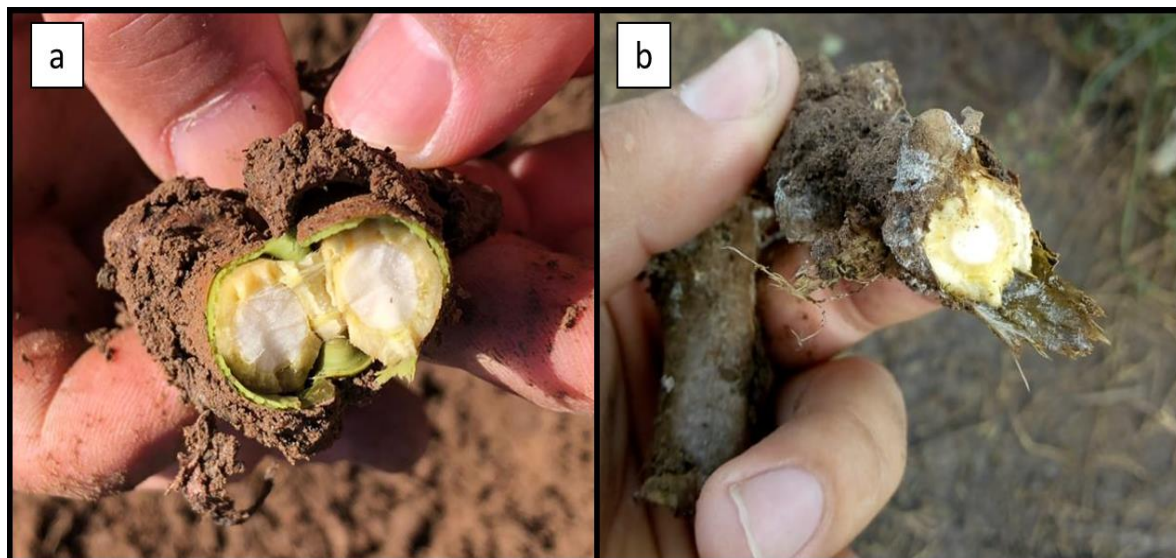
O excesso hídrico imposto na fase plantio à pré-emergência (experimento 1) provocou reduções na emergência, velocidade de emergência, porcentagem de estabelecimento e a densidade final de plantas (Figura 3). Na figura 3a observa-se que, à medida que se aumentou as horas de excesso hídrico, ocorreu um atraso na emergência das plantas de mandioca, sendo que, no tratamento de 72 horas de excesso hídrico, o tempo necessário para a emergência foi de 32 dias, enquanto que, nos tratamentos onde se aplicou de 96 e 120 horas de excesso hídrico não foi verificada a emergência de plantas. Em condições favoráveis, os primeiros brotos emergidos podem ser visualizados dentro de 15 dias após o plantio (ALVES, 2006; TIRONI et al., 2019). As variáveis velocidade de emergência (Figura 3b), porcentagem de estabelecimento (Figura 3c) e densidade final de plantas (Figura 3d), decresceram drasticamente à medida que se aumentou as horas de excesso hídrico, sendo uma consequência das plantas que levaram maior tempo para emergência e/ou plantas que não emergiram. A cada 24 horas de excesso hídrico, cerca de 20% das plantas não emergiram devido ao estresse hídrico e, a partir de 96 horas da permanência do excesso hídrico no solo, não ocorreu emergência das plantas (Figura 3c).

Figura 3. Emergência (a), velocidade de emergência (b) porcentagem de emergência (c) e densidade final de plantas (d) submetidas a horas de excesso hídrico na fase plantio à pré-emergência (experimento 1, em vasos). A densidade inicial foi de 5 manivas plantadas em cada tratamento.



Não se observou emergência de plantas nos tratamentos com 96 e 120 horas de excesso hídrico, o qual foi observado morte celular no tecido vegetal das manivas, inibindo a brotação e geração de uma nova planta (Figura 4). Este fato pode ser explicado devido ao excesso hídrico proporcionar níveis de oxigênio no solo muito baixos, ocorrendo hipóxia ou anoxia, caso o excesso hídrico persistir no solo (SAIRAM et al., 2008; DIAS FILHO, 2012).

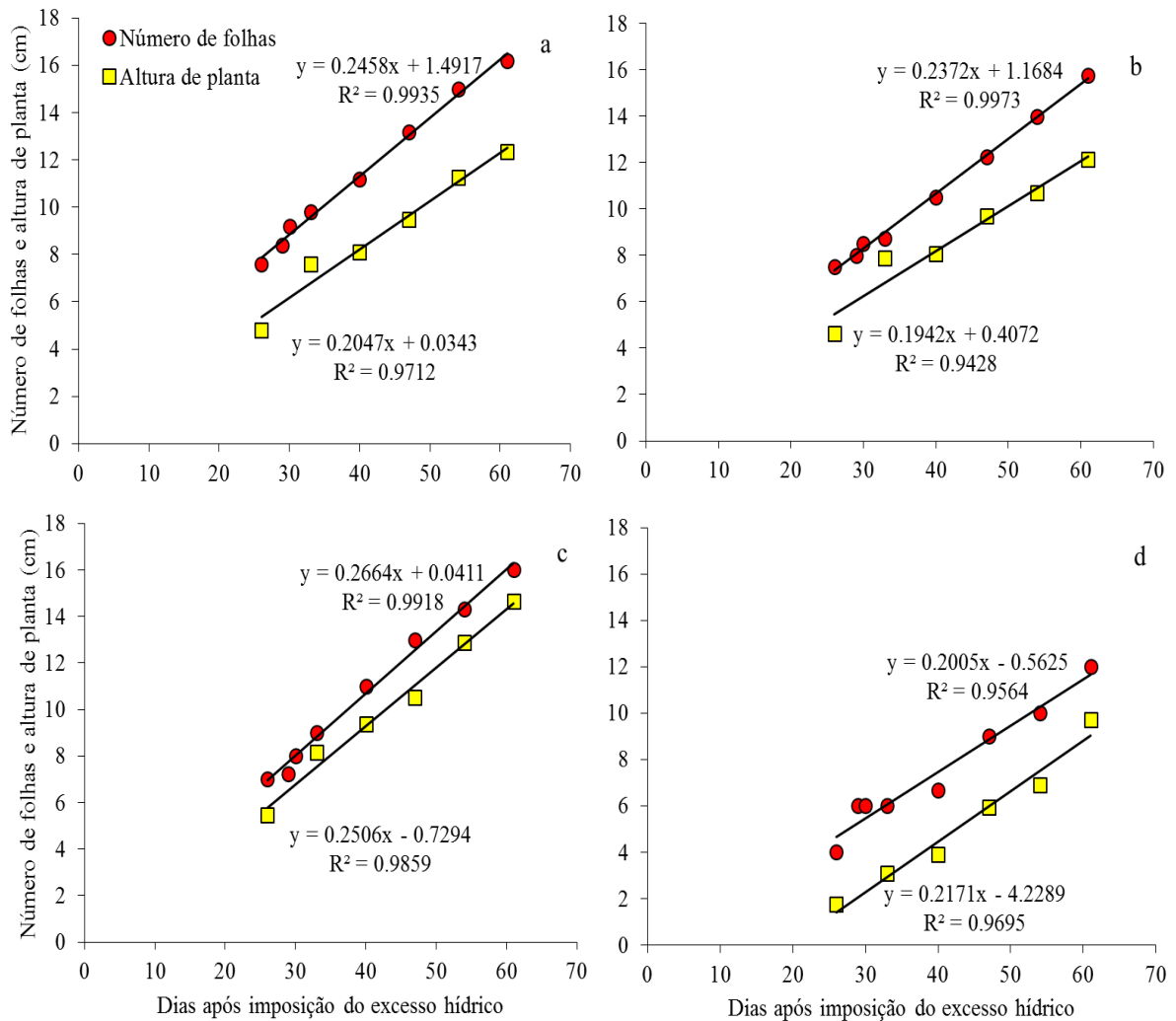
Figura 4. Maniva com tecido vegetal normal (coloração verde), sem sinais de morte celular (a), e maniva com tecido vegetal morto (coloração amarronzada), devido a morte das células (b).



A falta do  $O_2$  paralisa e inibe gradativamente a respiração aeróbica das células, reduzindo a produção de calor e energia de 36 para 2 ATP's. Esta diminuição energética, juntamente com produtos tóxicos (etanol e lactato) gerados pela respiração fermentativa, acabam bloqueando o trabalho bioquímico. O transporte de  $H^+$  através da ATPase torna-se lenta, o gradiente de pH entre o citosol e o vacúolo não se mantém, e os prótons acabam migrando do vacúolo para o citoplasma. A respiração fermentativa gera uma acidez celular devido a produção de ácido lático no citosol, acidose essa que acaba rompendo irreversivelmente o metabolismo no citoplasma, e todos estes aspectos que ocorrem devido à falta de  $O_2$  acabam resultando na morte das células (TAIZ et al., 2017).

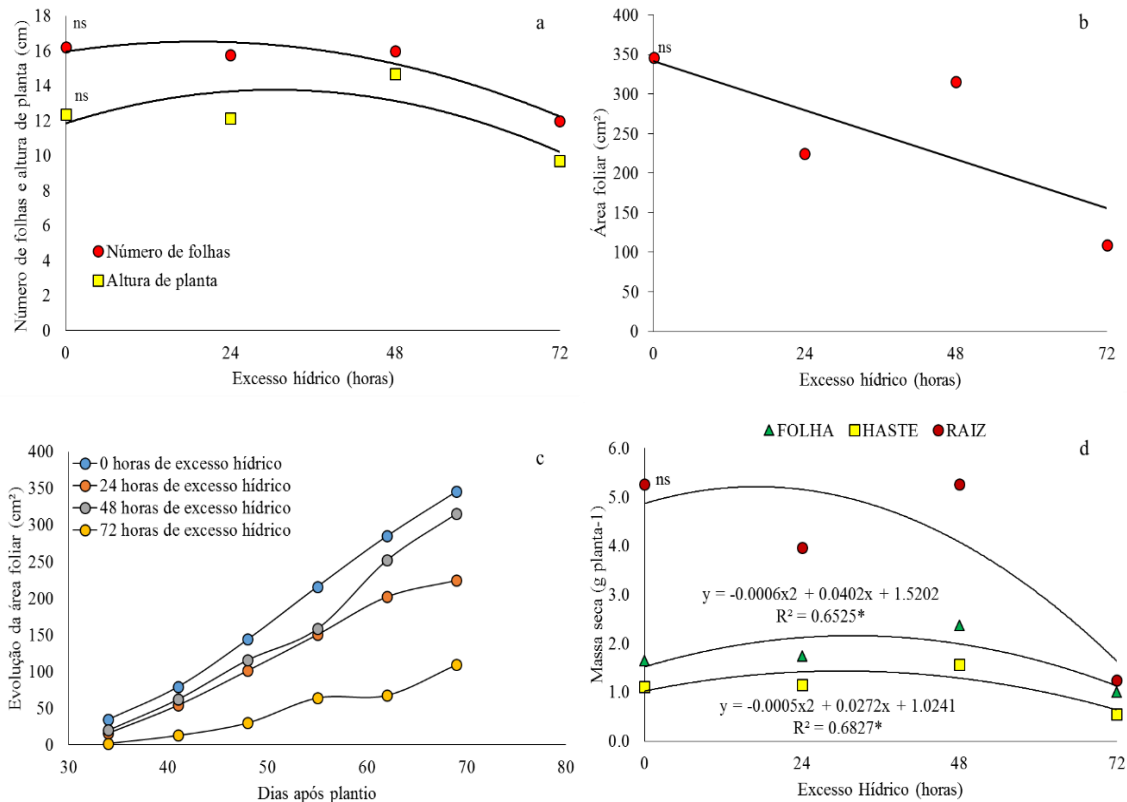
Após a retirada do excesso hídrico na fase do plantio à pré-emergência, as plantas de mandioca que emergiram e se estabeleceram apresentaram evolução do crescimento normal (Figura 5). Ao realizar a análise da variância, as variáveis NF, AP, AF, não apresentaram diferença significativa com os períodos de excesso hídrico imposto. Apesar de não apresentar diferença estatística, houve um leve decréscimo nos valores do NF, AP e AF no período de 72 horas de excesso hídrico, sendo explicado pelo atraso na emergência deste tratamento (Figuras 6 e 7). Estes resultados estão de acordo com estudos realizados em milho doce (Marinho et al., 2019), soja (GAZOLLA-NETO et al., 2012), e em feijão (CUSTÓDIO et al., 2009), que observaram atraso na emergência, gasto energético e plantas não emergidas devido ao excesso hídrico imposto.

Figura 5. Evolução do número de folhas e altura de plantas de mandioca submetidas a zero horas de excesso hídrico (a), 24 horas de excesso hídrico (b), 48 horas de excesso hídrico (c), 72 horas de excesso hídrico (d) na fase de plantio à pré-emergência (experimento 1, em vasos). O excesso hídrico foi imposto 8 dias após o plantio e as avaliações iniciaram semanalmente após a emergência e estabilidade das plantas, transcorridos 26 dias após imposição do excesso.



Considerando o tratamento de 48 horas de excesso hídrico, verificou-se resposta do NF, AP, AF semelhante ao tratamento sem imposição de excesso hídrico e superior aos tratamentos de 24 e 72 horas de excesso hídrico, porém sem diferença estatística. A massa seca das partes da planta do tratamento de 48 horas de excesso hídrico seguiu o mesmo comportamento das variáveis citadas acima (Figura 6).

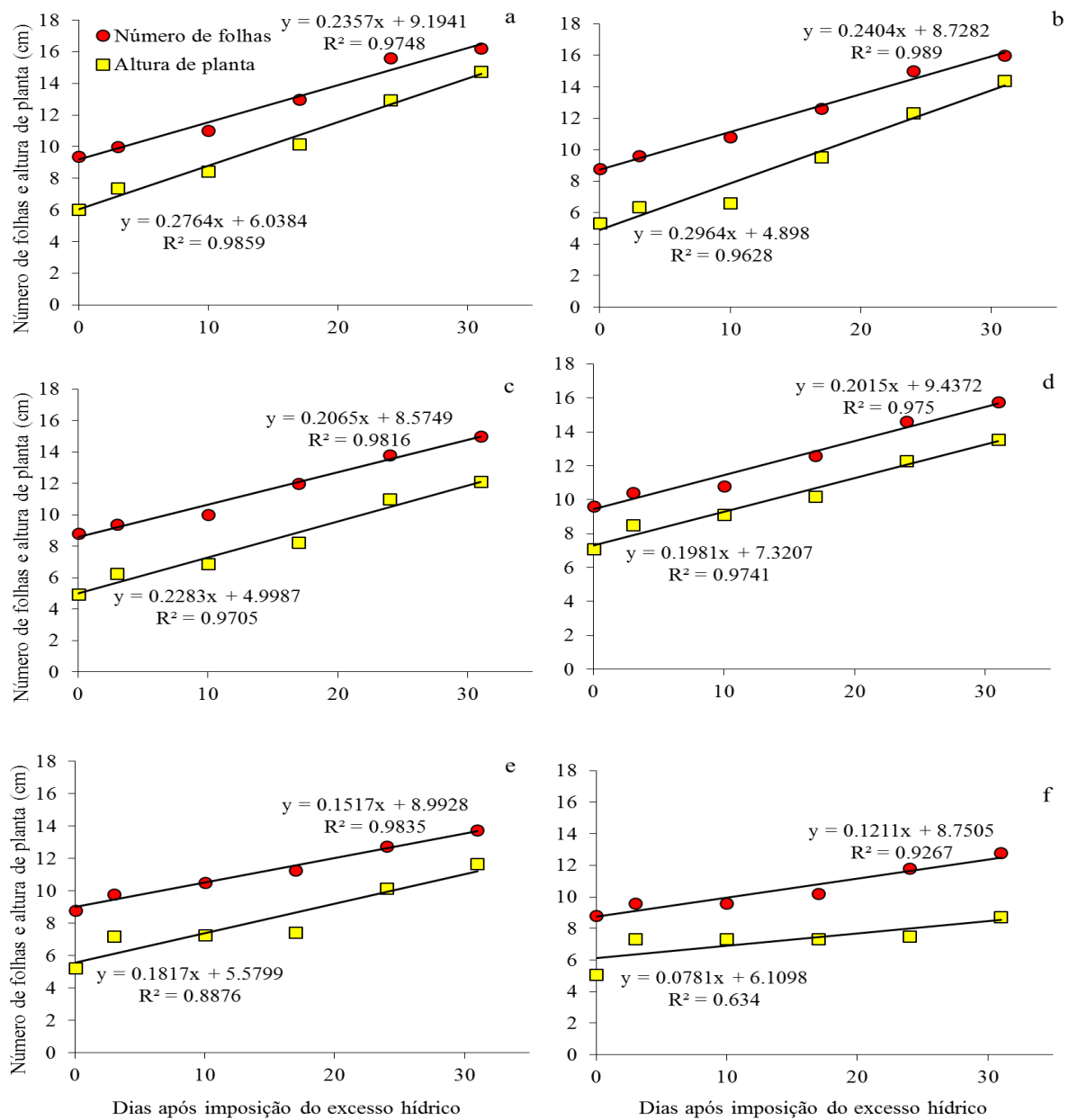
Figura 6. Regressão do número de folhas e da altura de planta (a), área foliar (b) e da massa seca de folha, haste e raiz (d) aos 69 dias após plantio, submetidas a horas de excesso hídrico. Evolução da área foliar (c) das plantas de mandioca em cada tratamento submetidas a horas de excesso hídrico, na fase plantio à pré-emergência (experimento 1 em vasos). \*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. ns = não significativo.



Com relação a maior área foliar no tratamento de 48 horas, comparado às 24 e 48 horas de excesso hídrico, pode-se inferir através de estudos relatados que plantas de mandioca sob condições de estresse hídrico, tende a aumentar a área foliar, produzindo novas folhas rapidamente após a liberação do estresse, excedendo as plantas sob condições normais. Devido ao estresse hídrico imposto, o potencial de crescimento da parte aérea é mais restringido do que a capacidade das folhas assimilar carbono atmosférico, permitindo que carboidratos sejam realocados em maior quantidade para as raízes. Após a liberação do estresse, houve uma rápida expansão e renovação do dossel, onde reservas acumuladas nas raízes de armazenamento desempenham um papel importante na recuperação da planta após algum estresse que a mesma venha a sofrer (BAKER et al., 1989; CONNOR & COCK, 1981; COURTS, 1951). A imposição do excesso hídrico na fase inicial do desenvolvimento, quando as plantas atingiram 9 folhas, 38

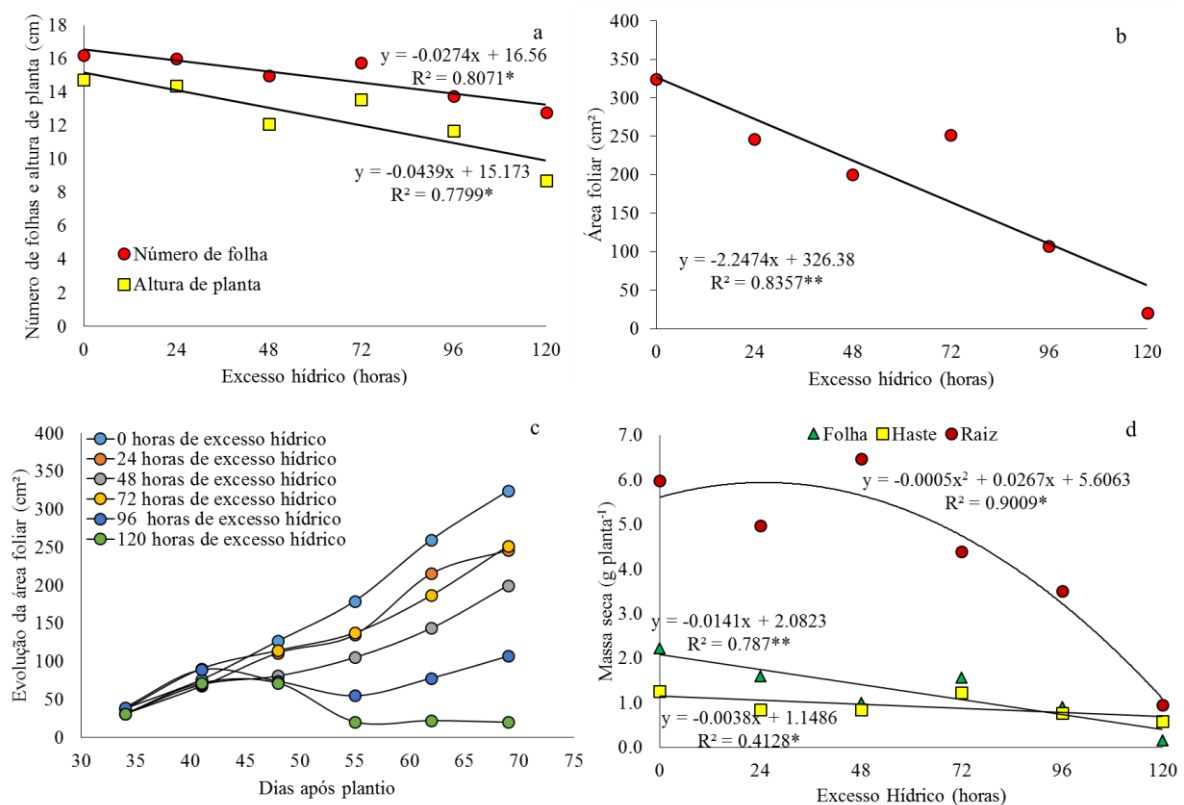
dias após plantio, causou diminuição e paralização do crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo de forma mais acentuada nos tratamentos de 96 e 120 horas (Figura 7).

Figura 7. Evolução do número de folhas e da altura de plantas de mandioca durante o período experimental submetidas a zero horas de excesso hídrico (a), 24 horas de excesso hídrico (b), 48 horas de excesso hídrico (c), 72 horas de excesso hídrico (d), 96 horas de excesso hídrico (e) e 120 horas de excesso hídrico (f) na fase do início de desenvolvimento (experimento 2, em vasos). O excesso hídrico foi imposto 38 dias após plantio quando as plantas apresentaram 9 folhas.



A cada 24 horas de permanência do excesso hídrico no solo, o número de folhas por planta diminui gradativamente em 0,66 folhas (Figura 8a), a AP em 1,05 cm (Figura 8a), a AF em 53,94 cm<sup>2</sup> (Figura 8b), MSF em 0,34 g, MSH em 0,03 g e MSR 0,22 em 1,95 g (Figura 8d). Pode-se observar, também, que na evolução da área foliar, demonstrada na figura 8c, o crescimento da planta é afetado negativamente pelo estresse hídrico, principalmente nos tratamentos de 96 e 120 horas de excesso hídrico, em que se verificaram os menores incrementos de área foliar.

Figura 8. Regressão do número de folhas e da altura de planta (a), área foliar (b) e da massa seca de folha, haste e raiz (d) aos 69 dias após plantio submetidas a horas de excesso hídrico, e evolução da área foliar (c) das plantas de mandioca submetidas a horas de excesso hídrico, na fase do início de desenvolvimento (experimento 2 em vasos). O excesso hídrico foi imposto 38 dias após plantio quando as plantas apresentaram 9 folhas. \*\*Significativo a 1% de probabilidade e \*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.



A imposição de 96 e 120 horas de excesso hídrico, em média, resultou numa redução de 38% e 71%, respectivamente, da área foliar, como forma de defesa (Figura 8c). Porém ressalta-se que algumas plantas apresentaram senescência total, nos tratamento com imposição de 96 e



120 horas, na tentativa de sobreviver a indução através de uma nova brotação após o estresse hídrico (Figura 9f).

Figura 9. Paineis a-f: Plantas de mandioca submetidas a 0 horas e a 96 horas de excesso hídrico após 4 dias da imposição do excesso. Paineis b-f: Plantas de mandioca submetidas a 0 horas e a 96 horas de excesso hídrico 24 horas após drenagem do excesso. Paineis c-f: Planta de mandioca submetida a 96 horas de excesso hídrico 24 horas após drenagem do excesso. Paineis d-f: Planta de mandioca submetida a 96 horas de excesso hídrico 13 dias após imposição do excesso. Paineis e-f: Plantas de mandioca submetidas a 0 horas e a 96 horas de excesso hídrico 13 dias após imposição do excesso. Paineis f-f: Planta de mandioca submetida a 96 horas de excesso hídrico 30 dias após imposição do excesso. O excesso hídrico foi imposto 38 dias após plantio quando as plantas apresentaram 9 folhas (experimento 2, em vasos).



Como mencionado anteriormente, estes resultados podem ser explicados pela falta do  $O_2$  comoceptor final de elétrons na cadeia respiratória da planta, onde a respiração aeróbica das células é gradativamente inibida e paralizada, reduzindo a produção de ATP, gerando produtos tóxicos, incapacitando o trabalho bioquímico resultando na morte celular. Fato interessante é que, a diminuição da energia metabólica associada a morte celular nas raízes devido ao estresse hídrico, causa aceleração na produção e na atividade do ácido 1-aminociclopropano - 1- carboxílico (ACC) - sintase nas raízes, que se desloca via xilema, encontrando uma maior quantidade de  $O_2$  na parte aérea da planta, onde é convertido em etileno pela ACC oxidase (TAIZ, et al., 2017). As plantas de maneira geral, apresentam na superfície superior do pecíolo, células responsivas ao hormônio de etileno e, devido ao aumento deste na parte aérea, essas células se expandem mais rapidamente, resultando no que chamamos de epinastia (TAIZ, et al., 2017). Sintoma característico desse processo pode ser observado na figura 9a e figura 9b, com crescimento assimétrico das folhas (curvatura para baixo), dando a impressão de folhas caídas, diferentemente da murcha, pois a epinastia não envolve a perda da pressão de turgor nas células.

Com a permanência do excesso hídrico no solo, a permeabilidade das raízes é ainda mais reduzida, aumentando a resistência da absorção da água, causada pela respiração anaeróbica. Apesar da diferença de vapor de água entre as células e a massa atmosférica externa não ser alta, as reduções drásticas da permeabilidade das raízes ocasionam também o fechamento estomático e murchamento das folhas, devido à queda do potencial da água na parte aérea da planta (BRADFORD & YANG, 1981; TAIZ, et al., 2017). A comunicação das raízes para a parte aérea acarretando o fechamento estomático na planta é devido a restritiva condutância hidráulica nas raízes causada pelo excesso hídrico, sendo que, essa comunicação na parte aérea é transferida das raízes para a folha via xilema através de um sinal hidráulico e/ou químico de natureza desconhecida (TAIZ, et al., 2017).

À medida que a água se torna menos disponível devido às consequências causadas pelo excesso hídrico nas raízes, a capacidade de a planta manter suas atividades fisiológica é prejudicada, com sintomas na planta semelhante aos sintomas do déficit hídrico. Para manter a atividade fisiológica, a planta gasta energia acumulando solutos nas células para sustentar a pressão de turgor, realocando fotoassimilados para o crescimento de órgãos não fotossintéticos e, devido ao aumento da síntese de etileno (1-aminociclopropano-1 ácido carboxílico) na parte aérea, ocasiona morte celular e senescência prematura dos órgãos (Figura 9d) (TAIZ et al., 2017). Investigações realizadas por Pires et al. (2002), Dutra et al. (2012), Aldana et al. (2014)

e Baracald et al. (2014) relatam que plantas sob excesso hídrico também apresentaram redução no crescimento de folhas, caules e raízes, epinastia, senescência, abscisão foliar e morte das raízes.

#### 4.2. RESPOSTA FISIOLÓGICA E MORFOLÓGICA DAS PLANTAS DE MANDIOCA SOB EXCESSO HÍDRICO EM NÍVEL DE LAVOURA

Não houve interação entre o manejo realizado (com e sem camalhão) e as horas de excesso hídrico impostas (Tabela 1). Entretanto, entre os níveis do fator A houve diferença significativa para todas as variáveis analisadas.

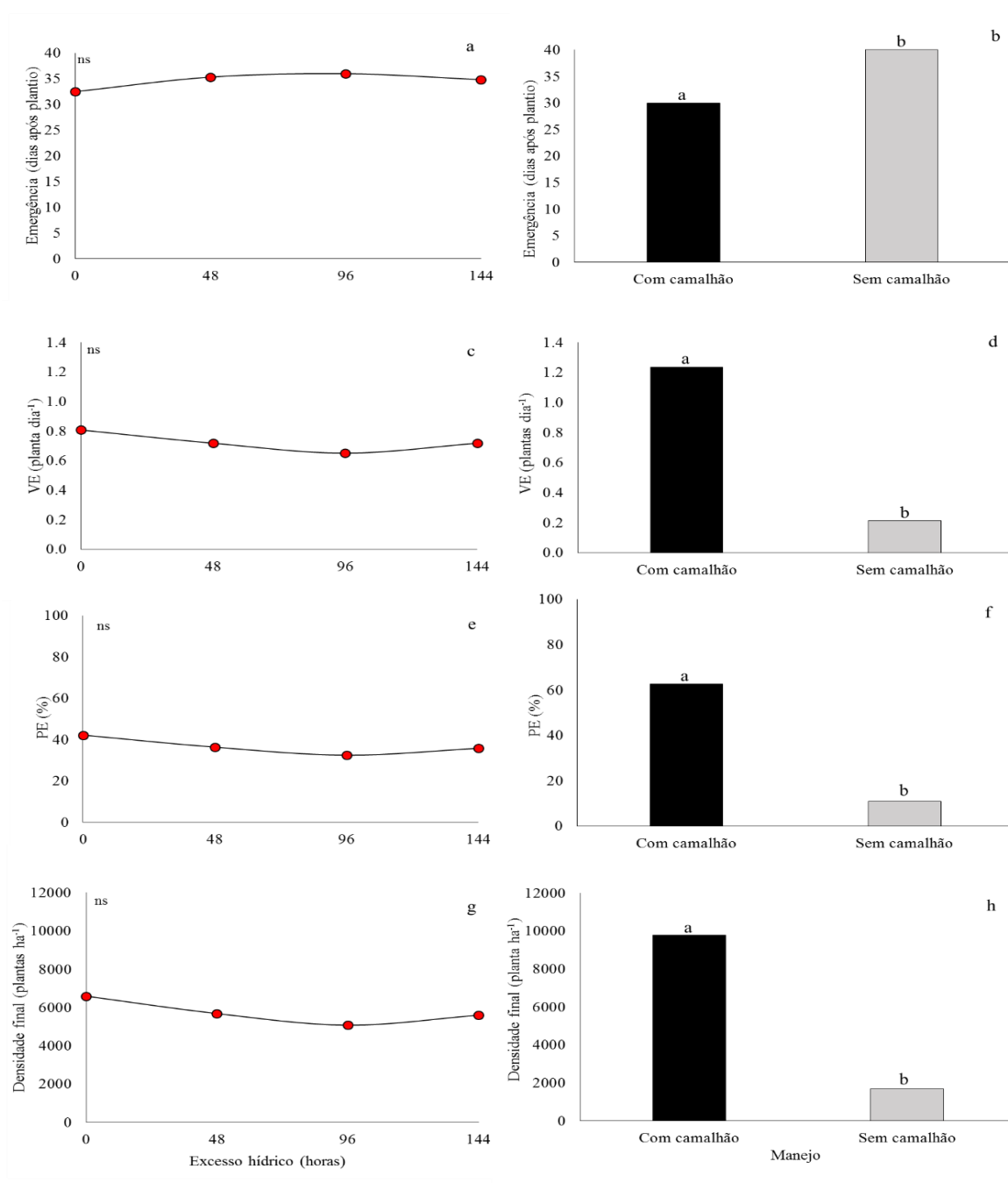
Tabela 1. Quadrado médio da análise de variância para as variáveis: emergência (EM), velocidade de emergência (VE), porcentagem de estabelecimento (PE) e densidade final (DF) das plantas de mandioca em função das fontes de variação.

Fontes de variação	Quadrado médio			
	EM	VE	PE	DF
BLOCO	61.54ns	6.28*	144.56 ns	3544648.66 ns
A	560.66**	0.93*	16102.89**	392316548.16 **
B	13.88 ns	6.28 ns	97.95 ns	2450097.00 ns
A x B	2,11 ns	0.04 ns	118.01 ns	2828235.38 ns
Coefficiente de variação (%)	12.18	22.64	25.83	26.05
Média geral	34.66	0.72	36.70	5744.16

A = manejo (com e sem camalhão); B = Excesso hídrico em horas; A x B = interação entre o manejo e o excesso hídrico. \*\*Significativo a 1% de probabilidade e \*Significativo a 5% de probabilidade de erro no teste F. ns = não significativo.

De acordo com a comparação de médias, verifica-se que para as variáveis EM, VE, PE, DF, o manejo com camalhão é o mais indicado, onde o manejo sem camalhões não apresentou plantas suficientes para prosseguir com as avaliações do NF, IAF, MSF, MSH e MSR (Figura 10). Como já discutido neste estudo, possivelmente a emergência das plantas foi comprometida devido à falta de O<sub>2</sub> no solo devido ao excesso hídrico. O uso de camalhões em solos hidromórficos auxilia na drenagem superficial da água, reduz o tempo que o solo fica saturado, promovendo um ambiente de maior aeração para as raízes (SILVA et al., 2007; FIORIN et al., 2009; ZALUSKI & ANTONELLI, 2014; SARTORI et al., 2015; FARACO et al., 2016), viabilizando o cultivo da mandioca.

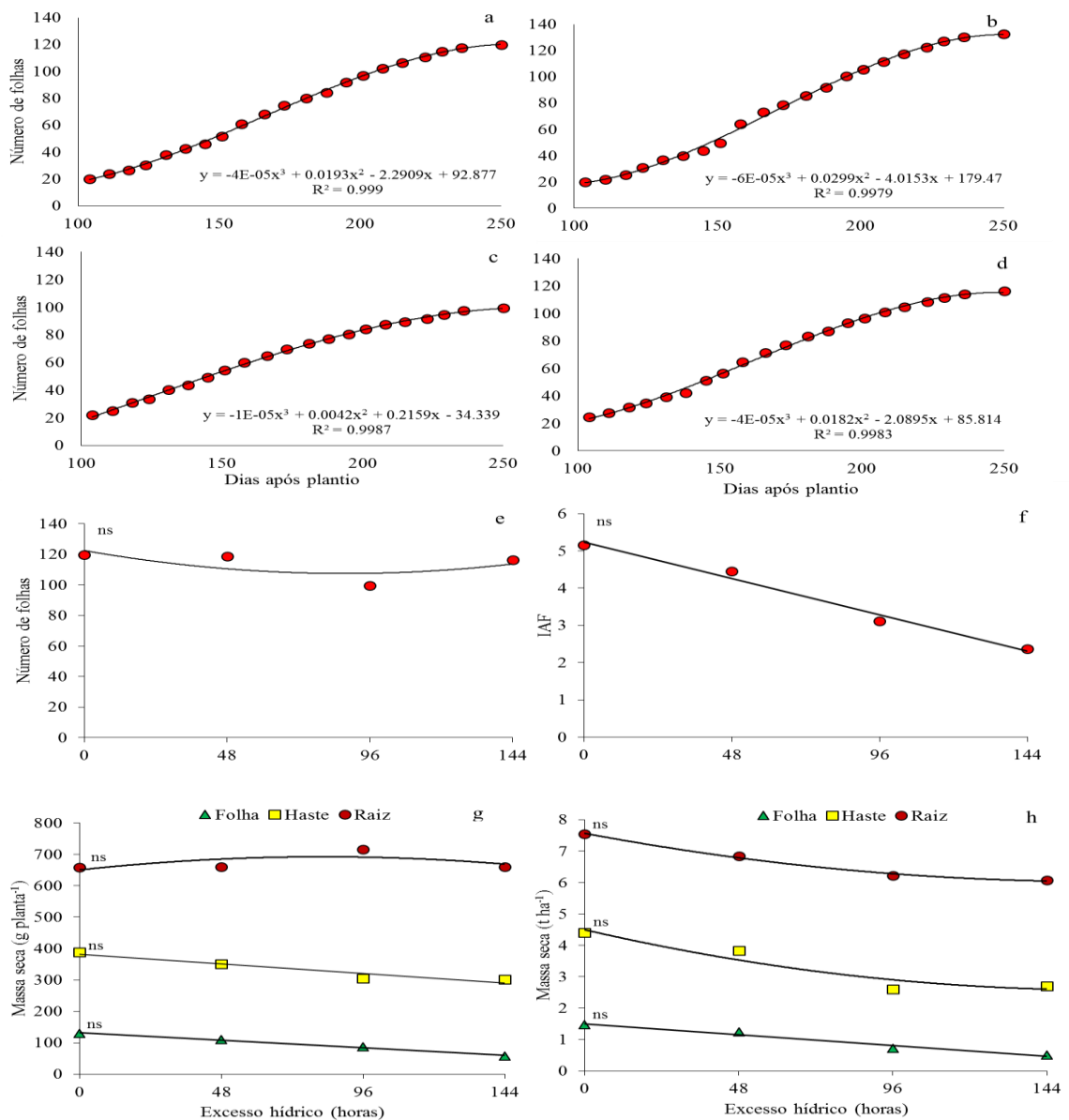
Figura 10. Regressão (a, c, e, g) e comparação de médias (b, d, f, h) da emergência (a, b), velocidade de emergência (c, d), porcentagem de emergência (e, f) e da densidade final (g, h) de plantas de mandioca no manejo com e sem camalhão submetidas a horas de excesso hídrico. Valores médios (b, d, f, h) seguidos pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste t de Student a ( $p < 0,05$ ).



A utilização dos camalhões para o cultivo de mandioca nesse estudo, proporcionou cerca de 60% da emergência e estabelecimento das plantas. Por outro lado, no manejo sem camalhões,

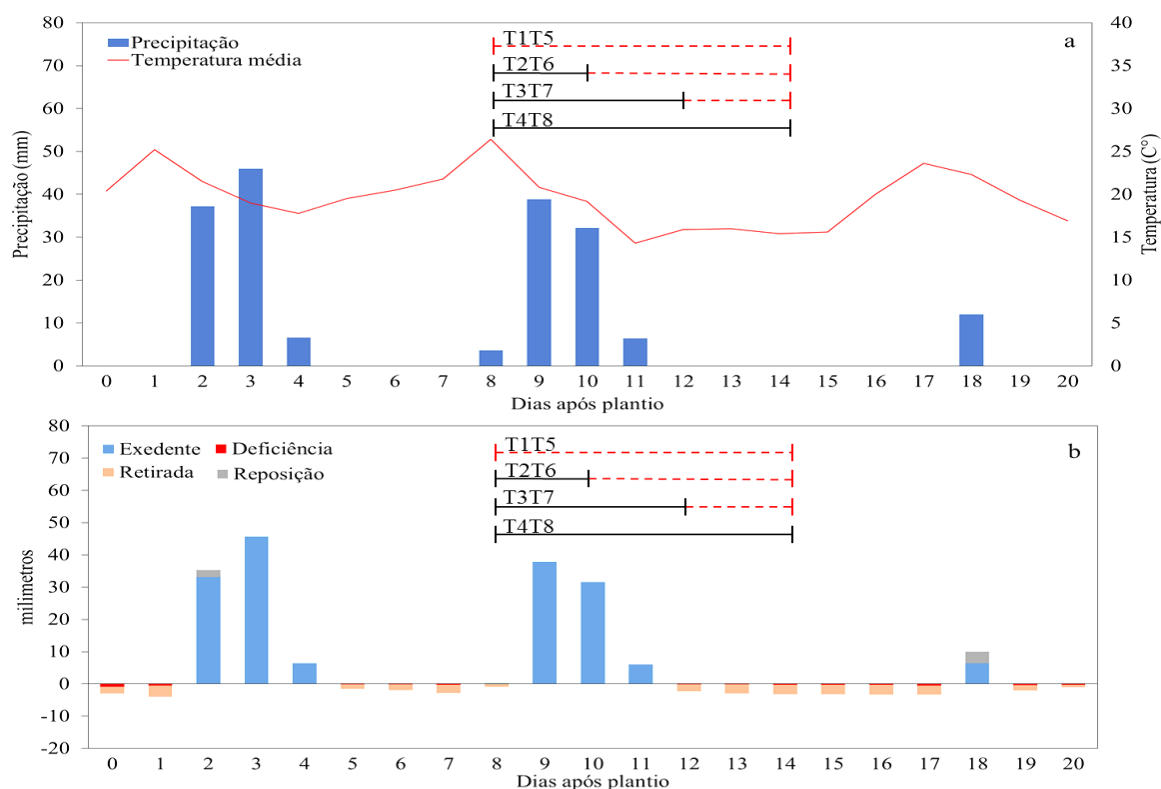
a emergência e estabelecimento das plantas foram aproximadamente de 10% (Figura 10h). Após a retirada do excesso hídrico, as plantas de mandioca que emergiram e se estabeleceram, apresentaram evolução normal do crescimento (Figura 11).

Figura 11. Evolução do número de folhas (a, b, c, d) de plantas de mandioca submetidas a zero horas de excesso hídrico (a), 48 horas de excesso hídrico (b), 96 horas de excesso hídrico (c) e 144 horas de excesso hídrico (d). Regressão do número de folhas (e), índice de área foliar (f), massa seca de folha, haste e raiz (g, h) aos 250 dias após plantio, no manejo com camalhão submetidas a horas de excesso hídrico. O manejo sem camalhões não apresentou plantas suficientes para avaliações destas variáveis.



Ao realizar a análise da variância, as variáveis NF, IAF, MSF, MSH e MSR não apresentaram diferença significativa com os períodos de excesso hídrico imposto. Isso pode ser explicado pela ocorrência de precipitações e excedente hídrico não desejáveis, que ocorreram na fase de plantio a pré-emergência (Figura 12), principalmente sobre os tratamentos de 0 e 48 horas de excesso hídrico (Figura 13).

Figura 12. Precipitação e temperatura média (a), balanço hídrico diário (b) durante a fase de plantio à pré-emergência do experimento a campo. O excesso hídrico foi imposto aos 8 dias após plantio. A barra trastejada vermelha indica o período que o tratamento não poderia sofrer excesso hídrico e a barra sólida preta indica o período que o excesso hídrico foi submetido nos tratamentos. T1, T2, T3 e T4 são os tratamentos em camalhão submetidos a 0, 46, 96 e 144 horas de excesso hídrico respectivamente. T5, T6, T7 e T8 são os tratamentos sem camalhão submetidos a 0, 46, 96 e 144 horas de excesso hídrico respectivamente (a, b).

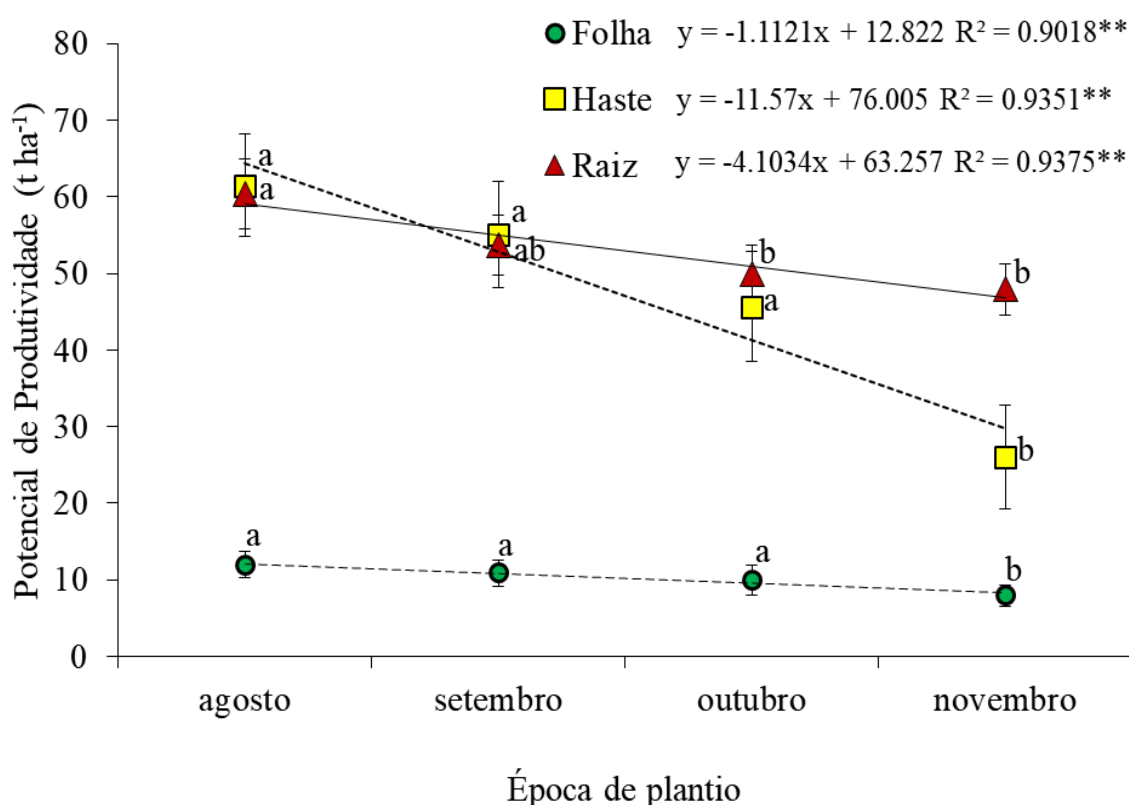


#### 4.3. ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO

O potencial de produtividade (PP) variou de 7,9 a 11,9 t ha<sup>-1</sup> para folha, 26,1 a 61,5 t ha<sup>-1</sup> para haste e 47,9 a 60,4 t ha<sup>-1</sup> para raiz, para plantios variando de agosto a novembro,

considerando o período entre 2004 e 2018 (Figura 13). Os valores que apresentaram diferença estatística dos fatores foram para folha, haste e raiz, ocorrendo um decréscimo do potencial produtivo à medida que se atrasa o plantio (Figura 14).

Figura 13. Gráfico de regressão com desvio padrão do potencial de produtividade da parte aérea e raiz em relação a época de plantio. Valores médios simulados através do modelo Simanihot nos últimos 15 anos. \*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ns=não significativo. <sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra minúscula em folha, haste e raiz não diferem entre si pelo teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ).



A época de plantio que melhor expressa a produção de folhas é nos meses de agosto, setembro e outubro, sendo que essas estruturas são responsáveis pelo processo da fotossíntese, garantindo fotoassimilados, que são utilizados como fonte de energia para o desenvolvimento e crescimento das plantas. As hastes, também chamadas de “ramas” após seu corte, são de extrema importância para safra futura, pois são os propágulos vegetativos denominados de “estacas” ou “manivas” para o plantio. A idade e sanidade da haste, assim como o comprimento e diâmetro, influenciam na qualidade destas “manivas”, sendo que as maiores porcentagens de brotação, que resultaram em máxima produção de raízes, são obtidas com “ramas” ou parte de

hastes mais velhas e de maior diâmetro, provenientes da base e/ou do meio da planta (CÂMARA & GODOY, 1998). Para produção de haste, verifica-se uma penalização do potencial produtivo de cerca de 12 t ha<sup>-1</sup> a cada mês de atraso a partir de agosto, ressaltando ainda que plantios no mês de novembro são menos indicados para produção de haste, tendo em vista a baixa produtividade média histórica (Figura 13).

As raízes de mandioca possuem alto valor energético, sendo a parte da planta com maior valor comercial no mercado, podendo-se obter inúmeros derivados (TAGLIAPIETRA et al., 2019) e, quanto maior for a produção de raízes na propriedade, maior será a lucratividade do produtor. O PP de raiz para Santa Maria, o qual variou de 47,9 a 60,4 t ha<sup>-1</sup> (Figura 13), se assemelha a potenciais produtivos encontrados na África Oriental, variando de 50 a 60 t ha<sup>-1</sup> (OBIERO, 2004; NTAWURUHUGA et al., 2006). Para o Rio Grande do Sul, Visses et al. (2018) encontraram potencial produtivo de 48,3 t ha<sup>-1</sup> utilizando o modelo de simulação “*Agroecological Zone Crop*” da FAO, modelo este baseado em relações estatísticas.

O PP de raiz seguiu a mesma tendência das hastes, apresentando um decréscimo à medida que se atrasa o plantio. Conforme a regressão linear, o PP de raiz é penalizado cerca de 4 t ha<sup>-1</sup> a cada mês de atraso ajustada na (Figura 13). No entanto, para obter altas produtividades, os meses indicados para plantio são agosto e setembro, porém, podem ocorrer baixas temperaturas do ar (<16°C) durante a emergência das plantas. É indispensável mencionar que a cultura da mandioca é sensível a temperatura e ao fotoperíodo, alterando a produtividade de raízes das plantas. À medida que a temperatura aumenta e o fotoperíodo começa se alongar ao longo do ciclo da cultura, diminui a proporção de matéria seca acumulada nas raízes (ALVES, 2006), reafirmando que plantios em agosto e setembro, apesar do maior risco de baixas temperaturas e altas precipitações, favorece a expressão de maiores produtividades da cultura.

Deve-se tomar cuidado em plantios com temperaturas abaixo de 16°C, pois atrasam a brotação das manivas, reduzindo o peso seco das raízes e a taxa de crescimento foliar, ao passo que, temperaturas do ar acima de 37 °C inibem a brotação (ALVES, 2002; ALVES, 2006). Outro fator importante a considerar para não mascarar os resultados, é que a data de colheita foi fixada no dia 15/06 do ano seguinte ao plantio, devido à região de estudo apresentar risco de temperaturas abaixo de 3°C a partir da segunda quinzena de junho. A mandioca por ser uma cultura perene quanto maior for seu tempo no campo, e em condições favoráveis, maior será sua produtividade de parte aérea e raiz (SAGRILO, et al., 2002; ALVES, 2006). Os resultados obtidos neste estudo através das simulações, aliados a literatura citada, corroboram com a tomada de decisão para a época de plantio na produção de folhas, hastes e raízes para próxima

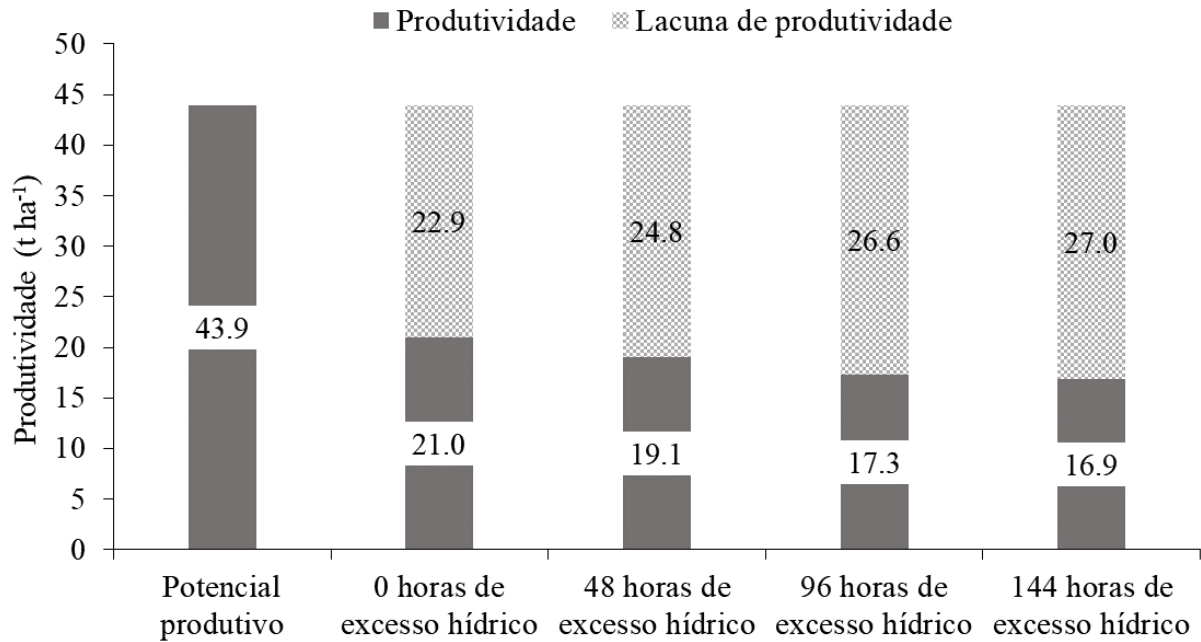


safra, mostrando a importância em realizar plantios na época adequada, quando se busca ótima qualidade de ramas e altas produtividades.

Entretanto, plantios nos meses de agosto e setembro no Rio Grande do Sul, podem se tornar um problema para a emergência e estabelecimento da cultura, pois, de acordo com o histórico do balanço hídrico climatológico para a região, esses meses apresentam excedentes hídricos, devido à baixa demanda evaporativa (anexo 1). A busca pelas altas produtividades ressalta a importância de conhecer o comportamento da cultura frente ao excesso hídrico, necessitando estratégias no manejo para o cultivo. Este estudo também é válido para as principais regiões produtoras do país, como Pará, Paraná e São Paulo, que são líderes no cultivo de mandioca, e também apresentam excedentes hídrico nos principais meses de plantio (anexo 1).

Estudos de lacunas de produtividade permitem identificar os principais fatores que limitam o aumento da produtividade, direcionando novas linhas de pesquisa, além de aprimorar as atuais práticas de manejo (VAN ITTERSUM et al., 2013). Para conhecer a lacuna de produtividade devido ao efeito do excesso hídrico em nível de campo, foi necessário conhecer o potencial de produtividade da cultura da mandioca na safra 2018/2019 e relacioná-lo com a produtividade média de cada tratamento. De acordo com a figura 14, o potencial de produtividade para Santa Maria na safra 2018/2019 foi de 43,9 t ha<sup>-1</sup>, e o maior dano causado pelo excesso hídrico imposto na fase do plantio à pré-emergência no experimento a campo acarretou uma lacuna de 27 t ha<sup>-1</sup>. Essas perdas, acima de 50% na produtividade, estão diretamente relacionadas com o menor número de plantas emergidas e estabelecidas na área. Vale ressaltar que, como mencionado anteriormente o tratamento com 0 e 48 horas de excesso hídrico ocorreram precipitações e excedente hídrico não desejáveis no período testado (Figura 13), explicando as produtividades semelhantes aos demais tratamentos. Entretanto, as produtividades encontradas para o período de 0, 48, 96 e 144 horas de excesso hídrico (Figura 14) estão próximas das produtividades médias 15 e 17 t ha<sup>-1</sup>, no Brasil e Rio Grande do Sul, respectivamente (IBGE, 2020).

Figura 14. Potencial produtivo simulado para o mês de plantio em setembro na safra 2018/2019, produtividade e lacuna de produtividade dos tratamentos submetidos a horas de excesso hídrico no manejo sobre camalhões.



O presente estudo possibilitou gerar conhecimento do quanto o excesso hídrico pode ser prejudicial à cultura da mandioca, através de uma melhor compreensão da interação solo, planta e atmosfera, em busca de uma produção mais eficiente e sustentável. Os resultados auxiliarão os técnicos e agricultores na tomada de decisão quanto à escolha do manejo mais favorável, de acordo com a previsão climática para a safra corrente. Além disso, o estudo permitiu visualizar o impacto na produtividade de mandioca em anos com anomalias climáticas, fundamentando a tomada de decisão quanto ao investimento econômico na lavoura, dependendo do ano agrícola correspondente.

## 5. CONCLUSÃO

A partir de 24 horas de permanência do excesso hídrico na fase plantio à pré-emergência, cerca de 20% das plantas de mandioca não emergiram, sendo que, a partir de 96 horas, a emergência das plantas não ocorreu. Na fase de início do desenvolvimento da mandioca, as plantas mostraram uma redução significativa no crescimento após as primeiras 24 horas de excesso hídrico, porém é após as 96 horas, e principalmente as 120 horas de excesso hídrico que causaram os danos mais severos na cultura da mandioca, apresentando senescência prematura dos órgãos da planta.

A campo, o uso de camalhões propiciou emergência cerca de 60%, sendo a prática de manejo que reduziu o impacto do excesso hídrico. O não uso de camalhão acarretou em perda de 90% das plantas. O potencial de produtividade encontrado para o período 2004-2018 foi de 11,9 t ha<sup>-1</sup> de folha, 61,5 t ha<sup>-1</sup> de haste e 60,4 t ha<sup>-1</sup> de raiz, sendo que a época de plantio que resulta em altas produtividades é agosto e setembro. Para a safra 2018/2019, o potencial de produtividade para Santa Maria foi de 43,9 t ha<sup>-1</sup> e a maior lacuna de produtividade encontrada foi de 27 t ha<sup>-1</sup>.

## REFERÊNCIAS

- ALDANA, F., GARCÍA, P. N., & FISCHER, G. Effect of waterlogging stress on the growth, development and symptomatology of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) plants. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. vol.38 no.149 Bogotá Oct./Dec. 2014.
- ALVARES, C.A.; STAPE J.L.; SENTELHAS, P.C.; JOSE´ LEONARDO DE MORAES GONCALVES, J.L.M and SPAROVEK G. Kooppen's climate classification map for Brazil. 13400-970 Piracicaba – SP, Pádua Dias Avenue 11, Brazil. 2013. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507
- ALVES, A. A. C. Cassava botany and physiology. In: Hillocks, R. J.; Thresh, J. M.; Bellotti and Utilization. Oxon, UK: CABI Publishing, p 67-89. 2002.
- ALVES, A. A. C. Fisiologia da mandioca. In: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura Tropical. Aspectos socioeconômicos e agronômicos da mandioca. Cruz das Almas, BA: EMBRAPA, Cap.7, p.138-169. 2006.
- AMSTRONG, E.; BRÄNDLE, R.; JACKSON, M. B. Mechanisms of flood tolerance in plants. *Acta Botanica Neerlandica*, Oxford, v. 43, n. 4, p. 307-358. 1994. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1994.tb00756.x>
- BAKER, GR, FUKAI, S, & WILSON, GL. The response of cassava to water deficits at various stages of growth in the subtropics. *Australian Journal of Agricultural Research*, 40 (3), 517. 1989. doi:10.1071/ar9890517
- BARACALD, A., CARVAJAL, R., ROMERO. A. P., PRIETO, A. M., GARCÍA, F. J., FISCHER, G., e MIRANDA, D. El anegamiento afecta el crecimiento y producción de biomasa en tomate chonto (*Solanum lycopersicum* L.), cultivado bajo sombrero. *rev.colomb.cienc.hortic*. vol. 8 no.1 Bogotá Jan./June, 2014.
- BERLATO, M. A. et al. Associação entre El Niño Oscilação Sul ea Produtividade do Milho no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*.Brasília: n. 5, v. 40, p. 423-432, maio 2005.
- BRADFORD, K.J. & YANG, S. F. Physiological responses of plants to waterlogging. *HortScience*, v.16, n.1, p.25-30.1981.
- CÂMARA, G. M. S., GODOY, O. P. Desempenho vegetativo produtivo de cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) a partir de manivas com diferentes diâmetros. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.55, n.2.1998.
- CARVALHO, J. E.; FUKUDA, W.M. G. Estrutura da planta e morfologia. Aspectos socioeconômicos e agronômicos da mandioca. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, p. 126-137, 2006.
- COCK J. H., FRANKLIN, D., SANDOVAL G., e JURI P. The ideal cassava plant for maximum yield. *Crop Science*, v. 19, p. 271-279. 1979.

CONNOR, D. J., COCK, J. H., & PARRA, G. E. Response of cassava to water shortage I. Growth and yield. *Field Crops Research*, 4, 181–200. 1981. doi: 10.1016/0378-4290(81)90071-x

COSTA, F. S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de semeadura direta e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.527-535, 2003.

COURS, G. Le Manioc a Madagascar. *Mere. Inst. Sci. Madagascar, Set. B*, 3: 203--400. 1951.

CUSTÓDIO, C. C., MACHADO NETO, N. B., MORENO, E. L. da C., & VUOLO, B. G. Water submersion of bean seeds in the vigour evaluation. *Rev. Bras. Ciênc. Agrár. Recife*, v.4, n.3, p.261-266. 2009.

DAHLMAN, L. Climate Variability: Oceanic Niño Index. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Feb. 11, 2016. Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climatevariability-oceanic-ni%C3%B1o-index>>. Acesso em: 21 Jan. 2018.

DENG, N., GRASSINI, P., YANG, H., HUANG, J., CASSMAN, K. G., e PENG, S. Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China. *Nature Communications* volume 10, Article number: 1725; 2019. DOI.org/10.1038/s41467-019-09447-9

DIAS FILHO, M. B. Características morfofisiológicas associadas à tolerância de gramíneas ao alagamento e ao encharcamento. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental. 2012.

DREW, M. C. Oxygen deficiency and root metabolism injury and acclimation under hypoxia and anoxia. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, Palo Alto, v. 48, n.1, p. 223-225. 1997. doi: 10.1146/annurev.arplant.48.1.223

DREW, M. C.; HE, C.; MORGAN, P. W. Programmed cell death and aerenchyma formation in roots. *Trends in Plant Science*, Kidlington, v. 5, n. 3, p. 123-127. 2000.

DUTRA, C. C., EBER AUGUSTO FERREIRA DO PRADO, E. A. F., PAIM, L. R., e SCALON, S. DE P. Q. *Ciências Agrárias*, Londrina, v. 33, suplemento 1, p. 2657-2668. 2012. doi: 10.5433/1679-0359.2012v33Supl1p2657

FACCO, R., NASCIMENTO, V. B., e WERLANG, M. K. Variabilidade de temperaturas médias mensais em Santa Maria/RS no período de 2004/2011. *REVISTA GEONORTE*, Edição Especial, V.2, N.4, p.1103 – 1110. 2012.

FARACO, J. R. et al. Rendimento de grãos e eficiência do uso de água da cultura do milho em áreas de cultivo de arroz inundado com diferente manejo de irrigação e drenagem. *Irriga, Botucatu*, Edição Especial, *Grandes Culturas*, p. 274-290. 2016.

FIORIN, T. T. et al. Produção de silagem de milho sobre camalhões em solos de várzea. *Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia*, v. 2, n. 1. 2009. Disponível em: <<https://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/article/viewFile/442/602>>. Acesso em: 21 Jan. 2019.

FONTANA, D. C.; BERLATO M. A. Relação entre El Niño Oscilação Sul (ENOS), precipitação e rendimento do milho no Estado do Rio Grande do Sul. Pesquisa Agropecuária Gaúcha, v.2, p.39-46, 1996.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). The global cassava development strategy and implementation plan, v.1, p. 70, 2001.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS- FAOSTAT (2020). Publications. Disponível em: <<http://www.fao.org/home/en/>>. Acesso em: 13 abril. 2020.

GAZOLLA-NETO, A., AUMONDE, T. Z., PEDÓ, T., OLSEN, D., e VILLELA, F. A. Níveis de umidade do solo de várzea e seus efeitos sobre a emergência e crescimento inicial de plântulas de soja. Informativo ABRATES, vol.22, nº.2. 2012.

GRASSINI, P et al. Drivers of spatial and temporal variation in soybean yield and irrigation requirements. Field Crops Research, v. 163, p. 32–46, 2014.

GRASSINI, P., TORRION, J., YANG, H., REES, J., ANDERSEN, D., CASSMAN, K., e SPECHT, J. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. Field Crops Research. 179. 10.1016/j.fcr.2015.04.015. 2015.

GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, v. 25, e.4, p. 537-554, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2020). Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – LSPA. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola>>. Acesso em: 22 jan. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Bdmep - dados históricos. 2019. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>

LACERDA C. F. Relações solo-água-planta em ambientes naturais e agrícolas do nordeste brasileiro. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2007.

L'HEUREUX, M. What is the El Niño – Southern Oscillation (ENSO) in a nutshell? National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2014.

LIESACK, W., SCHNELL, S., e REVSBECH, N. P. Microbiology of flooded rice paddies. FEMS Microbiology Reviews, Oxford, v. 24, n. 5.P. 625-645. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2000.tb00563.x>

MALUF J. R. T.; MATZENAUER R.; MALUF D. E. Zoneamento Agroclimático da Mandioca no Estado do Rio Grande do Sul - Boletim Fepagro. Fepagro, Porto Alegre, 2011.

MARINHO, J. de L., COSTA, D. S., CARVALHO, D. U., CRUZ, M. A., e ZUCARELI, C. Evaluation of vigor and tolerance of sweet corn seeds under hypoxia. *J. Seed Sci.* vol.41 no.2 Londrina Apr./June. 2019. doi.org/10.1590/2317-1545v41n2209568

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. London: Academic Press, 889 p. 1995.

MOTA, F. S. Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre o rendimento do arroz irrigado na região de Pelotas (RS). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 15, n. 2, p. 21-24, 2000.

NTAWURUHUNGA, P., SSEMAKULA, G., OJULONG, H., BUA, A., RAGAMA, P., KANOBE, C., e WHYTE, J. Evaluation of advanced cassava genotypes in Uganda. *Afr. Crop Sci. J.* 14, 15–27. 2006.

OBIERO, H. M. Multiplicação acelerada da mandioca e distribuição de materiais de plantio no oeste do Quênia. Em: Programa de Emergência para Combater o Pandemia do Mosaico da Mandioca na África Oriental e Central. Procedimentos do Quinta Reunião Regional de Partes Interessadas, Bukoba, Tanzânia, 10-12, pp. 15-23. 2004.

PIRES, J. L. F., SOPRANO, E., e CASSOL, B. Adaptações morfofisiológicas da soja em solo inundado. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v. 37, n. 1, p. 41-50, jan. 2002.

ROJAS, C. A. L.; VAN LIER, Q. J.; Alterações físicas e hídricas de um Podzólico em função de sistemas de preparo. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v.5, n.1, p.105-115, 1999.

SAGRILO, E., VIDIGAL-FILHO, P. S., PEQUENO, M. G., SCAPIM, C. A., GONÇALVES-VIDIGAL, M. C., MAIA, R. R., e KVITSCHAL, M. V. Efeito da época de colheita no crescimento vegetativo, na produtividade e na qualidade de raízes de três cultivares de mandioca. *Bragantia* vol.61 no.2 Campinas. 2002. doi.org/10.1590/S0006-87052002000200005

SAIRAM, R. K., KUMUTHA, D., EZHILMATHI, K., DESHMUKH, P. S., e SRIVASTAVA, G. C. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. *Biology Plantarum*, Dordrecht, v. 52, n. 3, p. 401-412. 2008.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho Escuro de Eldorado do Sul (RS). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.19, p.313-319, 1995.

SAMBORANHA, F. K. Modelagem matemática do desenvolvimento foliar em mandioca a campo. 2012. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SANTOS, E. L.; SANTOS, M. F. Evolução das inundações no sul do Brasil: o caso da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe. *Investigaciones Geográficas*, n. 51, p.91-102, 2016.

SARTORI, G. M. S. et al. Rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície em Planossolos. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.50, n.12, p.1139-1149, dez. 2015.

SHIN, D. W. et al. Assessing maize and peanut yield simulation with various seasonal climate data in the Southeastern United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v.49, n. 4, p. 592-603, 2010.

SHIN, D. W. et al. The role of an advanced land model in seasonal dynamical downscaling for crop model application. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 45, n. 5, p. 686-701, 2006.

SILVA M. A. S. S.; MAFRA A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.35, n.3, p.544-552, mai-jun, 2005.

SILVA, C. A. S. et al. Sistema sulco/camalhão para irrigação e drenagem em áreas de várzea. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 4 p. (Comunicado Técnico, 165). 2007. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/745907/1/comunicado165.pdf>>. Acesso em: 20 fev, 2019.

STEFANELLO, L., STEFANELLO, V. F. V., HELING, A. L., HENKEMEIER, N. P., RONCATO, S. C., KUHN, O. J., e STANGARLIN, J. R. Manejo da podridão radicular da mandioca pela combinação de manejo de solo, variedade resistente e controle biológico com *Trichoderma harzianum*. *Revista Raízes e Amidos Tropicais*, v. 13, nº 1, p. 31-45. 2017.

STRECK, E. V., KÄMPF, N., DALMOLIN, R. S. D., KLAMT, E., NASCIMENTO, P. C., SCHNEIDER, P., GIASSON, E., e PINTO L. F. S. Solos do Rio Grande do Sul. 2 ed. Porto Alegre: Emater/RS, 222p. 2008.

STRECK, N. A. et al. Simanihot: um modelo de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade de mandioca. In: 13º Reunião Técnica Estadual da mandioca e 5º Reunião Técnica Estadual da batata-doce, Cerro Largo-RS: Emater-RS, 2015. 55p.

STRECK, N. A., WEISS, A., XUE, Q., & BAENZIGER, S. Incorporating a chronology response into prediction of leaf appearance rate in winter wheat, *Annals of Botany*, v. 92, p. 181-190. 2003.

STRECK, N.A. et al. SimulArroz: um aplicativo para estimar a produtividade de arroz no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO. v. 8, p. 1618-1627. 2013.

SUN, X. et al. A global analysis of the asymmetric effect of ENSO on extreme precipitation. *Journal of Hydrology*, v. 530, p. 51-65, nov. 2015.

TAGLIAPIETRA B. L., ZANON, A. J., SILVA, M. N., ALVES, A. F., FREITAS, C. P. de O., TIRONI, L. F., JIMÉNEZ, M. S. E., CARDOSO, P. S., SANTOS, A. T. L., TONEL, G. P., RODRIGUES, L. B., RICHARDS, N. S. P. dos S., e STRECK, N. A. Mandioca para Alimentação Humana e Animal. 1.ed. Santa Maria. p.35-36. 2019.

TAIZ, L., ZEIGER, E., MOLLER, I.M., e MURPHY, A. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. 6.ed. Porto Alegre: Artmed. 2017.



TIRONI, L. F., STRECK, N. A., GUBIANI, P. I., BENEDETTI R. P., & FREITAS C. P. DE O. SIMANIHOT: A PROCESS-BASED MODEL FOR SIMULATING GROWTH, DEVELOPMENT AND PRODUCTIVITY OF CASSAVA. *Eng. Agríc.* vol.37 no.3 Jaboticabal. 2017. doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n3p471-483/2017

TIRONI, L. F., UHLMANN, L. O., STRECK, N. A., SAMBORANHA, F. K., FREITAS, C. P. de O., e SILVA, M. R. Desempenho de cultivares de mandioca em ambiente subtropical. *Bragantia*, Campinas, v.74, n. 1, p.58-66. 2015.

TIRONI, L. F., ZANON A. J., ALVES, A. F., FREITAS, C. P. de O. F., SANTOS, A. T. L., CARDOSO, P. de S., TONEL, G. P., RODRIGUES, L. B., TAGLIAPIETRA B. L., SILVA, M. N., e STRECK N. A. *Ecofisiologia da Mandioca Visando Altas Produtividades*. 1.ed. Santa Maria: Editora GR, v. 1. 136p. 2019.

UHLMANN, L. O. et al. PhenoGlad: A model for simulating development in *Gladiolus*. *European Journal of Agronomy*, v. 82, p. 33-49, 2017.

VAN ITTERSUM, M. K. CASSMAN, K. G., GRASSINI, P., WOLF, J., TITTONELL, P., e HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance – A review. *Field Crops Research*, v.143, p.4–17. 2013.

VILPOUX, O. Desempenho dos arranjos institucionais e minimização dos custos de transação: transações entre produtores e fecularias de mandioca. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v.49, n. 2, p. 271-294, 2011.

VISSES, F. A.; SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A. B. Yield gap of cassava crop as a measure of food security –an example for the main Brazilian producing regions. *Food Security*, p. 1191-1202. 2018.

ZALUSKI, P., e ANTONELI, V. Variabilidade na Infiltração da Água no Solo em área de Cultivo de Tabaco na Região Centro-Sul do Paraná. *Caderno de Geografia*, Belo Horizonte, v. 24, n. 41. 2014.

ZANON, A. J., STRECK, N. A., & GRASSINI, P. Climate and Management Factors Influence Soybean Yield Potential in a Subtropical Environment. *Published in Agron. J.* 108:1447–1454. 2016. doi:10.2134/agronj2015.0535

## ANEXO

Anexo 1. Balanço hídrico climatológico para Rio grande do Sul – Santa Maria (a), Pará – Belém (b), Paraná – Londrina (c) e São Paulo – Campinas (d). Fonte: adaptado de INMET. A barra sólida vermelha indica a principal época de plantio (EP) de cada região segundo zoneamento de risco climático para cultura da mandioca.

