

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE DOUTORADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CALIBRAÇÃO DO MODELO MANIHOT-CASSAVA COM
VARIEDADES DE MANDIOCA CULTIVADAS NO
RECÔNCAVO DA BAHIA**

Diego Magalhães de Melo

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2022**

**CALIBRAÇÃO DO MODELO MANIHOT-CASSAVA COM
VARIEDADES DE MANDIOCA CULTIVADAS NO RECÔNCAVO DA
BAHIA**

DIEGO MAGALHÃES DE MELO

Engenheiro Agrônomo

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB, 2014

Tese submetida ao Colegiado do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos.

Orientador: Dr. Maurício Antônio Coelho
Filho

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2022**

FICHA CATALOGRÁFICA

M528c	<p>Melo, Diego Magalhães de. Calibração do modelo Manihot-cassava com variedades de mandioca cultivadas no Recôncavo da Bahia._ Cruz das Almas, BA, 2022. 84f.; il.</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Doutorado em Engenharia Agrícola.</p> <p>Orientador: Dr. Maurício Antônio Coelho Filho.</p> <p>1.Mandioca – Cultivo. 2.Mandioca – Recôncavo (BA) – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.</p> <p>CDD: 633.68</p>
-------	---

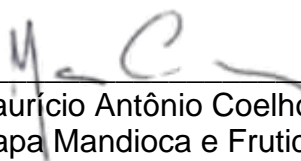
Ficha elaborada pela Biblioteca Universitária de Cruz das Almas - UFRB. Responsável pela Elaboração – Antonio Marcos Sarmiento das Chagas (Bibliotecário - CRB5 / 1615). Os dados para Catalogação foram enviados pelo usuário via formulário eletrônico.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE DOUTORADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CALIBRAÇÃO DO MODELO MANIHOT-CASSAVA COM
VARIEDADES DE MANDIOCA CULTIVADAS NO RECÔNCAVO DA
BAHIA**

Comissão Examinadora da Defesa de Tese
Diego Magalhães de Melo

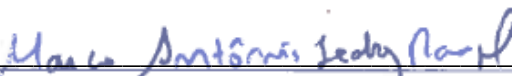
Aprovada em: 28 de fevereiro de 2022



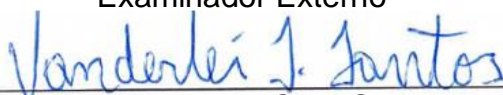
Dr. Maurício Antônio Coelho Filho
Embrapa Mandioca e Fruticultura
Orientador



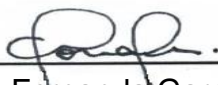
Dra. Patrícia Moreno Cadena
University of Florida
Examinador Externo



Dr. Marco Antônio Sedrez Rangel
Embrapa Mandioca e Fruticultura
Examinador Externo



Dr. Vanderlei da Silva Santos
Embrapa Mandioca e Fruticultura
Examinador Externo



Dra. Cinara Fernanda Garcia Morales
Embrapa Mandioca e Fruticultura
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha família, em especial a meus pais Luiz Soares de Melo Neto e Maria Cristina Magalhães de Melo, a minha esposa Thaís Oliveira Borges de Melo e filho Luiz Henrique Borges de Melo por se converterem, constantemente, em meu incentivo e inspiração para trabalhar e estudar.

Dedico essa pesquisa a todos os mestres que me instruíram, incluindo aqueles que a vida tão gentilmente me cedeu durante minha rotina de estudos e desenvolvimento profissional. Eles são os verdadeiros autores desse trabalho e eu apenas um instrumento de seus incontáveis ensinamentos e exemplos notáveis.

Por fim, dedico esse trabalho aos milhares de estudantes, pesquisadores, professores, analistas, técnicos, assistentes de campo, extensionistas e produtores que bravamente se aventuram no território inóspito da pesquisa brasileira. Que Deus em sua imensurável sabedoria e generosidade nos ampare em sua luz, nos tornando tão resilientes quanto precisamos ser, para que possamos ajudar a tecer o esclarecimento que possibilitará a tão sonhada prosperidade das gerações futuras.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a seus anjos de luz que me ampararam e me guiaram para um caminho reto e bom.

Agradeço aos doutores Maurício Antônio Coelho Filho e Eugênio Ferreira Coelho por me orientarem durante o curso de doutorado acadêmico. Agradeço aos colegas colaboradores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, em seu Centro Nacional de Pesquisa Mandioca e Fruticultura por todo o esforço investido no meu treinamento, suporte nas diversas atividades necessárias ao desenvolvimento da tese. De forma especial, agradeço aos colegas dos setores de ecofisiologia, irrigação e melhoramento genético, da Embrapa Mandioca e Fruticultura, pelas constantes demonstrações de eficiência, profissionalismo e coleguismo.

Agradeço a todos os professores, pesquisadores, colaboradores e colegas do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, da empresa Bahiamido, do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), da Embrapa Arroz e Feijão, da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (USP/Esalq), Universidade Federal de Goiás e Universidade da Flórida, que tiveram participação em minha formação acadêmica, profissional ou que de alguma forma contribuíram com o desenvolvimento dos trabalhos relacionados a tese ou as atividades relacionadas ao curso de doutorado.

Agradeço aos cidadãos e colaboradores da cidade de Cruz das Almas-BA e da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, respectivamente, pela longa acolhida. Após pouco mais de uma década levarei comigo lembranças muito boas, ensinamentos valiosos e muitas histórias para contar.

Agradeço, finalmente, ao povo brasileiro por custear minha formação, por meio de suas instituições de fomento à pesquisa representadas na Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pelas instituições de pesquisa representadas pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) e pela Embrapa, em seu Centro Nacional de Pesquisa em Mandioca e Fruticultura. Espero, sinceramente, que este trabalho esteja à altura do investimento aplicado em minha formação e que este trabalho auxilie outros profissionais em suas atividades de pesquisa e de extensão.

EPÍGRAFE

Persigo uma ilusão que não deixa rastros;
Em um curso de colisão, de futuro incerto;
Não quero naufragar no início dessa rota e
nem sucumbir no meio dessa meta.
Persigo-a, insistente, mas nem lhe vejo o vulto.
Sinto-lhe a presença e a sigo até se esvaír na penumbra;
Reclama-a o meu silêncio, insone e indefeso,
um patético murmúrio, que não me abre portas;
Sigo como uma ave desgarrada que não decide o rumo,
perseguindo uma ilusão, que não me deixa escolha...

(Adaptação de O naufrago, de autoria de Outran Sampaio Borges)

Calibração do modelo MANIHOT-Cassava com variedades de mandioca cultivadas no Recôncavo da Bahia

Resumo: Modelos de simulação de cultivos (MSC) desenvolvidos para cultura da mandioca, como o MANIHOT-Cassava, podem ser aplicados no planejamento agrícola, dando suporte a tomada de decisão e contribuindo para mitigar quebras de produtividade em agrossistemas. No entanto, para que o MSC forneça informações que se aproximem da realidade é necessário calibrar o modelo a partir de dados experimentais que representem a condição de cultivo de interesse. O objetivo do presente trabalho foi calibrar o MANIHOT-Cassava com informações de variedades de mandioca cultivadas em clima tropical úmido e subúmido, no Recôncavo da Bahia. O trabalho foi dividido em duas etapas: i) caracterização das variedades em campo; ii) calibração e avaliação do modelo. A etapa de campo foi realizada a partir de quatro experimentos instalados em Cruz das Almas-BA, entre 2019 e 2020. Nos experimentos foram obtidas informações relacionadas ao desenvolvimento, crescimento e produção das variedades de mandioca. A prática envolvendo o levantamento de dados em campo e sua aplicação no processo de calibração do modelo foi comentada. Durante o processo de calibração, o modelo apresentou índices elevados de precisão e acurácia nas simulações relacionadas ao desempenho das variedades BRS Novo Horizonte e Eucalipto, a exceção foi o índice de área foliar que apresentou maior quantidade de erros entre os resultados simulados e observados, principalmente após os 180 DAP. O modelo também penalizou demasiadamente o desempenho do cultivo quando a oferta hídrica foi mais limitada.

Palavras-chave: DSSAT, *Manihot esculenta* Crantz, Simulações de cultivo, planejamento agrícola

Calibration of the MANIHOT-Cassava model with cassava varieties grown in the Recôncavo da Bahia

Abstract: Crop Simulation Models (CSM) developed for cassava, such as the MANIHOT-Cassava, can be applied in agricultural planning, supporting decision-making and contributing to mitigate productivity losses in agrosystems. However, for the CSM to provide information that approximates reality, it is necessary to calibrate the model based on experimental data representing the cultivation conditions of interest. The objective of the present project was to calibrate the MANIHOT-Cassava with information on cassava varieties grown in humid and sub-humid tropical climates, in the Recôncavo of Bahia. The project was divided in two stages: i) varieties characterization in the field; and ii) model calibration and evaluation. The field stage was carried out with four experiments installed in Cruz das Almas-BA, between 2019 and 2020. The experiments provided information related to the development, growth and production of cassava varieties. The practice involving field data collection and its application in the model calibration process was commented. During the calibration process, the model presented high levels of precision and accuracy in the simulations related to the performance of the BRS Novo Horizonte and Eucalipto varieties, except for the leaf area index (LAI). The LAI presented more errors between the simulated and observed results, mainly after 180 DAP. The model also heavily penalized crop performance when water supply was more limited.

Key words: Agricultural planning, Crop simulations, DSSAT, *Manihot esculenta* Crantz

SUMÁRIO

1.0.	OBJETIVO GERAL.....	1
1.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	1
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.0.1.	ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DA MANDIOCA.....	2
2.0.1.1.	ORIGEM, DOMESTICAÇÃO E IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA.....	2
2.0.1.2.	ASPECTOS BOTÂNICOS, FENOLÓGICOS E ECOFISIOLÓGICOS DA MANDIOCA.....	4
2.0.1.2.1.	BOTÂNICA.....	4
2.0.1.2.2.	FENOLOGIA.....	7
2.0.1.2.3.	ECOFISIOLOGIA.....	9
2.0.1.3.	DIFERENÇAS DE PRODUTIVIDADE DA MANDIOCA.....	10
2.0.2.	MODELOS DE SIMULAÇÃO DE CULTURAS.....	11
2.0.2.1.	SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO: DSSAT.....	12
2.0.2.2.	MODELOS DE SIMULAÇÃO DE CULTIVO DA MANDIOCA DISPONÍVEIS NO DSSAT.....	14
2.0.2.2.1.	CALIBRAÇÃO DO MODELO MANIHOT-CASSAVA.....	15
2.1.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
3.	CARACTERIZAÇÃO DE VARIEDADES DE MANDIOCA PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO MANIHOT-CASSAVA: COLETA E APLICAÇÃO DOS DADOS.....	21
4.	CALIBRAÇÃO DO MODELO MANIHOT-CASSAVA COM VARIEDADES DE MANDIOCA CULTIVADAS EM CLIMA TROPICAL SUBÚMIDO.....	54

1.0. OBJETIVO GERAL

Calibrar o modelo de simulação de cultivo MANIHOT-Cassava a partir de informações de variedades de mandioca cultivadas em clima tropical úmido ou subúmido, no Recôncavo Baiano.

1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obter informações sobre o crescimento, desenvolvimento e produção de variedades de mandioca em campo, visando o processo de calibração do modelo MANIHOT-Cassava, no software Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT);
2. Comentar o processo de aquisição de dados e sua aplicação no processo de calibração do modelo;
3. Calibrar o modelo de modo a representar as características das variedades estudadas e verificar se o processo de calibração foi bem-sucedido.

1.2. JUSTIFICATIVA

No Recôncavo Baiano, assim como outras regiões produtoras do Estado da Bahia, o cultivo da mandioca é realizado tanto de forma tradicional, com baixo aporte tecnológico, como de forma mais técnica, com plantio de variedades recomendadas por programas de melhoramento genético, de acordo com o zoneamento de risco climático, com aplicação de técnicas de manejo baseadas em sistemas de produção recomendados para região, por órgãos de pesquisa e extensão rural. Independente do cenário de cultivo, é importante conhecer o agrossistema para avaliar as práticas culturais e adotar estratégias mínimas de convivência com o ambiente, visando maximizar a rentabilidade do produtor.

Uma alternativa para avaliar o potencial produtivo no agrossistema e os fatores associados a quebra de produtividade é a aplicação de modelos de simulação de cultivos (MSC). Os modelos são ferramentas versáteis, que podem ser usadas para facilitar a tomada de decisão pelo gestor agrícola. Uma das opções de MSC disponíveis para cultura da mandioca é o MANIHOT-Cassava, desenvolvido para funcionar como um módulo de cultura no Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). O software

funciona integrando processos relacionados ao desenvolvimento, crescimento e produção das plantas a partir de módulos primários que são abastecidos por dados referentes ao clima, ao solo, ao manejo e às especificidades genéticas das variedades de mandioca.

A partir do conjunto de dados fornecidos pelas simulações, é possível prever tendências de produtividade em diferentes cenários de cultivo. As informações podem ser utilizadas para antecipar quebras de produtividade relacionadas à interação genótipo x ambiente x manejo e, com isso, aperfeiçoar o sistema de cultivo, mediante adoção de estratégias para mitigar as perdas e otimizar o desempenho do agrossistema.

Contudo, o MSC fornece apenas tendências gerais da cultura no ambiente estudado. Para que o modelo apresente sensibilidade a uma dada condição de cultivo, como a variação de potencial produtivo de variedades de mandioca cultivadas, é necessário calibrar o modelo com informações que permitam caracterizar as diferenças entre as variedades cultivadas, em condições próximas às praticadas na região produtora de interesse.

Em função dessa necessidade, o presente trabalho foi desenvolvido visando a calibração do modelo com informações de variedades de mandioca cultivadas, em clima tropical úmido ou subúmido, na região do Recôncavo Baiano.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.0.1. ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DA MANDIOCA

2.0.1.1. ORIGEM, DOMESTICAÇÃO E IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma dicotiledônea da família botânica das Euforbiáceae. A característica marcante dessa família botânica e do gênero *Manihot* são o desenvolvimento de vasos laticíferos e a produção de glicosídeos cianogênicos, respectivamente (SOUZA & LORENZI, 2012). A literatura não define com exatidão o centro de origem da espécie cultivada *M. esculenta*, entretanto, em função do grande número de espécies do gênero no Brasil, acredita-se que o centro de origem primário da espécie tenha sido a América do Sul (TAFUR, 2002; EL-SHAKAWY, 2004; LARA et al., 2008).

A domesticação da cultura se confunde com o desenvolvimento das antigas civilizações ameríndias, no centro-sul dos trópicos americanos, cerca de 4.000 a 8.000 anos atrás. Sua disseminação para África e Ásia ocorreu durante a época das grandes navegações, no século XVI, inicialmente por meio de colonizadores portugueses e em seguida por meio de mercadores de diferentes nações (EL-SHAKAWY, 2004; SILVA & MURRIETA, 2014).

Comercialmente, as variedades cultivadas de mandioca são divididas em função da concentração de compostos cianogênicos em seus tecidos, em mandioca doce (mansa) e amarga (brava). As raízes variedades doces podem ser consumidas frescas ou cozidas. Entretanto, as raízes das variedades amargas precisam ser processadas de forma a reduzir a concentração de compostos cianogênicos a níveis inofensivos à saúde humana e animal (FALADE & AKINGBALA, 2010; UCHECHUKWU-AGUA et al., 2015).

O cultivo da mandioca representa uma das fontes de carboidrato mais importantes para a nutrição da humanidade e desempenha um papel estratégico na segurança alimentar e economia de países na América Latina, África e Ásia (LEBOT, 2009; UCHECHUKWU-AGUA et al., 2015; PARMAR et al., 2017).

O principal produto da mandiocultura são as raízes de reserva, que são ricas em amido, vitaminas e minerais. As raízes são usadas na alimentação humana e animal. São insumos básicos para uma diversidade de aplicações industriais nos ramos alimentício, farmacêutico, têxtil, de fibras, biopolímeros, adesivos, etanol e destilados etc (FALADE & AKINGBALA, 2010; EDHIREJ et al., 2015; UCHECHUKWU-AGUA et al., 2015; YERHOYWO et al., 2015; PARMAR et al., 2017). Nas últimas décadas, algumas indústrias também têm aproveitado os resíduos do processamento da mandioca para produção de gás, biocombustíveis, energia elétrica e biofertilizantes (EDHIREJ et al., 2015; SÁNCHEZ et al., 2017).

A parte aérea da mandioca também apresenta utilidade para o homem. As folhas são ricas em proteínas, vitaminas (B1, B2, C, carotenóides) e minerais (Ca, Mg e K) e podem ser utilizadas na alimentação humana e animal, inclusive como complemento nutricional às raízes que apresentam baixo teor proteico (PARMAR et al., 2017). O caule é usado, comumente, como fonte de material propagativo da cultura. Entretanto, pode ser fornecido com as folhas no arraçoamento animal, ser utilizado como uma fonte de amido complementar (xilema), aproveitado para extração de fibras e/ou produção de bioenergia (YERHOYWO et al., 2015; SILVA et al., 2018).

No Brasil, o cultivo da mandioca é uma das atividades agrícolas mais tradicionais. Sua importância vem sendo registrada desde a época da colonização portuguesa (SILVA & MURIETTA, 2014). Estatísticas publicadas no ano de 2017, apresentaram o Brasil como o quinto maior produtor do mundial de mandioca, com produção próxima a 19 milhões de toneladas e valor da produção próximo a 11 bilhões de reais (FAOSTAT, 2017a). Em 2018, a cultura foi avaliada como a sexta mais importante, em termos de valor econômico para o País, ficando atrás das culturas da soja, cana-de-açúcar, milho, café e algodão, respectivamente (IBGE, 2019a).

Na região Nordeste do Brasil, a mandioca apresenta, historicamente, grande importância socioeconômica, sendo cultivada, comumente, em todo o território nordestino para abastecimento do mercado e, também, para subsistência da população (Santos et al., 2015; IBGE, 2019a). Neste contexto, a região nordestina da Zona da Mata possui clima favorável ao desenvolvimento da mandiocultura, com boa oferta de chuvas, mesmo em anos considerados secos, de acordo com os dados meteorológicos apresentados por Pereira et al. (2020).

A Zona da Mata está localizada no litoral nordestino e se estende do norte do Estado do Rio Grande do Norte até o sul do Estado da Bahia. Encontra-se situada, majoritariamente, no bioma mata atlântica e possui classificação climática tropical úmida ou subúmida (Alvares et al., 2013; Pereira et al., 2020). A Região é limitada geograficamente pelo Agreste, que é um ambiente de transição entre o bioma mata atlântica e a caatinga, e concentra a maioria das capitais nordestinas (Pereira et al., 2020).

No Estado da Bahia, as regiões produtoras localizadas na Zona da Mata, como o território identidade do Recôncavo Baiano, têm na mandiocultura uma das principais atividades agrícolas. A Região concentra historicamente produtores de mandioca de mesa e indústrias de processamento de raízes e, mais recentemente, cooperativas de mandiocultores que tem interesse em adotar técnicas de cultivo mais eficientes e cultivar variedades de mandioca de maior potencial produtivo, a exemplo da BRS Novo Horizonte, que apresentou produtividade média de raízes de reserva 40% superior a algumas das variedades cultivadas tradicionalmente no Recôncavo Baiano (Santos et al., 2015; Oliveira et al., 2020).

2.0.1.2. ASPECTOS BOTÂNICOS, FENOLÓGICOS E ECOFISIOLÓGICOS DA MANDIOCA

2.0.1.2.1. BOTÂNICA

O conhecimento da morfologia, das fases de desenvolvimento e da ecofisiologia da mandioca são essenciais para identificar práticas agronômicas adequadas para melhorar o desempenho agronômico das plantas nos ambientes em que são cultivadas e entender as diferenças de produtividade proporcionadas pela interação genótipo x ambiente x manejo.

Em termos fisionômicos há muita diversidade entre as variedades de mandioca, sendo comum a ocorrência de diferenças morfoagronômicas (FUKUDA et al., 1997; FUKUDA & GUEVARA, 1998). Visualmente a mandioca é uma planta arbustiva lenhosa,

que pode alcançar entre 2 e 5 metros de altura (CEBALLOS & CRUZ, 2002). Ceballos & Cruz (2002) e Carvalho & Fukuda (2006) detalharam e descreveram a morfologia e o desenvolvimento dos principais órgãos da mandioca, enquanto Mendonza (2013) realizou uma descrição botânica da espécie. Um resumo da descrição realizada por esses autores é apresentado abaixo:

- Sistema radicular

A mandioca apresenta raízes cilíndricas, cônicas ou cônico-cilíndricas, pedúnculos ausentes, curtos 1–5 cm, medianos 6–15 cm ou longo >20 cm, constrições presentes ou não; epiderme marrom, marrom claro ou escuro; polpa de coloração variando em tons de branco, amarelo, laranja, rosa, roxo, etc. O padrão de desenvolvimento radicular varia com o método de propagação. Quando a planta é propagada sexuadamente, desenvolve raiz pivotante e a partir dela se desenvolvem raízes secundárias. Nesse tipo de propagação, a raiz pivotante é a primeira a se converter em um órgão de reserva, seguida por algumas das raízes secundárias. Quando a planta é propagada de forma assexuada, por meio de pedaços do caule contendo gemas axilares (estacas), não há desenvolvimento de raiz pivotante. Nesse caso, a partir das gemas axilares, se desenvolvem raízes adventícias, que logo se convertem em raízes fibrosas. Parte dessas raízes se convertem em raízes de reserva. Os órgãos de reserva apresentam crescimento primário reduzido e maior crescimento secundário, quando comparado às raízes fibrosas, com maior diferenciação de tecido parenquimal, rico em grânulos de amido. As raízes de reserva tendem a localizar-se mais próximo a superfície do solo. Por outro lado, as raízes fibrosas e de absorção, podem alcançar mais de dois metros de profundidade.

- Caule

A planta de mandioca apresenta ramificação primária basal e demais apicais. Os ramos apicais são, normalmente, dicotômicos, tricotômicos ou tetracotômicos. O caule herbáceo possui cor variando em tons de verde e roxo. Quando maduro, o caule, possui cor variando do cinza ao marrom escuro. Possui nós curtos 1–1,5 cm, medianos 2–4 cm ou longo >5 cm, proeminentes ou não, cicatrizes foliares proeminentes, curtas 0,5–1 cm, medianas 1–2 cm ou até longas >3 cm. É constituído por sucessões de folhas e/ou protuberâncias formadas pela abscisão foliar,

conhecidas como nós, e pelo espaço entre as folhas ou nós, conhecidos como entrenós. O nível de lignificação do caule aumenta com a idade da planta e varia com o comprimento do ramo. Na medida, em que o caule se torna lignificado as folhas dão lugar aos nós e o espaço entrenós aumenta, assim como o diâmetro do caule. Uma vez lignificado o crescimento primário do caule praticamente cessa. Contudo, o crescimento secundário continua, em função do desenvolvimento do córtex. A mandioca apresenta ramificações simpodiais. As ramificações variam com o nível de dominância apical, ocorrendo plantas de porte ereto ou esgalhado. Cada ponto de ramificação dá origem a novos ápices caulinares e estes podem seguir ramificando-se na medida em que se desenvolvem. Os ápices compreendem as extremidades herbáceas do caule, onde as folhas novas se desenvolvem. O número e disposição dos ápices tem influência direta na área foliar total e no índice de área foliar da planta, respectivamente. O número de pontos de ramificação e de novos ápices por nível de ramificação varia com o genótipo e com as condições ambientais.

- Folhas

As folhas da mandioca são lobadas. Os lóbulos são oblongos, obovados, oblanceolados ou lanceolados. Os ápices dos lóbulos foliares são agudos ou acuminados. As folhas são, variavelmente, cobertas por tricomas simples ou glabros e possuem pecíolo ereto ou semiereto, normalmente pubescente, de cor variando em tons verdes, amarelos ou arroxeados. A filotaxia típica da planta é do tipo 2/5. O número de folhas, área foliar, capacidade fotossintética e longevidade da folha são características varietais altamente influenciadas pelo ambiente.

- Flores, frutos e propagação

A mandioca é uma planta dioica, que apresenta hábito reprodutivo alógamo. As flores se desenvolvem em inflorescências paniculadas e apresentam protoginia. A floração é muito influenciada pelo ambiente, de modo que nem todas as variedades florescem ou parte das variedades que florescem não frutificam de um lugar para outro. O fruto da mandioca é do tipo tricoca e as sementes apresentam-se elípticas, com carúncula acinzentada, testa eluzídia e manchas escuras. Na mandiocultura comercial a planta é propagada de forma assexuada, por meio de secções do caule, conhecidas popularmente por estacas ou manivas. A propagação por sementes

praticamente não ocorre em nível comercial, sendo utilizada basicamente em programas de melhoramento vegetal.

2.0.1.2.2. FENOLOGIA

Embora seja uma cultura perene, de crescimento indeterminado, a mandioca é cultivada como uma cultura anual ou bianual (6-24 meses), dependendo da variedade, do objetivo e das condições de cultivo (LEBOT, 2009). Nos trópicos úmidos as raízes de mandioca podem ser colhidas a partir de 6 ou 7 meses após o plantio. Entretanto, em regiões com período de seca prolongada, os agricultores podem optar por fazer a colheita após 18 a 24 meses do plantio (ALVES, 2006).

O desenvolvimento da mandioca, em termos de fases fenológicas, é muito influenciado pelo genótipo, pelo ambiente e pelo manejo adotado (LEBOT, 2009). De forma geral, Alves (2006) e Lebot, (2009) apresentaram e comentaram o desenvolvimento da mandioca em cinco fases principais: emergência; desenvolvimento dos sistemas foliar e radicular; estabelecimento do dossel foliar; incremento da translocação de carboidratos para raízes de reserva; dormência. Um resumo da descrição dos dois autores é apresentado abaixo:

- Emergência (entre 5 e 20 DAP)

Essa fase é marcada pelo desenvolvimento de raízes adventícias e emergência de brotos, a partir da estaca semente. O processo de emergência é iniciado com a emissão de raízes adventícias, a partir da porção basal da maniva. Em seguida, ocorre a emergência dos primeiros brotos. O número de brotos que emergem do solo, a partir de uma estaca semente, varia com a quantidade de gemas axilares e com o vigor do material propagativo. A posição da estaca semente tem influência sobre o desenvolvimento dos brotos e raízes. Quando a estaca é plantada verticalmente, pode ocorrer maior efeito da dominância apical, o que pode resultar no desenvolvimento de apenas um caule por estaca. Por outro lado, quando a estaca é plantada horizontalmente, há menor interferência da dominância apical e outros brotos podem emergir, formando maior quantidade de caules por estaca plantada.

- Desenvolvimento foliar e radicular (entre 20 e 90 DAP)

Durante essa fase, a planta se torna autossuficiente e desenvolve seu sistema radicular e foliar. A mandioca apresenta dependência da reserva energética contida no material propagativo até ter desenvolvido um dossel foliar que possibilite uma produção de fotoassimilados compatível com sua demanda energética. Normalmente, as plantas tornam-se autossuficientes próximo aos 30 DAP. A partir da autossuficiência, o dossel foliar começa a desenvolver-se mais rapidamente, há incremento do lançamento de folhas e expansão foliar. Nessa fase, também ocorre o início da substituição das raízes adventícias por raízes fibrosas. Parte dessas raízes fibrosas desenvolvem parênquima rico em amido, convertendo-se, vagorosamente, em órgãos de reserva de energia. O processo de formação e desenvolvimento das raízes de reserva é conhecido como tuberização e continua durante os outros estádios de desenvolvimento das plantas.

- Estabelecimento do dossel foliar (entre 90 e 180 DAP)

Durante o estabelecimento do dossel são registradas, normalmente, as maiores taxas de crescimento da parte aérea. Após cerca de 120 DAP, as raízes de reserva continuam o processo de tuberização e o dossel atinge seu tamanho máximo, com produção, em média, de 20 a 40 folhas por mês, as quais podem permanecer ativas entre 50 e 140 dias. O fim dessa fase coincide com o momento em que o índice de área foliar (IAF) está próximo do máximo e começa a diminuir.

- Incremento da translocação de carboidratos para as raízes de reserva (entre 180 e 300 DAP)

Essa fase é marcada pelo incremento da senescência foliar e da lignificação dos ramos da planta. Nessa fase, ocorre intensa translocação de fotoassimilados para as raízes de reserva.

- Dormência (entre 300 e 360 DAP)

A fase de dormência é marcada pela redução da taxa de produção de folhas, estagnação do crescimento e acúmulo máximo de matéria seca nas raízes. Quando a planta completa seu ciclo, cerca de um ano após o plantio, uma nova fase de crescimento pode ocorrer, seguido pelo acúmulo de matéria seca e dormência.

2.0.1.2.3. ECOFISIOLOGIA

A mandioca é uma planta de clima tropical, desenvolvendo-se melhor em ambiente quente, úmido e com alta oferta de radiação solar (BRACHTOVOVEL, 2009). Entretanto, a planta é cultivada nas mais variadas condições edafoclimáticas, entre as latitudes de 30°N e 30°S, em altitudes que variam do nível do mar a mais de 1.800 m (GABRIEL et al., 2014; VISSES et al., 2018).

O fotoperíodo ótimo para o desenvolvimento da mandioca está próximo a 12 horas. Nos trópicos, onde o fotoperíodo está mais próximo de 12 horas, não há muita influência do comprimento do dia sobre o desenvolvimento da mandioca. Por outro lado, em locais onde a variação do fotoperíodo é maior, dias longos tendem a promover maior desenvolvimento da parte aérea e a redução do crescimento de raízes de reserva, enquanto dias curtos tendem a proporcionar aumento do crescimento de raízes de reserva e redução de crescimento da parte aérea (ALVES, 2006).

A planta é eficiente no aproveitamento do carbono atmosférico e da radiação solar, apresentando, em ambiente quente e úmido, baixo ponto de compensação ($23 \text{ cm}^3 \text{ CO}_2 \text{ m}^{-3}$) e alto ponto de saturação de luz ($>1.800 \text{ } \mu\text{mol}$ de fótons por $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$). Em termos de metabolismo fotossintético, apresenta aparato metabólico intermediário entre as plantas do tipo C3 e C4, com taxas líquidas de absorção de CO_2 da ordem de 20 a $35 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, a 30°C e em condição de alta umidade relativa do ar (EL-SHARKAWY et al., 1989; ALVES, 2006; BRACHTOVOVEL, 2009).

A mandioca é uma planta que necessita de altas quantidades de energia luminosa para atingir seu potencial fotossintético. A cultura é pouco tolerante ao sombreamento, apresentando tendência em reduzir as taxas de crescimento das raízes de reserva e aumentar as taxas de senescência foliar e de crescimento primário da parte aérea quando sombreada (ALVES, 2006).

Durante a emergência e estabelecimento do dossel foliar, dos 20 aos 130 dias após o plantio, as plantas são mais sensíveis à competição com ervas invasoras, pois apresentam crescimento mais lento que a maioria destas plantas, desenvolvendo-se ainda mais lentamente quando sombreadas (CARVALHO, 2004). A quebra de produtividade proporcionada pela competição extraespecífica pode chegar a mais de 50%, quando comparada a uma plantação com manejo adequado de plantas espontâneas (JOHANNIS & COTIERO, 2006; BIFFE et al., 2010; SILVA et al., 2012).

Em termos de necessidades hídricas, uma vez estabelecida, a cultura apresenta-se produtiva mesmo em ambientes semiáridos ou áridos, com precipitação abaixo de 700 mm ano⁻¹ e estação seca definida de 4 a 6 meses por ano (EL-SHARKAWY, 2012). A redução no rendimento das raízes tuberosas depende da duração do déficit hídrico e é determinada pela sensibilidade do estágio fenológico ao estresse, da duração, intensidade do estresse e nível de tolerância a seca da variedade cultivada (LEBOT, 2009; OLIVEIRA et al., 2015).

A mandioca apresenta maior sensibilidade à restrição hídrica durante às fases de enraizamento e tuberização, até o quinto mês após o plantio, apresentando quebras de produtividade de raízes de reserva que podem chegar próximo a 60%. A cultura torna-se mais tolerante à condição de estresse hídrico após o quinto mês do plantio, exibindo reduções de rendimento mais baixas ou mesmo insignificantes (OLIVEIRA et al., 1982; TAVORA & BARBOSA FILHO, 1994).

Em termos morfofisiológicos a cultura possui adaptações úteis para convivência com ambientes com baixa disponibilidade hídrica. Exemplos são a possibilidade de extrair, lentamente, água das camadas profundas do solo, a partir de seu extenso sistema radicular, que pode atingir mais de 2 metros de profundidade; a anatomia foliar que retarda a difusão de vapor de água para atmosfera; o controle estomático sensível às pequenas variações de déficit de pressão de vapor do ar; a senescência foliar, durante eventos de déficit hídrico prolongado, acompanhada da formação de folhas menores, com superfície transpirante reduzida; a rápida recuperação da planta, com aumento da taxa de formação de folhas e incremento das taxas fotossintéticas, inclusive, maiores que plantas não estressadas (EL-SHARKAWY, 2006; 2012).

Em relação à fertilidade do solo a cultura da mandioca se desenvolve melhor em solos profundos, soltos, com boa drenagem, com pH entre 5,5 e 6,5, ricos em matéria orgânica e nutrientes (SOUZA et al., 2009). Contudo, as plantas toleram solos ácidos e são produtivas mesmo em solos degradados, com baixos conteúdo de nutrientes (EL-SHARKAWY, 2006). Solos com drenagem deficiente não são adequados para a cultura, pois quando ocorrem eventos de encharcamento prologado as raízes tendem a fermentar e, com o tempo, apodrecer (SOUZA et al., 2009).

2.0.1.3. DIFERENÇAS DE PRODUTIVIDADE DA MANDIOCA

O rendimento de raízes de reserva de mandioca apresenta alta variabilidade no espaço e no tempo (IBGE, 2019b; FAOSTAT, 2017). As variações de produtividade refletem

as diferentes condições de cultivo às quais as plantas foram submetidas (VISSES et al., 2018). Apesar de ser conhecida por sua capacidade de ser produtiva em condições de cultivo adversas, a mandioca não exhibe seu potencial produtivo em condições subótimas (ABREU et al., 2008; VISSES et al., 2018). Por outro lado, segundo Tafur (2002), quando cultivada em condições próximas da ótima, a lavoura de mandioca pode atingir produtividade superior a 80 t ha⁻¹ de massa fresca de raízes de reserva.

Estatísticas recentes da FAO, em 2017, apresentaram média de produtividade mundial de raízes de mandioca próxima a 11 t ha⁻¹, com valores máximo e mínimo próximos a 31,8 e 1,1 t ha⁻¹, respectivamente (FAOSTAT, 2017). No ano de 2018, o Brasil apresentou produtividade média próxima de 14,6 t ha⁻¹ e valores máximo e mínimo, em termos de produção média estadual, de 23,7 e 6,7 t ha⁻¹, para os Estados de São Paulo e Bahia, respectivamente.

As diferenças de produtividade são o resultado direto de variações da interação entre fatores relacionados ao genótipo, ambiente e ao manejo agrônômico (SENTELHAS et al., 2016; VISSES et al., 2018). Os fatores relacionados ao genótipo podem ser entendidos como o conjunto de variáveis de ordem genética e ecofisiológica relacionados à espécie e às características da variedade cultivada (CARVALHO & FUKUDA, 2006; LARA et al., 2008). Os fatores ambientais representam o conjunto de variáveis e de relações bióticas e abióticas que compõem o sistema biofísico em que as plantas se desenvolvem (ABREU et al., 2008; TAIZ et al., 2017). Por fim, os fatores de manejo agrônômico estão relacionados ao conjunto de estratégias de cultivo desenvolvidas para otimizar o desempenho da cultura em determinado agrossistema (ALVES, 2006; LEBOT, 2009).

O entendimento desse conjunto de fatores que se relacionam e definem a produtividade agrícola é essencial para antecipar quebras de produtividade e reduzir o risco associado ao cultivo, como explicado por Sentelhas et al. (2016). Infelizmente, avaliar o agrossistema e os componentes que definem a sua produtividade não é uma tarefa das mais simples, pois é necessário integrar conhecimento de diferentes áreas e ter acesso a um grande volume de dados de natureza diversa para desenvolver um modelo que seja capaz de representar, em níveis satisfatórios, a realidade observada em campo.

2.0.2. MODELOS DE SIMULAÇÃO DE CULTURAS

A modelagem consiste em criar um modelo para descrever um dado objeto de estudo ou sistema. Em termos conceituais, Dourado Neto et al., (1998) explicam que modelos são

representações simplificadas de uma dada realidade, processo ou fenômeno. Os autores comentam que modelos podem ser classificados como conceituais, a exemplo de uma classificação taxonômica; físicos, como a maquete de uma edificação; ou matemáticos, quando o objeto de estudo é representado por meio de equações, a exemplo do modelo que descreve o índice de massa corporal (IMC).

Modelos de simulação de culturas consistem, na verdade, em conjuntos de modelos matemáticos, que juntos representam um dado processo ou um sistema de maior complexidade. Na literatura são descritos diferentes tipos de modelos matemáticos e de simulação, cada tipo apresenta vantagens e desvantagens (CORRÊA et al., 2011). De modo geral, eles podem ser classificados quanto ao tipo de equações que os constituem, em lineares e não lineares; quanto ao nível de explicação dos fenômenos que os descrevem, em empíricos ou mecanísticos; quanto a forma com que tratam a relação com o tempo físico, em dinâmicos ou estáticos; quanto ao tratamento que dão à incerteza de suas variáveis, em determinísticos ou estocásticos (BORTOLON et al., 2017).

A utilização de modelos matemáticos e de simulação aplicados a culturas agrícolas parte do pressuposto que os processos envolvidos em um agrossistema podem ser descritos por meio de expressões matemáticas (ANDRADE et al., 2009). Em adição, Corrêa et al. (2011), explica que os modelos de culturas agrícolas, normalmente consistem em um balanço de carbono, que depende da interceptação e da utilização da luz, de um balanço hídrico, que depende da demanda atmosférica e da utilização da água pelas plantas. Além disso, os autores citam que podem ocorrer associações com outros processos como o de absorção de nutrientes pelas plantas ou variações causadas por penalizações atribuídas a simulação de ocorrência de pragas, doenças e/ou plantas invasoras.

2.0.2.1. SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO: DSSAT

A incorporação de modelos de simulação de culturas em sistemas computacionais ocorreu em função da evolução dos sistemas de computação e do aumento da complexidade dos modelos de simulação de culturas agrícolas. Essa incorporação proporcionou melhorias no processo de cálculo, processamento de dados e acessibilidade. Os softwares de suporte a tomada de decisão são utilizados para auxiliar na pesquisa aplicada, na educação, no planejamento agrícola em nível de propriedade e, em maior escala, como ferramenta de avaliação de mudanças climáticas, políticas de planejamento

e desenvolvimento agrícola (BOOTE et al., 2010; HEINEMANN et al., 2010; BORTOLON et al., 2017).

Uma das opções gratuitas, mais populares, desses sistemas, ou softwares, é o Sistema de Suporte à Decisão para Transferência Agrotecnológica (DSSAT). O sistema possui, a partir de sua versão 4.7.5, mais de 42 modelos de simulação de culturas disponíveis para simulação. (HOOGENBOOM et al., 2019).

Os modelos de simulação, contidos no DSSAT, são dinâmicos e baseiam-se em processos envolvidos na relação planta x ambiente x manejo. Jones et al., (2003) e Hoogenboom et al. (2019) resumem o funcionamento do software descrevendo que o crescimento, desenvolvimento e produção das plantas são calculados com base em equações que representam como a cultura, na forma de uma comunidade de plantas, responde às variações ambientais e de manejo agrícola. Os autores informam que o conjunto de equações que compõem os modelos de simulação são baseadas em informações da fisiologia das culturas, ciência do solo, meteorologia e outras áreas de conhecimento.

De forma a complementar, Hoogenboom et al. (2019) comentam que no nível mais simples de interpretação, as expressões matemáticas usadas nos modelos de simulação são um conjunto de equações diferenciais que representam taxas de crescimento ou desenvolvimento das culturas. A integração numérica ao longo do tempo, por meio de atualizações diárias ou horárias, possibilita a estimativa de variações nas condições de cultivo e seu impacto sobre a evolução do crescimento e desenvolvimento das culturas na medida em que o tempo avança.

O DSSAT possui uma estrutura modular, que contém um módulo principal que organiza e executa rotinas que integram e atualizam os dados de saída do modelo de simulação de culturas a partir de dados de entrada de cinco módulos primários relacionados ao clima, manejo, solo, planta e a relação solo-planta-atmosfera. Dos cinco módulos primários, o módulo relacionado ao fator planta se diferencia dos demais por ser específico para cada cultura incluída no DSSAT, os demais são comuns a todas as culturas. Os modelos de simulação precisam de dados climáticos diários, informações sobre o perfil do solo e informações detalhadas sobre o manejo agrônomico como dados de entrada. Informações genéticas gerais das culturas são definidas em um arquivo fornecido pelo DSSAT. Entretanto, informações sobre as variedades cultivadas e sua calibração para condição de cultivo de interesse são fornecidas pelo usuário (HUNT et al., 1998; JONES et al., 2003;).

O sistema possui algumas ferramentas para auxiliar os usuários na organização dos dados de entrada para o gerenciamento de culturas, solos e clima (HOOGENBOOM et al., 2019). Um conjunto de dados de obtenção mais complicada são os parâmetros específicos de genótipo usados para caracterizar as variedades. Os parâmetros da calibração, são preferencialmente, estimados a partir de dados confiáveis, fornecidos por meio de experimentação em campo (CORRÊA et al., 2011; BORTOLON et al., 2017).

O DSSAT fornece ferramentas para ajudar a organizar os dados usados na calibração e/ou para estimar os parâmetros necessários. O software também fornece a possibilidade de avaliação dos resultados do modelo da cultura com dados experimentais, permitindo que os usuários comparem, mais facilmente, resultados simulados com observados e, com isso verifiquem se o processo de calibração foi bem sucedido. Outros programas disponíveis no DSSAT, estão relacionados com análises sazonais e sequenciais, que permitem avaliar riscos climáticos, impactos associados ao manejo agrícola e mudanças climáticas por períodos mais longos e/ou considerando rotações de culturas ou sequencias de cultivos na mesma área cultivada, respectivamente (HOOGENBOOM et al., 2019).

2.0.2.2. MODELOS DE SIMULAÇÃO DE CULTIVO DA MANDIOCA DISPONÍVEIS NO DSSAT

Atualmente, existem 18 modelos de simulação publicados que simulam o cultivo da mandioca. Moreno-Cadena et al. (2021) revisa o estado da arte da modelagem do cultivo da mandioca e descreve sucintamente todos os 18 modelos, apontando aspectos que podem ser melhorados em novas versões de modelos de simulação da cultura da mandioca. O DSSAT, possui dois modelos de simulação disponíveis para a cultura da mandioca, o CROPSIM-Cassava e o MANIHOT-Cassava.

O modelo CROPSIM-Cassava, inserido no DSSAT, é uma versão modificada do modelo GUMCAS, desenvolvido por Matthews e Hunt (1994). O CROPSIM-Cassava é um modelo dinâmico, baseado nos processos de crescimento, desenvolvimento e produção de uma plantação homogênea de mandioca. Mais informações sobre o CROPSIM-Cassava e suas principais diferenças em relação ao modelo originalmente desenvolvido por Matthews e Hunt (1994) podem ser encontrados na revisão efetuada por Moreno-Cadena (2018).

O modelo MANIHOT-Cassava foi desenvolvido a partir do código do CROPSIM-Cassava e possui como diferenciais algoritmos que melhoraram alguns aspectos no modelo como a caracterização da mandioca como uma cultura de crescimento indeterminado e

uma nova abordagem sobre o estresse hídrico, baseado na variação de umidade do solo (MORENO-CADENA et al., 2020). Informações detalhadas sobre os processos envolvendo a simulação do cultivo da cultura da mandioca no MANIHOT-Cassava são encontrados nos trabalhos desenvolvidos por Moreno-Cadena, (2018), Moreno-Cadena et al., (2020), e por Moreno-Cadena et al., (2021). A descrição realizada abaixo foi realizada a partir das informações contidas nesses três trabalhos.

O MANIHOT-Cassava é um modelo baseado em processos que considera a mandioca como uma cultura de crescimento indeterminado, de modo que o cultivo não tem uma fase fenológica de maturidade, como as culturas de grãos representadas em outros módulos de cultura do DSSAT. No modelo, o desenvolvimento da planta ocorre na medida em que a planta acumula tempo térmico e o tempo térmico é calculado a partir de temperaturas cardinais que variam de acordo com os processos de desenvolvimento da cultura simulados pelo modelo.

O espaço ocupado entre folhas ou cicatrizes de abscisão foliar, também denominadas como nós, representa a unidade de crescimento básica do modelo. A parte aérea das plantas se desenvolve e cresce de forma simétrica, de acordo com um princípio de espelhamento do número de nós nos ramos da planta. Se a quantidade de carboidratos produzida não é suficiente para manter o crescimento potencial da planta as taxas de crescimento de folhas e raízes fibrosas é penalizada.

O modelo calcula a quantidade de carboidratos produzidos diariamente pela planta a partir do produto entre a radiação solar interceptada e a eficiência no uso da radiação solar. A radiação solar interceptada tem relação com o índice de área foliar da planta, de modo que na fase de desenvolvimento inicial, a planta, depende das reservas energéticas do material propagativo. A abordagem de distribuição de fotoassimilados utilizada no modelo é do tipo “spill-over” e considera que a parte aérea e as raízes fibrosas da planta têm preferência no consumo de energia em relação as raízes de reserva da planta, que fica com a energia que resta.

O déficit hídrico e/ou nutricional penaliza o crescimento da planta. Salienta-se que o modelo só reconhece o déficit nutricional que ocorre em função da disponibilidade de nitrogênio. O fator de déficit hídrico é definido de acordo com o conteúdo de água no solo, considerando dois momentos distintos: antes e após a emergência da planta.

2.0.2.2.1. CALIBRAÇÃO DO MODELO MANIHOT-CASSAVA

Para calibrar o modelo MANIHOT-Cassava com informações condições de cultivo específicas é necessário ajustar os parâmetros de calibração do modelo. Os parâmetros foram criados a partir de uma vasta revisão de literatura, contendo informações de variedades, cultivadas em diferentes condições de clima e manejo (MORENO-CADENA, 2020).

Os parâmetros ajustados no processo de calibração podem variar de acordo com o objetivo da calibração. Phoncharoen et al. (2021), por exemplo, apresentaram um fluxograma para calibração do MANIHOT-Cassava com informações de novas variedades. Neste trabalho, 18 parâmetros foram ajustados a partir da comparação entre dados simulados e observados associados as variáveis: nível de ramificação da parte aérea, índice de área foliar e produção de fitomassa seca total e sua distribuição em folhas, caules e raízes.

2.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, M. L. et al. Interação genótipo ambiente na cultura da mandioca. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v. 4, n. 1, p. 43-53, 2008.

Alvares, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, 711-728, 2013.

Alves, A. A. C. Fisiologia da mandioca. In: Souza, L. S. et al. (Ed.) **Aspectos agronômicos e socioeconômicos da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, p.138-169, 2006.

Andrade, C. L. T. et al., **Modelagem do crescimento de culturas: aplicações à cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009.

Biffe, D.F. et al. Período de interferência de plantas daninhas em mandioca (*Manihot esculenta*) no noroeste do Paraná. **Planta daninha**, v. 28, n. 3, p. 471-478, 2010.

Boote, K. J. et al. The role of crop systems simulation in agriculture and environment. **International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems**, v. 1, n. 1, p. 41-54, 2010.

Bortolon, E. S. O. et al. **Modelos de simulação de agroecossistemas como ferramentas para avaliar sistemas agrícolas em regiões tropicais**. Palmas: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2017.

Brachtvogel, E. L. et al. Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) crop physiology. **Cultura Agronômica**, v. 18, n. 4, p. 13-22, 2009.

Carvalho, J. E. B. et al. **Período de controle de plantas infestantes na cultura da mandioca no Estado da Bahia**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2004.

Carvalho, P. C. L. de; Fukuda, W. M. G. Estrutura da planta e morfologia. in: **Aspectos socioeconômicos e agrônômicos da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, p. 126-137, 2006.

Ceballos, H.; Cruz, A. G. A. Taxonomía y morfología de la yuca. In: Ospina B. et al. (Ed.). La yuca en el Tercer Milenio: **Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización**. Calí: Centro Internacional de Agricultura Tropical, p. 17-33, 2002.

Cock, J. H. et al. **Non-destructive monitoring system in cassava**. Colombia: International Center for Tropical Agriculture y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2014.

Corrêa, S. T. R. et al. Aplicações e limitações da modelagem em agricultura: revisão. **Revista de Agricultura**, v. 86, n. 1, p. 1-13, 2011.

Dourado Neto, D. et al. Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, v. 55, n. especial, p. 46-50, 1998.

Edhirej, A. et al. Cassava: Its polymer, fiber, composite, and application. **Polymer Composites**, v. 38, n. 3, p. 555-570, 2017.

El-Sharkawy, M. A. Cassava biology and physiology. **Plant molecular biology**, v. 56, n. 5, p. 481-501, 2004.

El-Sharkawy, M. A. et al. Características fotossintéticas da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 1, n. 2, p. 143-154, 1989.

El-Sharkawy, M. A. International research on cassava photosynthesis, productivity, eco-physiology, and responses to environmental stresses in the tropics. **Photosynthetica**, v. 44, n. 4, p. 481-512, 2006.

El-Sharkawy, M. A. Stress-tolerant cassava: the role of integrative ecophysiology-breeding research in crop improvement. **Open Journal of Soil Science**, v. 2, n. 2, p. 162-186, 2012.

Falade, K. O.; Akingbala, J. O. Utilization of cassava for food. **Food Reviews International**, v. 27, n. 1, p. 51-83, 2010.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics**. Statistics Division, 2017. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>.

Fukuda, W. M. G. et al. **Catálogo de germoplasma de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)** Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 161 p., 1997.

Fukuda, W. M. G.; Guevara, C. L. **Descritores morfológicos e agrônômicos para a caracterização de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 1998.

Gabriel, L. F. et al. Mudança climática e seus efeitos na cultura da mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 90-98, 2014.

Guimarães, M. J. M. et al. Balanço hídrico para diferentes regimes pluviométricos na região de Cruz das Almas-BA. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 59, n. 3, p. 252-258, 2016.

Heinemann, A. B. et al. **Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade na pesquisa agrônoma**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 26 p, 2010.

Hoogenboom, G. et al. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5**. Flórida: Gainesville, 2019. Disponível em: <<https://DSSAT.net>>. Acesso em: outubro de 2019.

Hunt, L. A.; Boote, K. J. Data for model operation, calibration, and evaluation. In: Tsuji, G.Y. et al. (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Ac. Pub., p. 9-40, 1998.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola**, 2019 b. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/188>>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**, 2019 a. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1612>>.

Johanns, O.; Contiero, R. L. Efeitos de diferentes períodos de controle e convivência de plantas daninhas com a cultura da mandioca. **Revista Ciência Agrônoma**, v. 37, n. 3, p. 326-331, 2006.

Jones, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. **European journal of agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 235-265, 2003.

Jones, W. et al. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0**. Volume 4. DSSAT v4.5: Crop Model Documentation. Honolulu: University of Hawaii, 450 p., 2010

Lara, A. C. C. et al. Melhoramento genético da cultura da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v. 4, n. 1, p. 54-64, 2008.

Lebot, V. Developmental physiology. In: Lebot, V. **Cassava Tropical root and tuber crops: cassava, sweet Potato, yams and aroids**. Cabi: Wallingford, p. 39-47, 2009.

Matthews, R. B.; HUNT, L. A. GUMCAS: a model describing the growth of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Field Crops Research**, v. 36, p. 69–84, 1994.

Mendoza, F. J. M. **Morfologia e meiose em cultivares e escapees de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)**. Dissertação (Mestrado em Botânica). Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

Moreno-Cadena, L. P. **Modelo de simulación de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el trópico**. Dissertação (Mestrado em Fisiologia dos cultivos). Palmira: Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2018.

Moreno-Cadena, P. et al. Modeling growth, development and yield of cassava: A review. **Field Crops Research**, v. 267, p. 1-13, 2021.

- Moreno-Cadena, L. P. et al. Importance of genetic parameters and uncertainty of MANIHOT, a new mechanistic cassava simulation model. **European Journal of Agronomy**, v. 115, p. 1-14, 2020.
- Oliveira, E. J. et al. BRS Novo Horizonte-a new cassava variety for industrial use. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, p. 1-5, 2020.
- Oliveira, S. L. et al. Efeito do déficit de água na produção de raízes de mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 1, p. 121–124, 1982.
- Oliveira, E. J. et al. Parâmetros genéticos da mandioca quanto à tolerância ao déficit hídrico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 3, p. 233-241, 2015.
- Parmar, A. et al. Crops that feed the world: production and improvement of cassava for food, feed, and industrial uses. **Food Security**, v. 9, n. 5, p. 907-927, 2017.
- Pereira, M. D. B et al. Análise da variabilidade pluviométrica interanual da Zona da Mata Nordestina e a identificação de anos padrão. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 30-50, 2020.
- Phoncharoen, P. et al. Performance of the CSM–MANIHOT–Cassava model for simulating planting date response of cassava genotypes. **Field Crops Research**, v. 264, n.1, p 1-15 2021
- Santos, F.S. Permanências e Transformações Territoriais: a mandiocultura e o desenvolvimento socioeconômico no recôncavo baiano. In: **Seminário Internacional de Dinâmica Territorial e Desenvolvimento Socioambiental**, 7, 2015, Salvador. Resumos [...]. Salvador: Universidade Católica de Salvador, 2015, p. 1-21.
- Sánchez, A. S. et al. Waste bio-refineries for the cassava starch industry: New trends and review of alternatives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 1265-1275, 2017.
- Sentelhas, P. C. et al. Yield gap: conceitos, definições e exemplos. **Informações Agrônomicas**, n. 155, p. 9-12, 2016.
- Silva, D. V. et al. Manejo de plantas daninhas na cultura da mandioca. **Planta Daninha**, v. 30, n. 4, p. 901-910, 2012.
- Silva, H. A.; Murrieta, R. S. S. Mandioca, a rainha do Brasil? Ascensão e queda da Manihot esculenta no estado de São Paulo. **Ciências Humanas**, v. 9, n. 1, p. 37-60, 2014.
- Silva, L. E. B. et al. Aspectos gerais e peculiaridades sobre mandioca (Manihot esculenta crantz). **Diversitas Journal**, v. 3, n. 1, p. 13-23, 2018.
- Souza, L. S. et al. **Recomendação de calagem e adubação para o cultivo da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2009.
- Souza, V.C.; Lorenzi, H. **Botânica Sistemática: guia ilustrado para identificação das famílias de Fanerógamas nativas e exóticas no Brasil, baseado em APG III**. 3ª ed. Instituto Plantarum, Nova Odessa, São Paulo, 768 p., 2012.

Tafur, S. M. N. Fisiologia de la yuca (Manihot esculenta Crantz). In: Ospina, B; Ceballos, H (Org.). **La yuca en el tercer Milenio: Sistemas Modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización**. Calí: CIAT, p. 34-48, 2002.

Taiz, L. et al. Interações bióticas e estresse abiótico. In: Taiz, L. et al. (Eds.) **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, p. 693-759, 2017.

Távora, F. J. A. F.; Barbosa Filho, M. Antecipação de plantio, com irrigação suplementar, no crescimento e produção de mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.29, n.12, p.1915-1926, 1994.

Uchekukwu-Agua, A. et al. Postharvest handling and storage of fresh cassava root and products: a review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 8, n. 4, p. 729-748, 2015.

Visses, A. F. et al. Yield gap of cassava crop as a measure of food security-an example for the main Brazilian producing regions. **Food Security**, v. 10, n. 5, p. 1191-1202, 2018.

Yerhovwo, J. T. et al. White Gold: Cassava as an Industrial Base. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, n. 07, p. 972-979, 2015.

3. CARACTERIZAÇÃO DE VARIEDADES DE MANDIOCA PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO MANIHOT-CASSAVA: COLETA E APLICAÇÃO DOS DADOS

Resumo: Para que o modelo MANIHOT-Cassava apresente sensibilidade às diferenças de potencial produtivo que ocorrem entre variedades de mandioca é necessário calibrar o modelo a partir de informações observadas em campo. Contudo, variedades cultivadas no clima do tropical subúmido, no Brasil, ainda não foram caracterizadas para esse propósito. O presente trabalho possui dois objetivos: (i) caracterizar variedades de mandioca, cultivadas em clima tropical subúmido, visando a calibração do modelo MANIHOT-Cassava; (ii) comentar a prática de campo envolvida caracterização das variedades e a aplicação dos dados coletados no processo de calibração. A coleta de dados foi realizada a partir de quatro experimentos, instalados em Cruz das Almas, Brasil. As unidades experimentais consistiram em plantações contendo populações superiores a 320 plantas. A amostra variou de 10 a 20 plantas, por avaliação. Em cada plantação foi cultivada uma variedade de mandioca: BRS Novo Horizonte, BRS Formosa ou Eucalipto. Os resultados foram apresentados em termos de tendências de crescimento das variáveis e índices estatísticos. As variedades apresentaram tendências de crescimento parecidas relacionadas ao desenvolvimento da parte aérea em termos de quantidade de níveis de ramificação e quantidade de ápices por nível de ramificação. Entretanto, foram registradas diferenças nas tendências associadas a produção de folhas, índice de área foliar e produção de fitomassa seca. Essas variações estão relacionadas as diferenças na morfológicas que ocorrem entre as variedades, bem como as diferenças de potencial produtivo e variações climáticas decorrentes das épocas de plantio em que os experimentos foram cultivados.

Palavres chave: DSSAT, modelos de culturas, *Manihot esculenta* Crantz

Introdução

O desempenho das lavouras de mandioca está relacionado a fatores relacionados a gestão agrícola, ao clima, fertilidade do solo e ao potencial produtivo das variedades (Visses et al., 2018; Oliveira et al., 2020; Bester et al. (2021). Dentro desse contexto, modelos de simulação de culturas podem ser utilizados para estudar os componentes da produtividade, em diferentes cenários de cultivo, e auxiliar a selecionar estratégias para reduzir as perdas relacionadas aos fatores que limitam ou reduzem a produtividade da lavoura (Sentelhas et al., 2016, Phoncharoen et al., 2021a).

Atualmente existem cerca de 20 modelos que simulam o cultivo da mandioca. O MANIHOT-Cassava é uma das opções disponíveis e foi desenvolvido, recentemente, como

um aperfeiçoamento do CROPSIM-Cassava (Moreno-Cadena et al., 2021). O modelo está disponível, na forma de um módulo de cultura, a partir da versão 4.7 do software Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) (Hoogenboom et al., 2019).

O MANIHOT-Cassava pode ser aplicado, sem calibração, para avaliar as tendências de produtividade gerais da espécie de acordo com o cenário de cultivo. Entretanto, ocorre maior incerteza associada aos resultados simulados, pois os parâmetros de calibração das variedades disponíveis na versão padrão do DSSAT podem ter sido ajustados para uma condição muito diferente da qual se deseja simular ou, então, podem ocorrer diferenças de potencial produtivo e precocidade em relação as variedades cultivadas no ambiente avaliado, como apresentado nos trabalhos realizados por Phoncharoen et al., (2019 a, b).

A caracterização das variedades é uma das etapas essenciais do processo de calibração de modelos de simulação de culturas (Hoogenboom et al., 2019). Infelizmente, o levantamento de dados dessa natureza é uma das etapas mais difíceis e desgastantes do processo, seja em função das dificuldades encontradas na experimentação ou da dificuldade em encontrar informações publicadas que permitam a reprodução das condições de cultivo, em nível de simulação (Wallach et al., 2021).

Moreno-Cadena et al., (2020) realizaram uma análise de sensibilidade e incerteza para verificar a importância de 16 parâmetros sobre a simulação dos dados de saída do modelo e explicaram que ocorrem variações relacionadas a importância dos parâmetros sobre a simulação dos dados de saída de acordo com o ambiente e o dado de saída. Em ambientes quentes, por exemplo, segundo os resultados apresentados pelos mesmos autores, 10 dos 16 parâmetros de calibração avaliados interferem na simulação do índice de área foliar máximo.

É raro encontrar dados observados que possuam associação direta com parâmetros de calibração do modelo para uma variedade específica. O mais comum é ajustar os parâmetros de acordo com dados que possuam associação com os dados de saída do modelo a exemplo dos trabalhos de Phoncharoen et al. (2021) e Rankine et al. (2021), que realizaram a calibração do modelo a partir de dados associados a evolução da ramificação da parte aérea das plantas, número acumulado de folhas, índice de área foliar e produção de fitomassa seca de folhas, caule e raízes de reserva.

Por outro lado, obter dados que tenham associação direta aos parâmetros pode ser útil para nortear o processo de calibração. Além disso, a divulgação desse conjunto de dados também pode ajudar os desenvolvedores a aperfeiçoar o modelo, uma vez que ocorrem poucos dados na literatura sobre parte dos parâmetros de calibração do modelo, como explicado por Moreno-Cadena et al. (2020).

Infelizmente, ainda não existem referências que contenham os dados necessários para calibração do modelo com informações de variedades cultivadas em ambiente tropical subúmido, no Brasil e tampouco existem trabalhos que comentem a prática de campo envolvendo a coleta de dados em campo que tenham relação direta com os parâmetros de calibração do MANIHOT-Cassava ou com os dados de saída usados para ajustar os parâmetros de calibração do modelo.

Desse modo, o presente trabalho teve dois objetivos: (i) caracterizar o desenvolvimento, crescimento e produção de variedades de mandioca cultivadas em clima tropical subúmido, visando o processo de calibração do modelo MANIHOT-Cassava e (ii) comentar sobre as práticas de campo relacionadas a caracterização das variedades e sobre a aplicação desse conjunto de dados no processo de calibração do modelo.

Material e métodos

Localização dos experimentos

O processo de caracterização das variedades foi realizado a partir de quatro experimentos. Os experimentos 1 e 2 foram conduzidos entre 4 de janeiro de 2019 e 20 de dezembro de 2019 e os experimentos 3 e 4 entre 15 de setembro de 2019 e 15 de setembro de 2020.

Os experimentos foram desenvolvidos em campos experimentais da Embrapa Mandioca e Fruticultura, localizados em Cruz das Almas, Bahia, Brasil. Os campos experimentais estão situados a cerca de 220 m de altitude em relação ao nível do mar, próximo das coordenadas geográficas: 12°40'31" S e 39°05'17" W.

Caracterização edafoclimática

Clima

O clima da região de Cruz das Almas é do tipo tropical úmido ou subúmido (Am), segundo a classificação climática de Köppen. Conforme a caracterização realizada por Silva et al., (2016) a normal meteorológica de Cruz das Almas, entre 1971 e 2010, registrou médias anuais de temperatura média, máxima e mínima da ordem de 23,9, 28,8 e 20,4 °C, insolação de 6,1 h e velocidade do vento de 2,9 m s⁻¹, umidade relativa média anual de 81%. A precipitação acumulada no ano é, em média, 1.131,17 mm, com variações entre

900 e 1.300 mm, em anos com extensão do período de estiagem ou de chuva, respectivamente (GUIMARAES et al., 2016).

Os registros das variáveis meteorológicas diárias de temperatura máxima e mínima (°C), irradiância solar acumulada (MJ m²), fotoperíodo (horas) precipitação pluviométrica acumulada (mm), obtidos a partir de uma estação meteorológica automática instalada a cerca de 100 metros da área experimental, entre janeiro de 2019 e outubro de 2020, são apresentados no apêndice 1.

Solo

O solo dos campos experimentais é caracterizado, por Souza e Souza (2001), como Latossolo Amarelo Distrófico, possui declividade próxima a 3%. Os atributos físico-hídricos do solo são detalhados no apêndice 2. Os atributos químicos do solo avaliados, antes do plantio de cada experimento, são detalhados no apêndice 3.

Informações sobre o cultivo das plantas

A cultura avaliada foi a da mandioca (*Manihot esculenta Crantz*). As variedades avaliadas foram: BRS Novo Horizonte, BRS Formosa e Eucalipto. A variedade BRS Novo Horizonte é uma variedade de alto potencial produtivo desenvolvida para indústria e avaliada nas condições de cultivo do Recôncavo Baiano (Oliveira et al., 2020). A BRS Formosa também é uma variedade de elite indicada para uso industrial. Entretanto, apresenta potencial para cultivo em ambientes mais secos, como o semiárido, em função de sua tolerância diferenciada a seca (Oliveira et al., 2017). Por fim, a variedade Eucalipto é uma variedade crioula, de mesa, cultivada tradicionalmente por mandiocultores do Recôncavo da Bahia.

O material propagativo utilizado durante o plantio possuía entre 10 e 12 meses e foi fracionado de forma a produzir estacas semente (manivas) com tamanho de cerca de 0,20 m. As manivas foram depositadas em sulcos de plantio, a cerca de 0,08 m de profundidade, em disposição horizontal. O espaçamento utilizado no plantio foi equivalente a 0,90 m entre linhas e 0,80 m entre plantas, com densidade de plantio de 13.889 plantas ha⁻¹. A umidade do solo foi elevada à capacidade de campo, por meio de irrigação, após o plantio.

O sistema de manejo adotado para condução da cultura da mandioca incluiu o preparo convencional do solo, controle de plantas espontâneas, pragas, correção da reação do solo, adubação de plantio, adubação de cobertura e irrigação complementar.

O preparo do solo consistiu nas operações de aração, gradagem e abertura de sulcos de plantio. Plantas espontâneas foram controladas de modo a evitar competição extraespecífica nas fases mais sensíveis da cultura da mandioca (Silva et al., 2012). O controle de ervas foi constituído pela etapa de pré-plantio e de pós-plantio. A etapa pré-plantio foi realizada mediante roçagem, seguida de aplicação, em cobertura, de calda composta por herbicidas dessecantes a base de glifosato e flumioxazina, sobre a vegetação espontânea. A etapa pós-plantio foi realizada com aplicação em cobertura de calda herbicida pré-emergente a base de isoxazolidinona, até 4 dias após o plantio (DAP), seguida da realização de três capinas manuais aos 60, 90 e 120 DAP. O controle de formigas foi realizado mediante aplicação de iscas cítricas contendo formicida com princípio ativo a base de sulfluramida.

A análise química do solo revelou não haver necessidade de calagem em ambos os experimentos. A adubação de plantio foi efetuada, com aplicação da dose de $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$ de P_2O_5 , na forma de superfosfato simples. A adubação de cobertura foi realizada via distribuição manual, na projeção da copa, da dose de 40 e 50 Kg de N e de $\text{K}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$. A dose foi fracionada em quantidades iguais aos 30, 60 e 90 DAP, na forma de ureia e cloreto de potássio, respectivamente. As doses de fertilizantes foram calculadas de acordo com a recomendação de Souza et al. (2009).

Durante os experimentos foi realizada irrigação complementar. Utilizou-se o método de irrigação localizada por microaspersão. Os emissores utilizados foram do tipo autocompensante de vazão 54 L h^{-1} . A pressão de serviço adotada durante os eventos de irrigação foi superior a $1,6 \text{ kgf cm}^{-2}$. Os emissores foram posicionados de modo a permitir irrigação em área total, com um emissor cobrindo uma área de 7 m^2 ($2 \times 3,5 \text{ m}$). Considerou-se a eficiência de aplicação de água como 90% em função do uso de emissores autocompensantes, linhas laterais curtas ($>40 \text{ m}$) e sobreposição de raio de ação dos emissores ($>30\%$). O coeficiente de localização foi considerado como 1, uma vez que foi realizada irrigação em área total.

As necessidades de irrigação foram calculadas a partir do produto da evapotranspiração de referência (ET_o) e dos coeficientes de cultivo fornecidos pelo departamento de irrigação da Embrapa Mandioca e Fruticultura, conforme publicado por Coelho Filho (2020). A ET_o foi calculada a partir da aplicação de dados meteorológicos na equação descrita por Allen et al. (1998). Foi considerada como tensão limite (umidade crítica para irrigar) o valor correspondente 60% da água disponível no perfil de solo. Até 90 dias após o plantio (DAP), para efeito de cálculo da lâmina de irrigação, a profundidade

efetiva do sistema radicular foi considerada 0,30 m, passando para 0,50 m imediatamente após os 90 DAP.

As plantas do experimento 1 foram cultivadas sem restrição hídrica, com irrigação complementar do plantio a colheita. Entretanto, as plantas dos experimentos 2, 3 e 4 receberam irrigação complementar apenas até próximo dos 60, 140 e 45 DAP, respectivamente. As lâminas de irrigação aplicadas são detalhadas, por experimento, no apêndice 4.

Levantamento de dados

O levantamento de dados foi realizado a partir de unidades experimentais com populações acima de 320 plantas. As unidades experimentais foram distribuídas no campo experimental de acordo com a variedade de mandioca: BRS Novo Horizonte, BRS Formosa e Eucalipto. O tamanho amostral adotado, durante cada evento de avaliação, foi de 10 a 20 plantas por unidade experimental, de acordo com a variável avaliada.

Foram realizados registros de dados em momentos específicos do cultivo, uma única vez, para detalhamento do crescimento das plantas, condição de cultivo, ou para ajudar na estimativa de parâmetros de calibração das cultivares do modelo MANIHOT-Cassava (Moreno-Cadena et al., 2020).

Foram registrados em amostragem única, em todos os experimentos o número de ramos que emergiram do solo, contabilizado próximo aos 18 DAP, a partir da média aritmética de 10 plantas, escolhidas ao acaso. No experimento 1 e 2 foram avaliados, em amostragem única, a área foliar específica e a razão entre as massas do pecíolo e folha completa, ambos avaliados próximo aos 90 DAP; o comprimento entre cicatrizes foliares e a massa individual de cicatrizes foliares, avaliados próximo aos 300 DAP. As variáveis descritas anteriormente foram avaliadas mediante amostragem de 20 plantas.

A área foliar específica foi obtida por meio da razão entre a área ocupada por dez discos foliares, de diâmetro de 0,009 m, e a sua massa de matéria seca. A proporção entre as massas do pecíolo e folha completa, foi obtida pela razão entre a massa de matéria seca do pecíolo e da folha completa, respectivamente. O comprimento entre cicatrizes foliares e sua massa individual foram obtidos a partir de amostras de caule, de comprimento igual a 0,20 m, coletadas a cerca de 0,50 m da superfície do solo. O comprimento entre cicatrizes foliares, foi calculado por meio da razão entre o número de cicatrizes foliares presente na amostra de caule e o comprimento da amostra. A massa individual da cicatriz foliar (“nó”)

foi calculada a partir da razão entre a massa de matéria seca e o número médio de cicatrizes foliares presentes em cada amostra de caule.

Além desse conjunto de variáveis, foram realizadas avaliações sequenciais, que tiveram frequência de coleta de dados entre 30 e 75 dias para avaliações de natureza não destrutiva e entre 50 e 75 dias para avaliações de natureza destrutiva. Em ambos os tipos de avaliação a amostra utilizada foi de 10 plantas.

Nas avaliações não destrutivas, as mesmas plantas foram avaliadas entre uma avaliação e outra, do plantio até a colheita. Plantas monitoradas danificadas foram substituídas por outras plantas com desenvolvimento próximo. Durante as avaliações destrutivas plantas representativas da unidade experimental eram escolhidas aleatoriamente. Plantas que apresentavam sinais de danos ou que não possuíam plantas de bordadura foram evitadas ou descartadas para efeito de amostragem.

Nos experimentos 1 e 2 as avaliações não destrutivas foram realizadas até a colheita, enquanto nos experimentos 3 e 4 as avaliações foram realizadas do plantio até 230 dias após o plantio. Essa interrupção ocorreu em função de desdobramentos da pandemia sobre a rotina de trabalho da unidade de pesquisa onde o trabalho foi desenvolvido. As avaliações destrutivas não foram afetadas, nos experimentos 3 e 4. Contudo, a variedade BRS Formosa foi avaliada apenas até os 270 dias após o plantio, nos experimentos 3 e 4, pois as áreas cultivadas com essa variedade, foram comprometidas em função do apodrecimento das raízes, devido ao excesso de chuvas, que ocorreu entre março e junho de 2020.

Durante as avaliações não destrutivas foram registrados o nível de ramificação da parte aérea, o número médio de ápices por ramificação, o índice de área foliar e o número acumulado de folhas (folhas vivas e cicatrizes foliares). O método de monitoramento não destrutivo adotado foi baseado no protocolo de monitoramento não destrutivo desenvolvido por Cock et al. (2014) para cultura da mandioca.

Os ramos que brotaram a partir do material propagativo foram considerados como nível de ramificação 0. A data da ramificação, relacionada a variável número de ápices por nível de ramificação, foi registrada quando 50% das plantas monitoradas alcançaram o mesmo nível de ramificação.

O índice de área foliar foi obtido pela razão da área foliar média total, de cada planta, pela área ocupada pela planta, considerada para fins de cálculo como a medida de área fixa de 0,72 m², de acordo como o espaçamento adotado no plantio. A área foliar média total foi estimada por meio da média aritmética do produto da área foliar média pelo número total de folhas da planta monitorada. A área foliar média foi estimada, por variedade, a partir

da aplicação de medidas de comprimento e largura do lóbulo central de dez folhas expandidas, por planta monitorada, no modelo apresentado por Guimarães et al. (2019). O número total de folhas da planta foi determinado por meio de contagem. Foram desconsideradas folhas que não estavam totalmente expandidas ou que apresentavam lóbulo central com comprimento inferior a 0,08 m.

Durante as avaliações destrutivas as plantas foram fracionadas em folhas, caules e raízes de reserva. A massa de matéria fresca de cada órgão foi aferida utilizando uma balança de precisão 0,001 kg. Foram coletadas quatro subamostras de aproximadamente 0,20 kg de massa de matéria fresca de folhas, caule e raízes de reserva. As subamostras foram fracionadas em porções menores para facilitar o processo de secagem. A secagem foi realizada em estufa de circulação forçada de ar, em temperatura próxima a 90°C, até que as amostras apresentassem massa de matéria seca constante. A determinação da massa de matéria seca foi realizada com auxílio de uma balança de precisão 0,00001kg. A fitomassa seca total foi obtida pela soma das massas de matéria seca das folhas, caule e raízes de reserva.

Relação dos dados coletados com o processo de calibração do MANIHOT-Cassava

No presente trabalho, o conjunto de dados coletados estão associados de forma direta aos parâmetros de calibração ou apresentam relação com dados de saída do modelo. A relação de variáveis avaliadas no presente trabalho e sua relação com a calibração do MANIHOT-Cassava pode ser verificada no apêndice 5.

Os parâmetros descritos no apêndice 5 são os mesmos contidos no arquivo de informações genéticas sobre as cultivares (.cul) e ecótipo (.eco), da versão 4.7.5.036 do software DSSAT. Detalhes são encontrados na documentação do software DSSAT, de acordo com Hoogenboom et al., (2019) e na descrição do modelo efetuada por Moreno-Cadena, (2018).

Estatística

O conjunto de informações obtidas em campo foi avaliado a partir de conceitos de estatística descritiva clássica. As variáveis observadas, que têm associação com dados de saída avaliados na calibração do modelo MANIHOT-Cassava: nível de ramificação da parte aérea, número acumulado de folhas, índice de área foliar e variáveis de produtividade de massa de matéria seca, foram apresentadas graficamente em termos de tendências de

evolução das médias durante cultivo. Além disso, foram organizados, para esse mesmo grupo de variáveis, apêndices contendo informações sobre os índices estatísticos: média aritmética, coeficiente de variação e erro padrão da média da amostra. Os resultados das demais variáveis, que representam valores associados diretamente à parâmetros de calibração do modelo foram organizados na forma de tabelas contendo informações sobre os índices estatísticos: média aritmética, valor máximo, valor mínimo, coeficiente de variação e erro padrão da média da amostra.

Comentários sobre a aplicação dos dados no processo de calibração e prática de campo

Os comentários sobre a aplicação das variáveis no processo de calibração são baseados no fluxograma de calibração apresentado por Phonchroen et al. (2021), na descrição do modelo efetuada por Moreno-Cadena (2018) e no artigo publicado por Moreno-Cadena et al. (2020) que trata da sensibilidade das variáveis de saída do modelo em relação a parte dos parâmetros de calibração do modelo. Os comentários sobre as práticas de campo, são baseados, exclusivamente, na experiência obtida durante a condução dos experimentos.

Resultados e discussão

Evolução do nível de ramificação da parte aérea

Nas condições do presente trabalho, as plantas monitoradas, independente da variedade, ramificaram, cerca de 3 vezes, durante os 350 dias de avaliação, nos experimentos 1 e 2 e 2 vezes, durante os 230 dias de avaliação não destrutiva nos experimentos 3 e 4. A tendência de crescimento do nível médio de ramificação das plantas, de cada variedade, nos diferentes ensaios pode ser observada na figura 1. Detalhes sobre os índices estatísticos associados a variável, podem ser encontrados no apêndice 6.

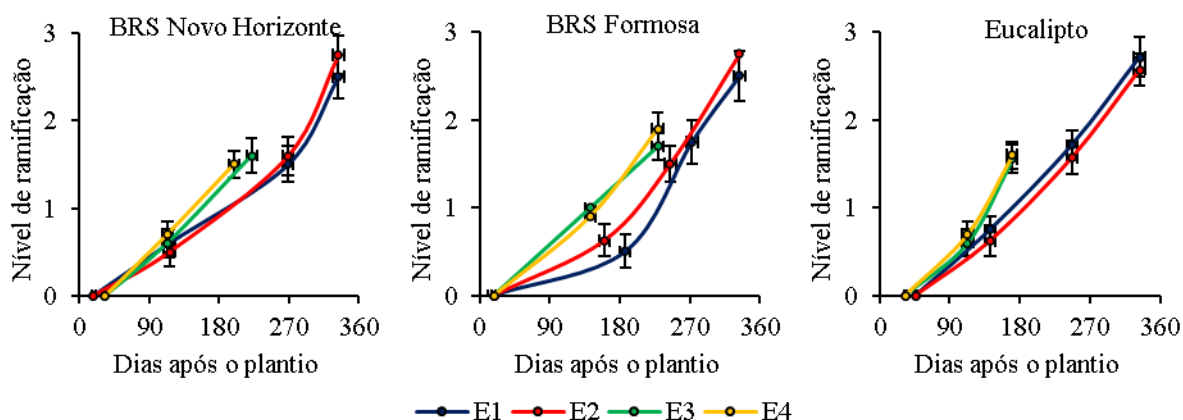


Figura 1. Tendência de crescimento do nível de ramificação da parte aérea por variedade e ensaio. As barras representam o erro padrão da média da amostra. E1: plantio em 04/01/2019, com irrigação complementar do plantio a colheita; E2: plantio em 04/01/2019, com irrigação complementar até os 60 DAP; E3: plantio em 15/09/2019, com irrigação complementar até os 140 DAP; E4: plantio em 15/09/2019; irrigação complementar até os 45 DAP.

Durante os experimentos 1, 2, 3 e 4, independente da variedade, foi registrado que a emergência ocorreu, em média, aos 18 dias após o plantio (DAP). Cerca de metade das plantas monitoradas, alcançou o primeiro nível de ramificação, para os experimentos 1 e 2 e os experimentos 3 e 4, respectivamente, em: 105 e 106 DAP, para variedade BRS Novo Horizonte; 145 e 127 DAP, para variedade BRS Formosa; 127 e 98 DAP, para variedade Eucalipto. O segundo nível de ramificação foi alcançado em: 254 DAP, para os experimentos 1 e 2, e em 207 e 186 DAP, para os experimentos 3 e 4, respectivamente, para variedade BRS Novo Horizonte; 258 e 230 DAP, nos experimentos 1 e 2 e em 187 nos experimentos 3 e 4, para variedade BRS Formosa, respectivamente; 232 e 155 DAP, para variedade eucalipto, nos experimentos 1 e 2 e nos experimentos 3 e 4, respectivamente. O terceiro nível de ramificação foi atingido próximo aos 327 DAP, para todas as variedades avaliadas, nos experimentos 1 e 2.

Ao examinar as médias da quantidade de dias associado a evolução do nível de ramificação das plantas, independente da variedade ou experimento, verificou-se que as plantas começaram a ramificar próximo aos 80 DAP. O intervalo de tempo necessário para que metade das plantas alcançassem um novo nível de ramificação variou para as variedades BRS Novo Horizonte, BRS Formosa e Eucalipto, respectivamente, o intervalo de tempo do plantio ao primeiro nível de ramificação foi em média 105, 136 e 113 dias; o segundo nível de ramificação foi alcançado 120, 81 e 81 dias após as plantas alcançarem o primeiro nível de ramificação; o terceiro nível foi alcançado cerca de 102, 111, 134 após as plantas alcançarem o segundo nível de ramificação.

Conhecer o intervalo de tempo necessário para que os ápices das plantas desenvolvam novos níveis de ramificação é útil, principalmente quando existem vários experimentos em campo, uma vez que essa informação permite direcionar as avaliações para época de cultivo mais apropriada e evitar o retrabalho. Contudo, é importante considerar que cada genótipo apresenta variações de desenvolvimento de acordo com as condições de cultivo.

Phoncharoen et al. (2019 a, b) que investigaram a influência das épocas de plantio no desenvolvimento de variedades de mandioca, cultivadas sob condições ótimas, no clima subtropical da Tailândia e encontraram padrões de tendência de crescimento do nível de ramificação da parte aérea parecidos com os do presente trabalho, defenderam que condições ambientais relacionadas a cada época de plantio, como o fotoperíodo, radiação e temperatura, interagem com cada genótipo e podem impactar no desenvolvimento da parte aérea.

Essa linha de argumentação ajuda a entender a variação entre as médias observadas na figura 2, nos experimentos implantados em janeiro de 2019 (experimentos 1 e 2) e setembro de 2019 (experimentos 3 e 4), uma vez que ocorreram diferenças nas condições ambientais, sobretudo, após os primeiros 120 dias após o plantio, quando as plantas cultivadas nos experimentos 1 e 2, se desenvolviam na época chuvosa, com menor temperatura, radiação acumulada e fotoperíodo em relação aos experimentos 3 e 4, que se desenvolviam na época mais quente, conforme verificado no apêndice 1.

Os maiores coeficientes de variação relacionados ao nível de ramificação da parte aérea foram registrados próximo ao momento em que as plantas alcançaram o primeiro nível de ramificação, independente da variedade (Apêndice 6). Após o primeiro nível, verificou-se que os coeficientes de variação diminuíram. A oscilação dos coeficientes de variação pode ser explicada pelas diferenças de crescimento inicial de cada ápice da planta, pois antes de alcançar a autossuficiência, as plantas dependem das reservas contidas no material propagativo e há competição entre os brotos que emergem do solo e tornam-se ápices (nível de ramificação 0). Por outro lado, uma vez estabelecida, a planta produz quantidade suficiente de fotoassimilados para manutenção do crescimento da parte aérea. Desse modo, diferenças de crescimento iniciais, de cada ápice, tendem a ser atenuadas com a evolução do tempo de cultivo das plantas e a variação tende a cair.

Em relação a prática de campo, comenta-se que a avaliação da evolução do nível de ramificação da parte aérea pode se tornar uma tarefa difícil de executar e tomar mais tempo que o necessário, se não for bem planejada desde o início do cultivo. Para facilitar o processo recomendamos iniciar a avaliação com uma amostra da população de pelo menos

15 plantas, pois se houver problemas com plantas monitoradas, não haverá necessidade de procurar por plantas substitutas, com padrão parecido de desenvolvimento. Além disso, há variação de desenvolvimento entre os ápices das plantas, ou mesmo entre os ápices de uma mesma planta, o que torna importante aumentar o tamanho da amostra afim de melhorar a representatividade de cada avaliação, em especial a relacionada ao primeiro nível de ramificação.

Comenta-se que adotar uma frequência de monitoramento do nível de ramificação da parte aérea das plantas entre dez e quinze dias, pode ajudar a reduzir o erro na estimativa da variável. Intervalos menos espaçados podem ser pouco efetivos, pois é necessário um intervalo de tempo para que as ramificações se desenvolvam ao ponto de serem notadas com facilidade em campo. Por outro lado, intervalos de avaliação mais espaçados dificultam o registro da variável com maior nível de precisão e acurácia.

No processo de calibração do MANIHOT-Cassava os dados associados ao nível de ramificação da parte aérea, número de acumulado de folhas, índice de área foliar e variáveis de fitomassa seca são as variáveis observadas que são usadas para confrontar os dados de saída do modelo, tendo importância primária, de acordo com o exemplo apresentado por Phoncharoen et al. (2021). Por outro lado, obter um conjunto de variáveis que possuam relação direta com os parâmetros de calibração pode ajudar a nortear o processo de calibração e a melhorar o modelo, uma vez que esse conjunto de informações pode ser difícil de encontrar na literatura e possui utilidade para os próprios desenvolvedores do modelo, como verificado no trabalho publicado por Moreno-Cadena et al. (2020).

Em relação a aplicação dos dados no processo de calibração do modelo MANIHOT-Cassava, comentamos que a evolução do nível de ramificação da parte aérea das plantas, está associada ao primeiro conjunto de parâmetros a ser ajustado na calibração, de acordo com o fluxograma de calibração sugerido por Phoncharoen et al., (2021).

Na prática de calibração, o conjunto de parâmetros BxyND, que representam o tempo térmico acumulado entre cada nível de ramificação da parte aérea, é alterado de modo a ajustar a evolução do nível de ramificação de acordo com a época de cultivo em que ocorreu cada evento de ramificação no campo. A partir do ajuste desse conjunto de parâmetros, o modelo identifica o quão precoce é a evolução do nível de ramificação dos ápices da planta. Revisa-se que no modelo, a precocidade com que as ramificações ocorrem, a quantidade de ápices que se desenvolvem em cada nível de ramificação e características relacionadas a folhas, tem impacto na simulação do índice de área foliar (IAF) e fitomassa seca da parte aérea das plantas.

De acordo com Moreno et al. (2018) os parâmetros BxyND variam de acordo com o momento em que a ramificação ocorreu, sendo identificados no arquivo de dados de cultivares (.cul), a partir dos parâmetros B01ND, B12ND, B23ND, B34ND. Por exemplo, o parâmetro B01ND representa o tempo térmico acumulado entre a emergência da planta e a sua primeira ramificação e o B12ND representa o tempo entre a primeira e a segunda ramificação da planta. O modelo assume o mesmo tempo térmico acumulado informado no parâmetro B34ND para ramificações subsequentes.

Comenta-se que o tempo térmico acumulado entre o plantio e a emergência é informado no arquivo de informações ecofisiológicas (.eco), mediante alteração do parâmetro PGERM. Entretanto, esse parâmetro não foi listado por Moreno-Cadena et al., (2020) como uma variável de importância para calibração. O valor de 120 graus dia⁻¹ é o valor padrão para emergência descrito para o parâmetro PGERM. Caso seja um objetivo simular de forma específica o tempo de emergência, as temperaturas cardinais necessárias para calcular o número de graus dia acumulados do plantio a emergência, em cada experimento, podem ser verificados na descrição do modelo efetuada por Moreno-Cadena (2018).

Outro aspecto relevante sobre a calibração dos parâmetros associados ao nível de ramificação da parte aérea das plantas é a possibilidade de tornar o modelo sensível a variações no fotoperíodo, durante a calibração, com o ajuste de parâmetros de sensibilidade ao fotoperíodo (PPS1 e PPS2), no arquivo de informações ecofisiológicas (.eco), a exemplo do trabalho realizado por Phoncharoen et al. (2021).

Determinação da quantidade de ápices que se desenvolveram em cada nível de ramificação

O número de ápices no nível de ramificação 0 variou de 1 a 5, sendo mais comum a presença de plantas dicotômicas ou tricotômicas. Após a emergência foi observado que quando os ápices ramificavam, brotavam de 2 a 4 novos ápices novos, sendo mais comum o desenvolvimento de ramos dicotômicos, que tricotômicos ou tetracotômicos (tabela 1).

Tabela 1. Valores médios, máximos, mínimos, coeficiente de variação e erro padrão da amostra do número de ápices por nível de ramificação da parte aérea das plantas, por variedade e experimento

NR	Experimento 1					Experimento 2					Experimento 3					Experimento 4				
	ME	MX	MI	CV	EP	ME	MX	MI	CV	EP	ME	MX	MI	CV	EP	ME	MX	MI	CV	EP
BRS Nova Horizonte																				
0	2.8	5.0	1.0	26.7	0.2	2.6	5.0	1.0	30.8	0.3	2.5	4.0	1.0	20.0	0.2	2.5	4.0	1.0	32.3	0.3

1	2.2	3.0	2.0	17.2	0.2	2.2	3.0	2.0	18.2	0.2	2.3	3.0	2.0	19.9	0.2	2.4	4.0	2.0	20.3	0.2
2	2.3	3.0	2.0	20.2	0.3	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.2	3.0	2.0	18.2	0.2	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0
3	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0										
BRS Formosa																				
0	2.4	4.0	1.0	47.5	0.5	2.4	4.0	1.0	47.5	0.5	2.9	5.0	1.0	38.0	0.4	2.7	5.0	1.0	33.2	0.3
1	2.3	3.0	2.0	22.2	0.3	2.2	3.0	2.0	20.3	0.2	2.3	3.0	2.0	20.6	0.2	2.3	3.0	2.0	21.4	0.2
2	2.3	3.0	2.0	24.7	0.3	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.4	4.0	2.0	22.0	0.2	2.4	3.0	2.0	21.8	0.2
3	2.3	3.0	2.0	24.7	0.4	2.5	3.0	2.0	28.3	0.5										
Eucalipto																				
0	2.6	4.0	1.0	42.3	0.4	2.9	5.0	1.0	50.5	0.5	2.5	4.0	1.0	36.9	0.3	2.2	3.0	1.0	38.2	0.3
1	2.3	3.0	2.0	20.2	0.2	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.2	3.0	2.0	24.7	0.2	2.3	3.0	2.0	19.8	0.2
2	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.3	3.0	2.0	20.2	0.2	2.2	3.0	2.0	18.2	0.2
3	2.2	3.0	2.0	18.2	0.2	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0										

NR: nível de ramificação; ME: média aritmética; MX: valor máximo; MI: valor mínimo; CV: coeficiente de variação em percentagem; EP: erro padrão da média da amostra

De modo geral, houve pouca variação, após a emergência das plantas, do número de ápices por nível de ramificação da parte aérea. A quantidade de ápices que emergiu do solo, no nível de ramificação 0, apresentou, na maioria dos ensaios, os maiores coeficientes de variação. Entretanto, justifica-se que o material propagativo utilizado no plantio possuía um padrão parecido de comprimento e número de gemas axilares, sendo a variação verificada, no nível de ramificação 0, algo de natureza aleatória.

Com base na experiência adquirida em campo, comentamos que é mais prático executar a avaliação da variável número de ápices por nível de ramificação da parte aérea próximo da colheita final, pois o número de ápices por nível de ramificação não muda com o tempo. A amostragem também é facilitada, uma vez que mais plantas tendem a alcançar a mesma quantidade de níveis de ramificação e é possível avaliar todos os níveis de ramificação em uma única avaliação.

O modelo MANIHOT-Cassava utiliza uma lógica de espelhamento para simular o crescimento da parte aérea das plantas, em que sempre que um ápice ramifica os demais ápices, no mesmo nível de ramificação da planta, também ramificam. A mesma lógica é aplicada a quantidade de folhas acumuladas, unidades básicas de crescimento do modelo, também chamadas de nós, conforme a descrição realizada por Moreno-Cadena (2020).

O número observado de ápices por nível de ramificação da parte aérea tem relação direta com parâmetros de calibração que representam o número de ápices que ocorreram em cada evento de ramificação (BRyFX). Comenta-se, que o conjunto de parâmetros BR1FX, BR2FX, BR3FX e BR4FX estão associados, em sequência correspondente, ao conjunto de parâmetros que identificam o tempo térmico acumulado entre ramificações B01ND, B12ND, B23ND e B34ND. A variável de saída do modelo que pode ser associada com os parâmetros BRyFX é o número de ápices planta⁻¹.

Entretanto, explica-se que os valores dos dados simulados associados ao número de ápices e de folhas acumulado, representam apenas o que ocorre em uma sequência de ramos avaliados em cada planta, de acordo com a metodologia de avaliação proposta por Cock et al. (2014). De forma mais específica, o modelo não considera no cálculo do valor simulado do número de ápices planta⁻¹ o número de ápices que emergiram do solo a partir do material propagativo (nível de ramificação 0) e tampouco simula o que ocorre em termos de produção acumulada de folhas da planta inteira.

O número de ápices que emergiram do solo a partir do material propagativo pode ser informado em cada um dos arquivos de informações experimentais (.csx), na seção de informações de plantio. A informação está associada ao parâmetro PLPH, que não é considerado um parâmetro de calibração. Contudo, comenta-se que variações nesse parâmetro, apesar de não influenciar nos dados de saída número de ápices planta⁻¹, interferem no resultado das simulações de crescimento da planta, como a da variável índice de área foliar (IAF). A massa seca do material propagativo, que caracteriza a qualidade das manivas usadas no plantio para o modelo, também pode influenciar no resultado das simulações. Comenta-se que um valor alto de cerca de 400 kg ha⁻¹, pode anular as penalidades sobre o crescimento das plantas relacionadas ao material propagativo, segundo orientações dos desenvolvedores do modelo.

Evolução do número acumulado de folhas

As tendências de crescimento do número acumulado de folhas apresentadas pelas variedades foram parecidas para BRS Formosa e Eucalipto, que apresentaram uma queda acentuada na produção de folhas a partir dos 200 DAP. A variedade BRS Novo Horizonte apresentou uma tendência de crescimento praticamente linear, durante todo ciclo, nos quatro ensaios avaliados.

Também foi observada uma variação na produção de folhas das variedades, entre os experimentos semeados em 04/01/2019 (Experimentos 1 e 2) e os semeados em 15/07/2019 (Experimentos 3 e 4). Essa variação, que foi mais intensa para BRS Novo Horizonte e, provavelmente, também está relacionada as variações nas condições ambientais que ocorreram em função das épocas de plantio.

Em relação a quantidade de folhas produzidas durante o período de cultivo avaliado: a variedade BRS Novo Horizonte, produziu, no ramo monitorado, cerca de 159 e 166 folhas, aos 334 DAP, nos experimentos 1 e 2, respectivamente e nos experimentos 3 e 4, produziu cerca de 191 e 183 folhas, aos 360 DAP. A BRS Formosa, produziu cerca de 115 e 108

folhas até os 334 DAP, nos experimentos 1 e 2, respectivamente. Enquanto nos experimentos 3 e 4, a mesma variedade produziu, até os 229 DAP, 93 e 86 folhas, respectivamente. A variedade Eucalipto produziu 145 e 139 folhas, até os 334 DAP, nos experimentos 1 e 2, respectivamente, e 140 e 150 folhas, até os 360 DAP nos experimentos 3 e 4, respectivamente.

A tendência de crescimento do número acumulado de folhas no ramo monitorado de cada variedade, por experimento, pode ser verificado na figura 2. Os índices estatísticos relacionados a variável são apresentados no apêndice 7.

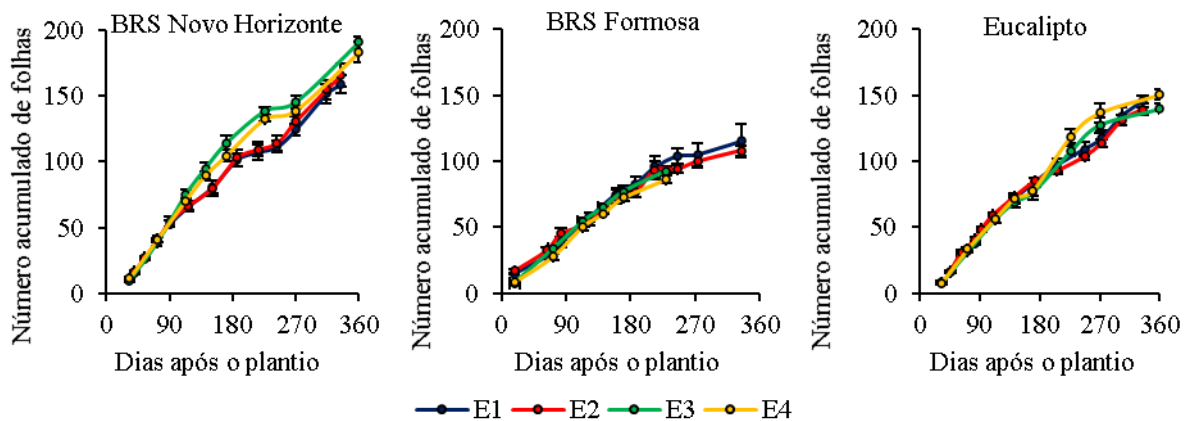


Figura 2. Evolução do número acumulado de folhas no ramo monitorado, por variedade e experimento. As barras representam o erro padrão da média da amostra. E1: plantio em 04/01/2019, com irrigação complementar do plantio a colheita; E1: experimento 1; E2: experimento 2; E3: experimento 3; E4: experimento 4

Na prática de campo relacionada a avaliação do número de folhas acumulado das plantas sugere-se realizar o processo junto com as variáveis de fitomassa, durante a colheita, a partir do momento em que as plantas apresentarem estatura que dificulte a contagem das cicatrizes foliares e folhas, uma vez que as plantas podem atingir cerca de 2 metros de altura próximo dos 180 DAP e pode ser difícil avaliar as plantas sem uso de escadas. Comenta-se que essa prática é arriscada, principalmente na época chuvosa. Além disso, é um transtorno transportar o equipamento em plantações adensadas e perde-se tempo. Por outro lado, a avaliação da variável pode ser facilitada durante a colheita, pois há possibilidade de fracionar os ramos da planta e destacar as folhas dos ápices avaliados sem uso de qualquer equipamento.

O número acumulado de folhas é a variável observada em campo que é utilizada para a identificar a intensidade com que cada variedade produz folhas. Essa característica, está associada no modelo ao parâmetro de calibração que controla a taxa de formação de folhas (LNSLP). Na prática de calibração, o valor de LNSLP é alterado de forma a ajustar a curva de crescimento que simula o número acumulado de folhas de acordo com a tendência

de crescimento observada em campo para a variável número acumulado de folhas (Moreno-Cadena et al., 2020).

Moreno-Cadena (2018) explica que valores de LNSLP iguais ou inferiores a 0.8 indicam que a planta apresenta baixa taxa de formação de folhas, valores iguais a 1 indicam taxa de formação média, enquanto valores iguais ou superiores a 1.2 indicam uma alta taxa de formação de folhas. A autora também explica que o modelo adota uma equação de taxa de crescimento saturado para calcular a taxa de formação de folhas durante cultivo. Desse modo, na medida em que o tempo de cultivo avança o modelo tende a simular uma retração na taxa produção de folhas, como verificado em campo para as variedades BRS Formosa e Eucalipto.

Por outro lado, como o modelo não foi desenvolvido para simular variedades que apresentam taxas de crescimento de folhas relativamente constantes é possível que variedades que não ramificam ou as variedades que apresentem alto vigor na produção de folhas apresentem menor correlação entre os dados simulados e observados, na medida que o tempo de cultivo avança.

Determinação das características das folhas e do caule

As características das folhas e do caule variaram em função das diferenças morfoanatômicas apresentadas por cada variedade. Os índices estatísticos relacionados às características das folhas e caule, são apresentados em detalhes nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Valores médios, máximos, mínimos, coeficiente de variação e erro padrão da amostra das características foliares por variedade

Varietade	Variável	Unidade	Média	Máximo	Mínimo	CV	EP
BRS Novo Horizonte	Área foliar	cm ²	276.47	409.19	185.87	22.65	13.66
	Área foliar específica	cm ² g ⁻¹	140.42	198.18	111.02	12.73	3.90
	Percentagem de pecíolo na folha	%	19.32	22.70	15.67	8.58	0.36
BRS Formosa	Área foliar	cm ²	137.16	206.86	97.85	18.35	5.49
	Área foliar específica	cm ² g ⁻¹	218.99	250.46	190.47	8.71	4.13
	Percentagem de pecíolo na folha	%	19.00	27.00	13.00	17.42	0.70
Eucalipto	Área foliar	cm ²	170.71	242.54	104.35	22.00	8.31
	Área foliar específica	cm ² g ⁻¹	169.08	225.59	112.4	19.00	6.93
	Percentagem de pecíolo na folha	%	16.18	22.41	11.86	16.11	0.60

CV: coeficiente de variação em percentagem; EP: erro padrão da média da amostra

Tabela 3. Valores médios, máximos, mínimos, coeficiente de variação e erro padrão da amostra das características do caule por variedade

Varietade	Variável	Unidade	Média	Máximo	Mínimo	CV	EP
	Massa individual de nó	g	4.48	7.72	2.28	33.24	0.42

BRS Novo Horizonte	Espaço entre nós	cm	2.45	4.00	1.67	24.84	0.16
BRS Formosa	Massa individual de nó	g	2.83	5.08	1.33	38.00	0.38
	Espaço entre nós	cm	2.30	3.33	1.67	24.99	0.13
Eucalipto	Massa individual de nó	g	4.89	6.64	3.20	32.00	0.29
	Espaço entre nós	cm	3.11	4.00	2.50	21.00	0.14

CV: coeficiente de variação em percentagem; EP: erro padrão da média da amostra

No planejamento da prática de campo envolvendo a avaliação das características de folhas e caule, deve-se ter em mente que no modelo os parâmetros relacionados a esse conjunto de variáveis, como a área foliar máxima e massa individual de um nó, estão associados a valores exatos de tempo térmico acumulado, conforme Moreno-Cadena (2018). Dessa forma, as avaliações devem ser planejadas de modo a ocorrer próximo à época de cultivo correspondente ao tempo térmico acumulado.

Para avaliar as características das folhas, é importante adotar um padrão de amostragem, pois há bastante variação entre o desenvolvimento das folhas em função de sua posição nos ramos da planta. Pode ser mais prático avaliar as primeiras folhas expandidas, conforme descrito por Cock et al. (2014), por exemplo.

Em relação a amostragem das secções de caule é importante coletar material que esteja lignificado e que não esteja muito próximo do colo da planta, pois próximo do solo o caule apresenta, normalmente, hipertrofia, com maior massa e menor espaço entre nós que em outras partes lignificadas da planta.

Na calibração, os parâmetros associados as características das folhas interferem diretamente na simulação do IAF e produção de fitomassa da parte aérea. Enquanto os parâmetros relacionados as características do caule podem interferir na simulação da distribuição de fitomassa entre o caule e raízes de reserva das plantas.

A área foliar, observada em campo, têm associação com o parâmetro que identifica área foliar máxima (LAXS), que é um dos parâmetros que mais interferem na simulação do IAF (MORENO-CADENA et al., 2020). De forma parecida, as variáveis observadas área foliar específica e proporção de massa seca entre o pecíolo e folha completa estão associadas aos parâmetros SLAS e LPEFR. As características do caule massa seca individual do nó e comprimento entre nós, estão associadas aos parâmetros NODWT e NODLT, respectivamente.

A única variável não avaliada, no presente trabalho, com relação direta à um parâmetro de calibração ligado as variedades, foi a longevidade foliar. Essa variável, assim como os outros parâmetros relacionados as folhas, influenciam na simulação do IAF e fitomassa seca da parte aérea, uma vez que tem relação com a intensidade com que as plantas perdem folhas. No modelo, o parâmetro relacionado a longevidade foliar é o LLIFA,

que representa o tempo térmico acumulado entre a expansão foliar completa e o início da senescência de uma folha.

Evolução do índice de área foliar e da produção acumulada de fitomassa seca de folhas, caule e raízes de reserva

Nos experimentos 1 e 2 os valores máximos de IAF, independente da variedade, foram alcançados entre 120 e 150 DAP. Nesses experimentos, as variedades BRS Novo Horizonte, BRS Formosa e Eucalipto, registraram valores máximos de IAF próximos a 5, 2 e 4, respectivamente. Nos experimentos 3 e 4, ocorreram variações nas épocas de cultivo em que as plantas alcançaram o valor máximo de IAF para BRS Novo Horizonte, que alcançou IAF máximo próximo a 6, entre 140 e 170 DAP para o experimento 3; e entre 170 e 226 DAP para o experimento 4. A BRS Formosa e Eucalipto, apresentaram IAF máximo próximo a 3 e a 5, respectivamente, entre os 140 e 170 DAP, para os experimentos 3 e 4.

Verificou-se que o índice de área foliar (IAF) apresentou crescimento intenso até próximo do intervalo entre 120 e 180 DAP, independente da condição de cultivo. Contudo, próximo ao inverno, entre 180 e 270 DAP, para os experimentos 1 e 2, e entre 270 e 360 DAP, para os experimentos 3 e 4, apresentou uma tendência de redução. As tendências de crescimento relacionadas ao IAF são apresentadas por experimento e variedade na figura 3. Os índices estatísticos associados ao IAF são apresentados em detalhes no apêndice 8.

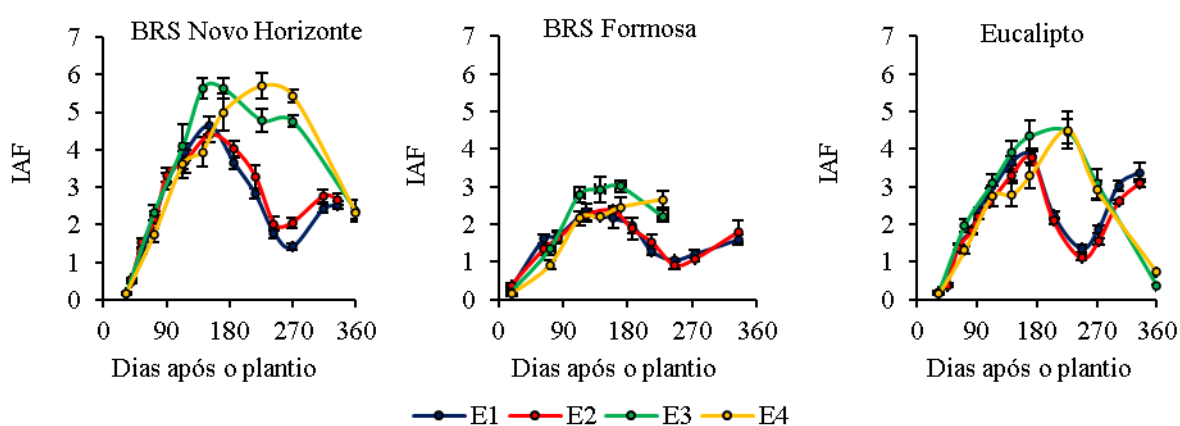


Figura 3. Evolução do índice de área foliar (IAF), por variedade e experimento. As barras representam o erro padrão da média da amostra. E1: experimento 1; E2: experimento 2; E3: experimento 3; E4: experimento 4

A evolução da tendência de crescimento com incremento acentuado do índice de área foliar seguido por uma fase de queda é comum na cultura da mandioca, pois na medida em que as plantas desenvolvem seu dossel foliar o sombreamento das folhas aumenta e há tendência de incremento na senescência (Alves et al., 2006). Contudo, a dinâmica do

IAF pode variar em função do genótipo e das condições ambientais em que o cultivo foi conduzido, como verificado a partir dados de IAF apresentados por Phoncharoen et al. (2019a, 2021), para variedades de alto potencial produtivo, em diferentes épocas de plantio, no clima tropical da Tailândia.

A produção de fitomassa seca total variou entre cada variedade, alcançando valores, na colheita final, próximos a 35 e 40 t ha⁻¹, para BRS Novo Horizonte; 28 t ha⁻¹, para BRS Formosa e 20 a 23 t ha⁻¹, para Eucalipto. A produção de fitomassa seca de folhas acompanhou a tendência de crescimento do IAF, apresentando variações durante o ciclo de cultivo e experimento, de acordo com a dinâmica de produção e senescência de folhas. A produção de massa seca de caule variou entre 15 e 20 t ha⁻¹, para BRS Novo Horizonte; 9 t ha⁻¹, para BRS Formosa e 9 a 13 t ha⁻¹, para Eucalipto. Finalmente, a produção de fitomassa seca de raízes de reserva variou entre 16 e 21 t ha⁻¹, para BRS Novo Horizonte; 17 e 18 t ha⁻¹, para BRS Formosa e 9 a 11 t ha⁻¹, para Eucalipto.

Em relação ao teor de massa seca nas raízes de reserva as variedades BRS Novo Horizonte, BRS Formosa e Eucalipto atingiram conteúdos próximos a 39, 35 e 31%, respectivamente, na colheita final, próximo aos 350 DAP.

As tendências de crescimento relacionadas as variáveis de produção de fitomassa seca são apresentadas por experimento e variedade na figura 4. Os índices estatísticos associados a produção acumulada de fitomassa seca total e seu fracionamento em folhas, caule e raízes de reserva são apresentados em detalhes nos apêndices 9, 10, 11 e 12, respectivamente.

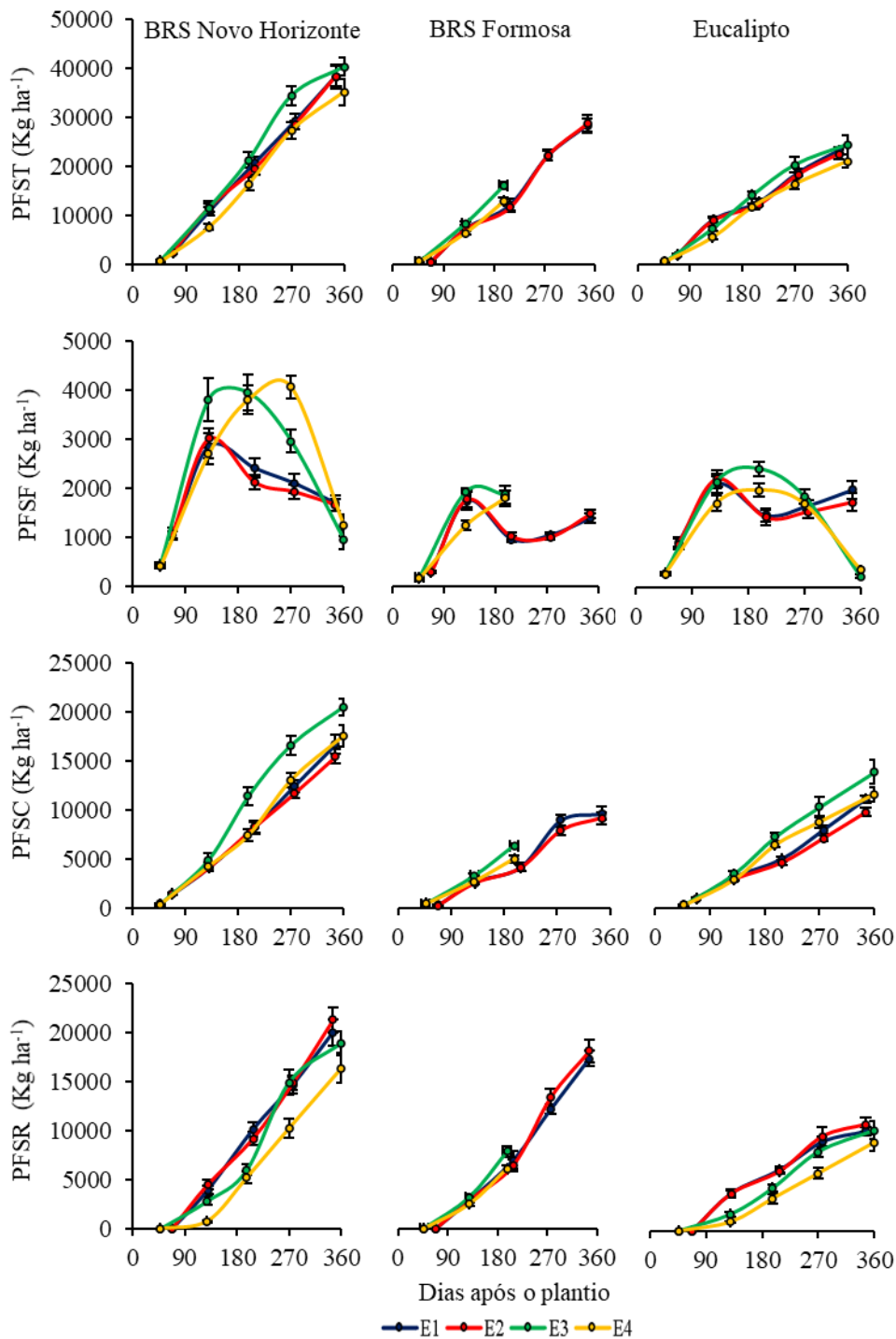


Figura 4. Evolução da produtividade de fitomassa seca total (PFST) e sua distribuição entre folhas (PFSF), caule (PFSC) e raízes de reserva (PFSR), por variedade e experimento. As barras representam o erro padrão da média da amostra. E1: experimento 1; E2: experimento 2; E3: experimento 3; E4: experimento 4

Ao examinar as diferenças entre os resultados dos experimentos semeados em janeiro de 2019 (experimentos 1 e 2) e setembro de 2019 (experimentos 3 e 4), verificou-se uma diferença entre as tendências de crescimento do IAF e produção de fitomassa seca,

que ocorreram, provavelmente, em função das variações nas condições ambientais decorrentes das épocas de plantio. Variações na evolução do IAF e produção de fitomassa seca no cultivo da mandioca, em condição tropical, associadas a épocas de plantio, também foram registradas por Phoncharoen et. al. (2019 a, b) que discutiu o efeito das variações no clima na evolução do nível de ramificação das plantas, IAF e produção de fitomassa seca.

Em relação ao comportamento das variáveis em relação a oferta hídrica comenta-se que, independente da variedade, houve pouca variação nas tendências de crescimento do IAF e produção acumulada de fitomassa seca entre os experimentos 1 e 2, cultivados em janeiro de 2019, pois, apesar do experimento 1 ter sido irrigado do plantio a colheita, o período de chuvas começou próximo aos 80 DAP, atenuando o efeito da restrição hídrica imposta ao experimento 2, que foi irrigado até os 60 DAP. Em contraste, houve maior diferença na oferta hídrica entre os experimentos 3 e 4, cultivados em setembro de 2019, pois o experimento 4 foi irrigado apenas até os 45 DAP. Após esse período, na época seca, as chuvas foram mais espaçadas e concentradas, logo houve maior estresse no experimento 4 que no experimento 3, que foi irrigado até próximo dos 140 DAP, quando teve início o período de chuvas, conforme o apêndice 1.

A restrição hídrica pode penalizar no desenvolvimento e crescimento das plantas, pois a hidratação dos tecidos é uma das condições para que o processo de expansão e alongamento celular ocorra adequadamente. O efeito prático da restrição hídrica, pode ser verificado na redução da área foliar e na redução do crescimento dos ápices da mandioca. Além disso, a depender do tempo de exposição ao estresse, também pode ocorrer transtornos de ordem metabólica e fisiológica, associados a redução da produção de fotoassimilados, em especial quando a exposição ao déficit hídrico é associada a um alto déficit de pressão de vapor e temperaturas elevadas. Sendo esta uma condição comum a eventos de estiagem mais prolongada que ocorrem na época mais seca na região em que os experimentos foram avaliados.

O levantamento de dados envolvendo o registro do IAF e fitomassa seca das plantas, nas condições desses experimentos, representou o conjunto de dados mais difícil de avaliar e que tomaram, portanto, mais tempo em campo. As dificuldades no registro do IAF ocorreram em função do método selecionado que se mostrou pouco eficaz e muito trabalhoso. Sugere-se avaliar outras práticas para avaliação dessa variável, como métodos envolvendo aplicação de instrumentação, para avaliações não destrutivas, a exemplo do que foi realizado por Rankine et al., (2021), que utilizou um ceptômetro para avaliar o IAF de plantas de mandioca na Jamaica, ou, para avaliações destrutivas, o método aplicado

por Phoncharoen et al. (2019b), que estimou o IAF com base na relação entre área foliar específica e massa seca de folhas.

Na determinação da fitomassa seca das plantas, é importante ganhar tempo para avaliar o máximo de plantas em cada ensaio, pois na medida que o tempo de cultivo avança as plantas crescem e a avaliação torna-se mais demorada e complicada em campo. A sugestão é utilizar subamostras, a exemplo de Phoncharoen et al. (2019b), para avaliar o conteúdo de água em cada órgão da planta, para mais tarde estimar a fitomassa seca de cada órgão e focar na avaliação da fitomassa fresca do maior número possível de plantas, principalmente na colheita final.

Em relação ao processo de calibração, é importante comentar que, além do conjunto de parâmetros associados as características de desenvolvimento da parte aérea, folhas e caule, que completam os parâmetros contidos no arquivo de informações sobre as variedades (.cul), também é comum ajustar parâmetros no arquivo de informações ecofisiológicas (.eco), associados a interceptação de luz pelo dossel da planta (KCAN) e eficiência na conversão de radiação fotossinteticamente ativa (PARUE), para melhorar a simulação do IAF e produção de fitomassa seca da planta, a exemplo do trabalho de Phoncharoen et al (2021).

O KCAN é ajustado, se necessário, após os parâmetros de características foliares, com objetivo de ajustar as tendências de crescimento associadas a evolução do IAF e fitomassa seca de folhas. O PARUE é alterado após ajustar os parâmetros de caule de acordo as tendências de crescimento da fitomassa seca do caule, caso a simulação da produção de fitomassa seca total não esteja coerente com os valores observados.

Finalmente, após ajustar todos os parâmetros, de acordo com os dados de saída da parte aérea, verifica-se se a simulação da produção de fitomassa seca de raízes de reserva está adequada. Do contrário, reavaliam-se os parâmetros associados as simulações do índice de área foliar e produção de massa seca do caule de modo a melhorar a correlação entre os dados simulados e observados de produção de fitomassa seca raízes de reserva.

Outra possibilidade, utilizada por Rankine et al. (2021), para melhorar a correlação na simulação da produção da fitomassa seca raízes de reserva é avaliar ajustes em outros parâmetros do arquivo de informações ecofisiológicas como o conteúdo de matéria seca no produto de colheita (HMPC) e a fração de remobilização de carboidratos das raízes de reserva para a parte aérea (RSUSE).

Considerações finais

As variedades avaliadas apresentaram tendências de crescimento parecidas relacionadas ao hábito de ramificação da parte aérea e quantidade de ápices por nível de ramificação. Entretanto, foram registradas diferenças nas tendências de crescimento associadas a produção de folhas, índice de área foliar e produção de fitomassa seca. As variações estão relacionadas a fatores genéticos ligados a diferenças morfológicas e de potencial produtivo entre as variedades. Além disso, também foram verificadas possíveis variações nas tendências de crescimento das variáveis relacionadas a oferta hídrica e épocas de plantio em que os experimentos foram cultivados.

A avaliação das variedades, em locais diferentes, em mais épocas de plantio e condições de oferta hídrica mais limitadas podem ser exploradas em novos trabalhos com a finalidade de aumentar a sensibilidade da calibração a variações na condição de cultivo relacionada a essas fontes de variação.

Referências bibliográficas

Allen, R. G. et al. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 300 p., 1998.

Alves, A. A. C. Fisiologia da mandioca. In: Souza, L. S. et al. (Ed.) **Aspectos agrônômicos e socioeconômicos da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, p.138-169, 2006.

Bester, A. U. et al. Three decades of cassava cultivation in Brazil: Potentialities and perspectives. **Revista Colombiana de Ciências Hortícolas**, v. 15, n. 2, p. 1-11, 2021.

Cock, J. H. et al. **Non-destructive monitoring system in cassava**. Colombia: International Center for Tropical Agriculture y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 29 p. 2014.

Coelho Filho, M. A. **Irrigação da cultura da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 12 p., 2020.

Guimarães, M. J. M. Modelos matemáticos para a estimativa da área foliar de mandioca. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 62, p. 1-5, 2019.

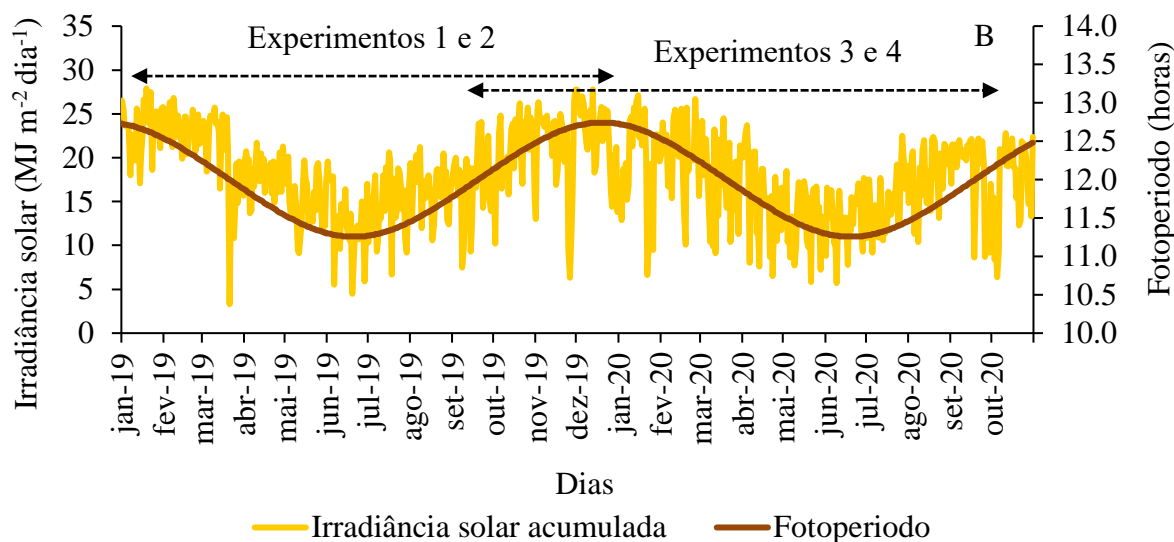
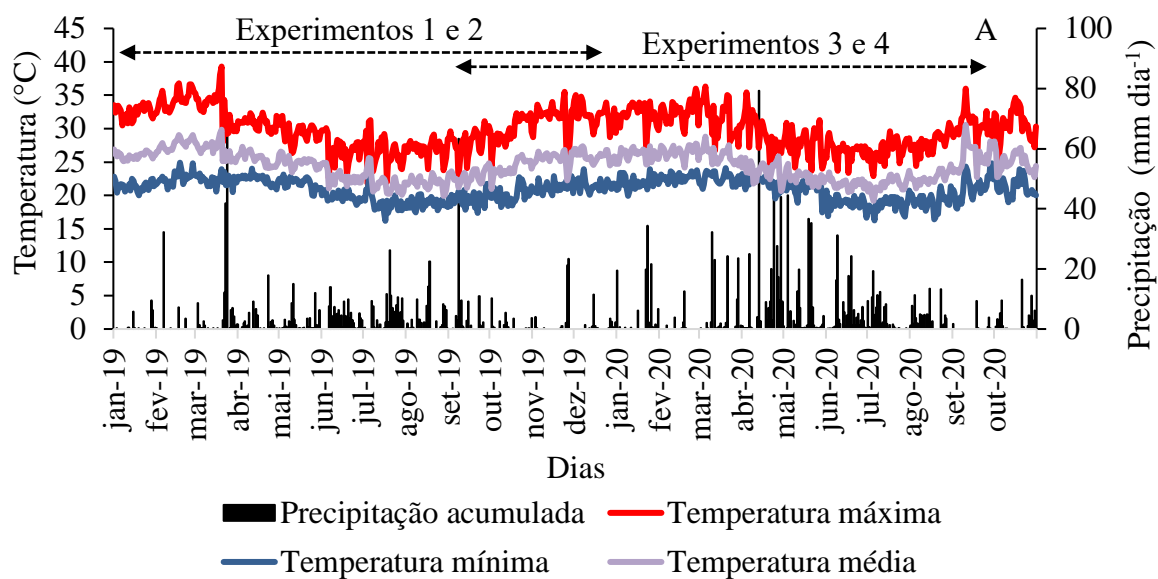
Hoogenboom, G. et al. The DSSAT crop modeling ecosystem. In: K.J. Boote. **Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture**. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, United Kingdom, 2019.

Moreno-Cadena, L. P. et al. Importance of genetic parameters and uncertainty of MANIHOT, a new mechanistic cassava simulation model. **European Journal of Agronomy**, 115, 2020.

Moreno-Cadena, L. P. **Modelo de simulación de yuca (Manihot esculenta Crantz) en el trópico**. Dissertação (Mestrado em Fisiologia dos cultivos). Palmira: Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2018.

- Moreno-Cadena, P. et al. Modeling growth, development and yield of cassava: A review. **Field Crops Research**, v. 267, p. 1-13, 2021.
- Oliveira, E. J. et al. BRS Novo Horizonte-a new cassava variety for industrial use. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 20, 2020.
- Oliveira, E. J. et al. BRS Novo Horizonte-a new cassava variety for industrial use. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, p. 1-5, 2020.
- Phoncharoen, P. et al. Growth rates and yields of cassava at different planting dates in a tropical savanna climate. **Scientia Agricola**, v. 76, 376-388, 2019 b.
- Phoncharoen, P. et al. Performance of the CSM–MANIHOT–Cassava model for simulating planting date response of cassava genotypes. **Field Crops Research**, v. 264, n. 1, p. 1-15, 2021
- Phoncharoen, P. et al. The impact of seasonal environments in a tropical savanna climate on forking, leaf area index, and biomass of cassava genotypes. **Agronomy**, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2019.
- Rankine, D. et al. Evaluation of DSSAT-MANIHOT-Cassava model to determine potential irrigation benefits for cassava in Jamaica. **Agronomy Journal On-line First Paper**, 1-18, 2021.
- Sentelhas, P. C. et al. Yield gap: conceitos, definições e exemplos. **Informações Agronômicas**, n. 155, p. 9-12, 2016.
- Silva, D.V. et al. Manejo de plantas daninhas na cultura da mandioca. **Planta daninha**, v. 30, n. 4, p. 901-910, 2012.
- Souza, L. S. et al. **Recomendação de calagem e adubação para o cultivo da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2009.
- Souza, L. S.; Souza, L.D. **Caracterização físico-hídrica de solos da área do Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura Tropical**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2001.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa em Solos da Embrapa: Rio de Janeiro, 2017.
- Wallach, D., et al. The chaos in calibrating crop models: Lessons learned from a multi-model calibration exercise. **Environmental Modelling & Software**, v. 145, p 1-14, 2021.

Apêndices



Apêndice 1. Registro diário de precipitação pluviométrica, temperatura média, máxima e mínima (A) e irradiância solar e fotoperíodo (B), entre janeiro de 2019 e outubro de 2020, em Cruz das Almas-BA.

Apêndice 2. Caracterização dos atributos físico hídricos do solo da área experimental realizada por Souza e Souza (2001)

Prof. (metros)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	DS kg dm ⁻³	PT (%)	Θ^1 (cm ³ cm ⁻³)					CH (cm h ⁻¹)	M.O. (g kg ⁻¹)
						10	33	100	300	1500		
0,00-0,20	73,20	8,20	18,10	1,67	34	0,178	0,176	0,158	0,133	0,098	5,76	12,00
0,20-0,40	62,90	6,80	30,30	1,66	34	0,196	0,194	0,184	0,171	0,151	1,63	6,00
0,40-0,70	60,00	7,70	32,30	1,43	42	0,190	0,184	0,159	0,140	0,132	7,20	3,00
0,70-1,00	53,30	8,10	38,40	1,39	42	0,210	0,204	0,168	0,152	0,143	7,42	3,00
1,00-1,40	46,70	12,70	40,60	1,35	43	0,228	0,216	0,190	0,168	0,153	8,35	2,00
1,40>=	45,90	9,60	44,50	1,43	39	0,219	0,206	0,174	0,159	0,161	8,71	2,00

Prof.: profundidade; Ds: densidade do solo; Pt: porosidade total; 1:Tensões em kPa; CH: condutividade hidráulica saturada; MO: matéria orgânica; As análises dos atributos físico hídricos do solo foram realizadas no laboratório de física do solo da Embrapa Mandioca e Fruticultura, seguindo a metodologia descrita por Texeira et al. (2017)

Apêndice 3. Resultado da análise dos atributos químicos do solo da área experimental

Experimento	Prof.	pH	P	K	Ca	Mg	Na	H+Al	SB	CTC	V	MOS
	(metros)	(água)	(mg dm ⁻³)					(cmol _c dm ⁻³)				(g kg ⁻¹)
1 e 2	0,00–0,20	7,00	38,00	0,31	2,47	1,14	0,05	0,00	3,90	3,90	100	17,00
	0,20–0,50	7,00	25,00	0,24	2,02	1,00	0,13	0,00	3,45	3,45	100	13,00
3 e 4	0,00–0,20	6,50	52,00	0,33	1,96	0,85	0,14	1,54	3,29	4,83	68	14,00
	0,20–0,50	5,70	39,00	0,19	1,39	0,65	0,07	2,42	2,30	4,72	50	10,00

1: Solo coletado em outubro de 2018, para os experimentos 1 e 2. Solo coletado e em julho de 2019, para os experimentos 3 e 4, em Cruz das Almas-BA. As análises dos atributos físico hídricos do solo foram realizadas no laboratório de química do solo e nutrição de plantas da Embrapa Mandioca e Fruticultura, seguindo a metodologia descrita por Texeira et al. (2017)

Apêndice 4. Datas em que houve irrigação e lâmina de água aplicada, por experimento

Data	E1	E2	Lâmina (mm)	Data	E3	E4	Lâmina (mm)
04/01/2019	X	X	10.80	20/09/2019	X	X	6.40
07/01/2019	X	X	13.00	01/10/2019	X	X	6.40
11/01/2019	X	X	6.00	08/10/2019	X	X	9.50
14/01/2019	X	X	6.00	16/10/2019	X	X	9.00
18/01/2019	X	X	18.00	22/10/2019	X	X	9.00
23/01/2019	X	X	8.40	25/10/2019	X	X	9.00
25/01/2019	X	X	7.20	29/10/2019	X	X	8.30
28/01/2019	X	X	5.40	01/11/2019	X		6.20
31/01/2019	X	X	9.00	05/11/2019	X		2.00
04/02/2019	X	X	9.60	07/11/2019	X		12.40
11/02/2019	X	X	8.40	12/11/2019	X		12.40
16/02/2019	X	X	18.00	17/11/2019	X		9.50
18/02/2019	X	X	4.80	20/11/2019	X		15.90
22/02/2019	X	X	7.20	22/11/2019	X		6.40
25/02/2019	X	X	10.80	03/12/2019	X		18.00
02/03/2019	X	X	18.00	10/12/2019	X		18.00
08/03/2019	X		10.80	12/12/2019	X		12.00
12/03/2019	X		9.00	17/12/2019	X		6.00
15/03/2019	X		7.20	19/12/2019	X		12.00
18/03/2019	X		16.80	23/12/2019	X		18.00
22/10/2019	X		21.60	27/12/2019	X		6.00
01/11/2019	X		3.60	07/01/2020	X		18.00
07/11/2019	X		18.00	10/01/2020	X		12.00
15/11/2019	X		10.80	14/01/2020	X		24.00
17/11/2019	X		10.80	03/02/2020	X		12.00
23/11/2019	X		18.00	07/02/2020	X		18.00
03/12/2019	X		10.80	11/02/2020	X		18.00

17/02/2020	X	18.00
26/02/2020	X	18.00
03/03/2020	X	24.00

E1: plantio em 04/01/2019, com irrigação complementar do plantio a colheita; E2: plantio em 04/01/2019, com irrigação complementar até os 60 DAP; E3: plantio em 15/09/2019, com irrigação complementar até os 210 DAP; E4: plantio em 15/09/2019; irrigação complementar até os 30 DAP.

Apêndice 5. Relação das variáveis avaliadas, descrição de sua aplicação na calibração do modelo MANIHOT-Cassava

Variável observada	² Aplicação da variável observada na calibração	² Variável simulada alvo
Nível de ramificação da parte aérea	É utilizada na comparação com os dados simulados de estágio de crescimento e no ajuste dos parâmetros de calibração relacionados ao tempo térmico entre cada evento de ramificação (B01ND, B12ND, B23ND, B34ND)	Estágio de crescimento (GSTD)
Número de ápices por nível de ramificação	É utilizado no ajuste dos parâmetros de calibração relacionados ao número de ápices por estágio de crescimento (BR1FX, BR2FX, BR3FX e BR4FX). Também pode ser utilizado para avaliar a simulação do número de ápices da planta (S#PD).	Número de ápices por planta (S#PD)
Número acumulado de folhas	É utilizada na comparação com os dados simulados de número acumulado de folhas (L#SD) e no ajuste do parâmetro de calibração relacionados a taxa de formação de folhas (LNSLP)	Número de folhas (L#SD)
Massa seca de folhas	É utilizada na comparação com os dados simulados de massa seca de folhas (LWAD) e no ajuste do parâmetro relacionado ao coeficiente de extinção de luz fotossinteticamente ativa (KCAN)	Massa seca de folhas (LWAD)
Índice de área foliar	É utilizada na comparação com os dados simulados de índice de área foliar (LAID) e no ajuste do parâmetro relacionado ao coeficiente de extinção de luz fotossinteticamente ativa (KCAN)	Índice de área foliar (LAID)
Área foliar específica	É utilizada como referência para o ajuste do parâmetro de calibração: área foliar específica (SLAS)	Índice de área foliar (LAID) e massa seca de folha (LWAD)
Área foliar individual máxima	É utilizada como referência para o ajuste do parâmetro de calibração: área foliar individual máxima (LAXS)	
Proporção de massa seca entre o pecíolo e folha completa	É utilizada como referência para o ajuste do parâmetro de calibração: proporção de massa seca entre o pecíolo e folha completa (LPEFR)	
Massa seca de caule	É utilizada na comparação com os dados simulados de massa seca de caule (SWAD)	Massa seca do caule (SWAD)
Comprimento entre nós	É utilizada para nortear a o ajuste do parâmetro de calibração comprimento entre nós (NODLT)	
Massa seca de um nó	É utilizada para nortear a o ajuste do parâmetro de calibração massa seca individual de um nó (NODWT)	
Massa seca total da planta	É utilizada na comparação com os dados simulados de massa seca de total da planta (TWAD). É usada para ajustar o parâmetro de eficiência fotossintética (PARUE)	Massa seca total da planta (TWAD)
Massa seca de raízes de reserva	É utilizada na comparação com os dados simulados de massa seca de raízes de reserva (HWAD). Normalmente, a simulação dessa variável é o objetivo da calibração. Se a simulação não for satisfatória a calibração e revista, em especial os parâmetros relacionados a produção e distribuição de fitomassa	Massa seca de raízes de reserva (HWAD)

A organização da tabela foi baseada no fluxograma de calibração sugerido por Phoncharoen et al. (2021). O único parâmetro não comentado foi o de longevidade foliar

(LLIFA), pois não foi avaliado no presente trabalho. Entretanto comenta-se que, o mesmo, é ajustado com objetivo de melhorar a simulação do IAF (LAID) e da massa de matéria seca das folhas (LWAD), assim como os demais parâmetros de características foliares.

Apêndice 6. Índices estatísticos relacionados aos níveis de ramificação da parte aérea das plantas de acordo com a variedade e experimento

BRS Novo Horizonte															
DAP	NR	Experimento 1			Experimento 2			DAP	NR	Experimento 3			Experimento 4		
		ME	CV	EP	ME	CV	EP			ME	CV	EP	ME	CV	EP
18±2	0	0	0	0	0	0	0	18±2	0	0	0	0	0	0	0
105±7	1	0.60	81.65	0.15	0.50	100.00	0.16	106±7	1	0.60	81.65	0.15	0.70	65.47	0.14
254±7	2	1.50	33.33	0.20	1.60	30.62	0.22	186±7	2	-	-	-	1.50	33.33	0.16
327±7	3	2.50	20.00	0.25	2.75	15.75	0.22	207±7	2	1.60	30.62	0.20	-	-	-

BRS Formosa															
DAP	NR	Experimento 1			Experimento 2			DAP	NR	Experimento 3			Experimento 4		
		ME	CV	EP	ME	CV	EP			ME	CV	EP	ME	CV	EP
18±2	0	0	0	0	0	0	0	18±2	0	0	0	0	0	0	0
145±7	1	0.50	100.00	0.18	0.63	77.46	0.17	127±7	1	0.80	50.00	0.13	0.90	33.33	0.09
230±7	2	-	-	-	1.50	33.33	0.18	189±7	2	1.60	24.36	0.21	1.75	21.81	0.19
258±7	2	1.75	24.74	0.22	-	-	-								
327±7	3	2.50	20.00	0.25	2.75	15.75	0.22								

Eucalipto															
DAP	NR	Experimento 1			Experimento 2			DAP	NR	Experimento 3			Experimento 4		
		ME	CV	EP	ME	CV	EP			ME	CV	EP	ME	CV	EP
18±2	0	0	0	0	0	0	0	18±2	0	0	0	0	0	0	0
127±7	1	0.75	57.74	0.15	0.63	77.46	0.17	98±7	1	0.60	81.65	0.16	0.70	65.47	0.14
232±7	2	1.71	26.35	0.16	1.57	31.49	0.19	155±7	2	1.56	31.94	0.16	1.60	30.62	0.15
327±7	3	2.71	16.64	0.23	2.57	19.25	0.19								

DAP: dias após o plantio; NR: nível de ramificação da parte aérea; ME: média aritmética; CV: coeficiente de variação em percentagem; EP: erro padrão da média da amostra.

Apêndice 7. Índices estatísticos relacionados ao número acumulado de folhas, de acordo com a variedade e experimento.

BRS Novo Horizonte															
DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4				
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP		
40	15.99	25.25	1.28	16.91	13.62	0.73	33	10.01	27.12	0.86	11.16	28.36	1.00		
55	26.45	13.75	1.15	27.26	15.28	1.32	72	38.53	19.96	2.43	40.48	13.64	1.75		
73	41.40	15.77	2.06	40.83	16.70	2.16	113	75.21	14.09	3.35	70.50	6.48	1.45		
90	53.02	15.46	2.59	54.63	22.48	3.88	141	94.99	14.04	4.22	89.59	11.07	3.14		
116	65.78	12.82	2.67	66.36	18.79	3.94	171	114.31	15.21	5.50	104.77	12.00	3.97		
151	80.85	19.49	4.98	80.27	22.54	5.72	226	138.69	7.08	3.11	132.60	4.75	1.99		
186	101.66	15.59	5.01	103.04	19.80	6.45	270	145.36	10.92	5.02	138.92	8.49	3.73		
216	107.30	16.21	5.50	109.48	14.75	5.11	360	190.79	7.05	4.26	183.08	13.51	7.82		
243	111.55	12.40	4.37	114.20	17.12	6.18									
269	124.43	11.78	4.63	130.64	9.97	4.12									
313	151.69	15.31	7.34	154.91	14.99	7.34									
334	158.93	13.54	6.80	165.72	16.96	8.89									

BRS Formosa															
-------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
46	14.75	12.94	0.67	17.00	23.53	1.41	33.00	7.60	12.71	0.31	8.20	38.91	1.01
63	28.00	8.75	0.87	32.38	20.81	2.38	72.00	33.60	16.37	1.74	27.80	26.48	2.33
83	38.63	25.78	3.52	45.00	29.24	4.65	113.00	54.10	14.82	2.54	50.30	15.60	2.48
123	57.63	15.90	3.24	54.13	13.74	2.63	142.00	64.88	15.96	3.28	60.30	2.09	0.40
160	75.13	16.31	4.33	73.13	20.18	5.22	170.00	76.90	18.56	4.51	72.30	11.44	2.62
187	82.88	16.89	4.95	76.63	16.22	4.40	229.00	92.50	12.23	3.58	86.20	10.66	2.91
214	95.63	23.87	8.07	93.25	20.25	6.68							
245	104.00	15.56	5.72	94.00	9.31	3.10							
273	105.25	16.77	8.83	99.75	9.45	4.71							
334	115.25	22.24	12.82	108.00	7.48	4.04							

Eucalipto

DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
46	15.80	18.10	0.90	16.20	18.13	0.93	32	8.10	21.34	0.55	7.80	51.57	1.27
63	29.60	18.38	1.72	31.10	14.34	1.41	72	31.90	10.50	1.06	33.50	15.56	1.65
81	38.00	12.71	1.53	40.60	12.35	1.59	113	56.00	16.43	2.91	56.40	18.18	3.24
90	47.70	9.84	1.48	48.70	8.93	1.37	142	69.00	17.34	3.78	71.60	17.25	3.90
111	57.10	13.32	2.41	59.30	8.03	1.51	171	76.70	23.44	5.68	78.00	16.41	4.05
143	71.70	13.02	2.95	73.10	9.08	2.10	201	107.40	11.46	3.89	118.55	14.34	5.37
174	84.20	12.72	3.39	85.10	8.11	2.18	270	127.42	13.85	5.58	136.69	16.47	7.12
207	97.00	14.87	4.56	92.80	7.58	2.23	360	139.50	8.75	3.86	150.40	7.79	3.71
248	109.20	16.10	5.56	103.60	7.35	2.41							
272	117.20	17.13	6.35	113.90	7.77	2.80							
311	134.30	15.96	6.78	130.90	9.43	3.90							
334	145.40	10.16	4.67	139.40	9.66	4.26							

DAP: dias após o plantio; NR: nível de ramificação da parte aérea; ME: média aritmética; CV: coeficiente de variação em porcentagem; EP: erro padrão da média da amostra.

Apêndice 8. Índices estatísticos relacionados ao índice de área foliar, de acordo com a variedade e experimento.

BRS Novo Horizonte

DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
40	0.46	16.99	0.02	0.55	20.39	0.04	33	0.18	26.02	0.01	0.17	29.97	0.02
55	1.29	15.33	0.06	1.52	23.57	0.11	72	2.31	29.02	0.21	1.72	34.31	0.19
73	2.20	22.54	0.16	2.13	19.90	0.13	113	4.08	45.39	0.59	3.60	30.97	0.35
90	3.15	22.55	0.22	3.33	19.44	0.20	141	5.62	15.02	0.27	3.94	32.72	0.41
116	3.94	17.32	0.22	4.69	21.18	0.31	171	5.64	14.28	0.28	5.00	30.72	0.49
151	4.65	15.72	0.23	4.39	13.40	0.19	226	4.77	18.83	0.30	5.70	15.83	0.34
186	3.65	14.77	0.17	4.02	18.05	0.23	270	4.76	10.30	0.15	5.43	9.67	0.17
216	2.83	15.83	0.14	3.29	30.22	0.31	360	2.36	37.73	0.28	2.31	20.28	0.15
243	1.78	23.69	0.13	2.03	28.34	0.18							
269	1.42	18.54	0.08	2.06	21.16	0.14							
313	2.43	15.19	0.12	2.76	20.48	0.18							
334	2.52	13.69	0.11	2.66	17.84	0.15							

BRS Formosa

DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
46	0.31	44.74	0.05	0.38	34.08	0.05	33	0.20	37.47	0.02	0.16	29.58	0.01
63	1.61	19.36	0.11	1.34	30.60	0.14	72	1.34	35.80	0.15	0.92	43.86	0.13
83	1.68	26.35	0.16	1.64	27.26	0.16	113	2.79	22.48	0.20	2.16	27.58	0.19

123	2.33	26.47	0.22	2.25	21.56	0.17	142	2.93	36.56	0.34	2.20	3.80	0.03
160	2.16	32.66	0.25	2.38	11.85	0.10	170	3.01	14.60	0.14	2.44	34.18	0.26
187	1.97	29.76	0.21	1.88	44.62	0.30	229	2.22	22.81	0.16	2.65	27.02	0.23
214	1.29	26.09	0.12	1.53	32.42	0.18							
245	1.05	11.40	0.04	0.92	32.55	0.11							
273	1.20	16.79	0.10	1.07	13.94	0.07							
334	1.60	16.05	0.13	1.80	31.47	0.28							

Eucalipto

DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
46	0.41	28.69	0.04	0.36	21.56	0.02	32	0.20	22.56	0.01	0.15	40.56	0.02
63	1.41	20.67	0.09	1.36	19.09	0.08	72	1.97	27.81	0.17	1.32	24.95	0.10
81	1.84	12.51	0.07	1.82	14.35	0.08	113	3.07	27.80	0.27	2.75	29.88	0.26
90	2.36	11.54	0.09	2.21	13.24	0.09	142	3.89	25.94	0.32	2.77	35.52	0.31
111	2.81	15.44	0.14	2.57	12.04	0.10	171	4.33	27.53	0.43	4.29	32.22	0.34
143	3.63	15.73	0.18	3.29	11.81	0.12	201	4.06	23.19	0.33	3.50	35.57	0.51
174	3.80	17.58	0.21	3.77	16.00	0.19	270	3.08	39.66	0.39	2.91	28.57	0.26
207	2.24	15.84	0.11	2.09	13.34	0.09	360	0.36	45.75	0.05	0.73	48.60	0.11
248	1.35	25.01	0.11	1.11	20.45	0.07							
272	1.86	18.88	0.11	1.55	15.71	0.08							
311	3.03	14.26	0.14	2.60	7.64	0.06							
334	3.38	23.07	0.25	3.09	10.37	0.10							

DAP: dias após o plantio; ME: média aritmética; CV: coeficiente de variação em percentagem; EP: erro padrão da média da amostra.

Apêndice 9. Índices estatísticos relacionados a produção de fitomassa seca total, de acordo com a variedade e experimento.

BRS Novo Horizonte

DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	2439.3	25.1	193.5	2547.7	32.0	258.0	47	891.6	35.0	98.8	770.6	25.0	61.0
130	10945.9	24.2	838.4	11649.6	24.8	912.5	129	11585.7	37.2	1363.1	7696.2	27.3	664.5
208	20810.2	18.8	1234.7	19587.9	20.0	1238.8	197	21359.1	22.9	1549.5	16436.2	26.4	1371.5
276	29243.1	16.5	1527.3	28467.0	8.7	783.1	270	34508.8	17.4	1897.1	27378.9	19.1	1650.3
346	38430.5	19.9	2422.8	38422.5	17.1	2072.5	360	40389.8	14.3	1831.2	35225.5	23.5	2622.8

BRS Formosa

DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	587.0	21.9	39.4	563.7	26.5	45.4	47	611.2	21.4	41.9	612.8	30.5	59.7
130	7348.2	28.2	646.2	7276.3	23.7	535.8	129	8365.9	14.8	415.6	6425.6	18.5	379.5
208	12058.4	31.0	1223.5	11547.8	21.0	798.9	197	16027.4	16.7	822.9	12840.9	17.6	716.2
276	22105.1	13.1	932.7	22234.7	15.9	1141.3							
346	28284.0	16.0	1442.3	28699.3	19.4	1772.7							

Eucalipto

DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	1808.4	11.0	146.9	1848.1	0.0	137.6	47	584.6	31.9	58.9	571.3	31.5	57.0
130	9084.1	23.5	674.1	8895.7	19.9	559.4	129	7268.5	21.5	493.6	5496.7	23.7	411.5
208	12674.6	12.7	508.1	12101.8	9.4	359.8	197	14013.7	16.6	737.2	11700.9	15.6	577.5
276	18681.4	10.8	638.8	18214.9	20.5	1181.9	270	20194.2	24.9	1587.4	16313.7	20.7	1067.4
346	23222.5	8.9	651.3	22327.2	13.3	937.0	360	24308.9	25.0	1920.4	20925.6	19.7	1301.8

DAP: dias após o plantio; ME: média aritmética; CV: coeficiente de variação em percentagem; EP: erro padrão da média da amostra.

Apêndice 10. Índices estatísticos relacionados a produção de fitomassa seca de folhas, de acordo com a variedade e experimento.

BRS Novo Horizonte													
DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	1033.08	26.82	87.62	1068.97	33.00	111.55	47	438.82	36.30	50.38	398.77	28.19	35.54
130	2846.07	28.66	257.96	3009.38	21.17	201.42	129	3798.37	36.60	439.61	2686.86	25.48	216.49
208	2403.42	26.27	199.63	2116.14	20.79	139.14	197	3933.03	29.64	368.65	3800.51	24.94	299.79
276	2094.32	29.62	196.18	1921.42	23.72	144.14	270	2950.41	25.17	234.83	4052.10	17.40	222.92
346	1692.18	29.12	155.82	1654.18	22.29	116.58	360	943.64	67.09	200.19	1233.13	57.59	224.58

BRS Formosa													
DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	296.80	25.14	23.60	287.41	31.75	28.86	47	183.71	21.29	12.37	172.34	31.18	16.99
130	1742.86	33.50	184.64	1768.56	30.44	170.25	129	1920.33	14.68	89.14	1249.13	25.33	100.05
208	957.48	20.11	60.89	1019.09	22.02	70.97	197	1867.95	30.43	179.74	1792.53	26.48	150.08
276	1038.34	21.62	70.99	1011.22	15.95	51.01							
346	1384.45	21.62	94.65	1479.84	18.44	86.28							

Eucalipto													
DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	914.92	34.06	98.53	877.78	35.99	99.89	47	282.71	35.24	31.50	263.54	38.78	32.32
130	2108.78	27.91	186.12	2202.67	25.46	177.37	129	2141.27	18.42	124.71	1706.26	30.10	162.41
208	1468.66	28.91	134.27	1417.89	35.74	160.26	197	2405.64	19.96	151.84	1972.52	21.54	134.36
276	1664.46	19.70	103.69	1533.40	29.04	140.84	270	1841.40	26.28	153.05	1693.62	19.42	104.01
346	1980.29	28.10	175.96	1727.07	33.00	180.23	360	217.32	52.82	36.30	349.17	72.68	80.25

DAP: dias após o plantio; ME: média aritmética; CV: coeficiente de variação em porcentagem; EP: erro padrão da média da amostra.

Apêndice 11. Índices estatísticos relacionados a produção de fitomassa seca de caule, de acordo com a variedade e experimento.

BRS Novo Horizonte													
DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	1406.2	26.5	117.8	1478.7	31.8	148.7	47	452.8	36.1	51.7	371.9	22.6	26.6
130	4127.6	27.3	357.0	4110.2	24.9	323.6	128	4942.4	41.4	647.4	4229.4	29.7	396.7
208	8257.2	20.9	546.0	8252.6	25.8	673.6	194	11414.8	23.9	864.1	7417.3	26.2	614.3
276	12481.7	15.5	610.9	11712.2	12.3	455.3	270	16619.0	17.9	941.2	13066.7	17.6	725.3
346	16691.0	18.2	959.1	15465.4	14.8	724.1	360	20515.3	13.0	845.3	17597.7	20.1	1119.7

BRS Formosa													
DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	290.2	18.0	16.5	276.3	19.9	17.3	47	427.5	23.1	31.2	440.4	32.7	45.5
130	2677.6	22.2	188.0	2539.1	21.4	172.1	129	3243.3	19.5	200.1	2700.4	15.2	129.6
208	4156.5	33.1	434.8	4082.6	25.5	329.8	197	6313.0	9.9	196.8	4967.3	23.4	366.9
276	8922.0	17.7	500.1	7836.6	17.9	444.8							
346	9606.4	22.3	678.0	9141.9	21.3	616.2							

Eucalipto													
DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	893.5	27.7	78.4	970.3	21.8	67.0	47	301.9	29.7	28.3	307.7	26.2	25.5

130	3148.6	15.6	154.9	2904.3	16.9	154.9	128	3443.6	23.9	259.9	2881.4	24.6	224.5
208	4973.8	11.8	185.0	4595.2	12.5	181.4	194	7234.9	19.0	433.9	6411.6	14.0	284.2
276	7923.0	18.3	458.2	7079.2	13.2	295.7	270	10273.0	33.2	1078.5	8735.5	24.2	668.3
346	11087.9	11.0	384.2	9766.7	13.4	413.0	360	13824.8	28.7	1254.0	11536.8	19.1	695.1

DAP: dias após o plantio; ME: média aritmética; CV: coeficiente de variação em percentagem; EP: erro padrão da média da amostra.

Apêndice 12. Índices estatísticos relacionados a produção de fitomassa seca de raízes de reserva, de acordo com a variedade e experimento.

BRS Novo Horizonte

DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
130	3972.3	37.3	468.0	4530.0	33.7	483.5	128	2845.0	48.2	433.9	780.0	56.5	139.5
208	10149.6	23.3	749.3	9219.2	21.1	613.9	194	6011.3	28.0	532.4	5218.4	37.9	624.8
276	14667.1	20.1	931.6	14833.3	14.2	665.2	270	14939.4	26.7	1263.0	10260.1	29.3	949.5
346	20047.4	21.6	1367.8	21302.9	19.3	1303.2	360	18930.8	19.8	1185.6	16394.6	29.0	1501.5

BRS Formosa

DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
130	2927.8	33.6	311.5	2968.6	29.7	278.8	129	3202.2	25.5	258.2	2476.1	28.5	223.0
208	6944.4	40.5	888.8	6446.1	31.1	633.5	197	7846.4	21.3	529.4	6081.0	16.3	314.2
276	12144.8	12.7	486.7	13386.8	18.9	801.3							
346	17293.1	14.4	786.6	18077.6	20.3	1159.2							

Eucalipto

DAP	Experimento 1			Experimento 2			DAP	Experimento 3			Experimento 4		
	ME	CV	EP	ME	CV	EP		ME	CV	EP	ME	CV	EP
68	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
130	3826.7	38.1	461.6	3788.7	27.2	326.2	128	1683.6	53.3	284.0	909.0	31.4	90.4
208	6232.1	16.7	329.0	6088.7	14.1	271.3	194	4373.1	23.7	328.2	3316.8	46.3	485.7
276	9094.0	19.0	546.5	9602.3	30.6	929.4	270	8079.8	20.7	528.9	5884.6	27.7	516.3
346	10154.2	14.3	460.3	10833.4	20.6	705.2	360	10266.7	27.0	877.6	9039.7	29.5	842.8

DAP: dias após o plantio; ME: média aritmética; CV: coeficiente de variação em percentagem; EP: erro padrão da média da amostra.

4. CALIBRAÇÃO DO MODELO MANIHOT-CASSAVA COM VARIEDADES DE MANDIOCA CULTIVADAS EM CLIMA TROPICAL SUBÚMIDO

Resumo: O modelo MANIHOT-Cassava permite simular o cultivo da cultura da mandioca. Entretanto, para que as simulações sejam sensíveis as especificidades de variedades cultivadas em um dado ambiente é necessário realizar o processo de calibração a partir de dados obtidos experimentalmente. O objetivo do presente trabalho foi calibrar o modelo MANIHOT-Cassava com informações de variedades de mandioca cultivadas em clima tropical subúmido, em condição de manejo agrônomico ótimo. A base de dados utilizada na calibração do modelo foi obtida no clima tropical subúmido do município de Cruz das Almas, no Estado de Bahia, entre 2019 e 2020. O modelo foi calibrado com dados experimentais obtidos em condição irrigada e de sequeiro da variedade industrial BRS Novo Horizonte e da variedade de mesa Eucalipto. O procedimento de calibração foi realizado a partir da alteração de parâmetros relacionados a caracterização das variedades no modelo. Utilizou-se a abordagem da tentativa e erro para ajustar os parâmetros. A correlação entre dados observados e simulados foi avaliada a partir de índices estatísticos. O modelo, independente da variedade, simulou de forma precisa e acurada, todas as variáveis estudadas durante a calibração e sua avaliação. A exceção foi o índice de área foliar que apresentou falhas na simulação após os 180 DAP. Os erros na simulação das tendências de crescimento foram maiores na simulação do experimento cultivado com menor oferta hídrica. Nessa condição de cultivo, o modelo penalizou demasiadamente o crescimento das plantas.

Palavras-chave: DSSAT, *Manihot esculenta* Crantz, modelos de simulação de culturas

Introdução

Modelos de simulação de culturas são conjuntos de equações matemáticas, normalmente associadas a sistemas computacionais, que simulam o cultivo de culturas agrícolas (Corrêa et al., 2011). Os modelos vêm sendo aplicados para simular o que ocorre com uma cultura quando ela é cultivada em uma determinada condição de cultivo. As informações obtidas a partir das simulações podem ser aplicadas para diferentes finalidades em áreas como a educação, pesquisa aplicada, política e planejamento agrícola (Boote et al., 1996).

Dentre as opções de sistemas computacionais desenvolvidos para simulação de culturas agrícolas o Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) é uma opção popular e gratuita, que possibilita o acesso a submódulos que contêm modelos de diferentes culturas (Hoogenboom et al., 2019). Um desses submódulos permite a simulação, em escala diária, do desenvolvimento, crescimento e produção de plantações de mandioca, a partir do modelo MANIHOT-Cassava (Moreno-Cadena et al., 2020).

O modelo calcula a quantidade de fotoassimilados produzidos diariamente pela planta a partir do produto entre a radiação solar interceptada e a eficiência no uso da radiação solar. A abordagem de distribuição de fotoassimilados utilizada no modelo é do tipo “spill-over” e considera que a parte aérea e as raízes fibrosas da planta têm preferência no consumo de energia em relação as raízes de reserva da planta, que fica com a energia que resta, de acordo com a descrição realizada por Moreno-Cadena et al. (2021).

Assim como qualquer modelo, uma das principais limitações no uso do MANIHOT-Cassava é a necessidade de realizar o processo de calibração quando são necessárias simulações sensíveis a condições mais específicas. Um exemplo dessa necessidade é o ajuste dos parâmetros do modelo visando a simulação do cultivo de variedades de mandioca cultivadas em um dado ambiente de interesse (Visses et al., 2018; Bongiovani, 2019; Phoncharoen et al., 2021).

No MANIHOT-Cassava a calibração é realizada ajustando cerca de 16 parâmetros, relacionados ao desenvolvimento da parte aérea, características foliares, distribuição de fitomassa e eficiência fotossintética (Moreno-Cadena et al., 2020). Durante o processo de calibração é necessário comparar resultados simulados com resultados observados em campo, com a finalidade de ajustar os parâmetros, visando a redução dos erros, como exemplificado por Phoncharoen et. al (2021).

A calibração do MANIHOT-Cassava com variedades de mandioca de mesa e indústria cultivadas no clima tropical, da Zona da Mata do Nordeste brasileiro ainda não foi realizada. A calibração é importante para melhorar a performance do modelo em simular o potencial produtivo das variedades cultivadas nessa região, que concentra, tradicionalmente, muitos dos polos produtores e também grandes mercados consumidores de raízes de mandioca e seus derivados.

Desse modo, o objetivo do presente trabalho foi calibrar o MANIHOT-Cassava com informações de variedades de mandioca cultivadas no ambiente tropical subúmido, nas condições de cultivo do Recôncavo Baiano.

Material e métodos

Modelo MANIHOT-Cassava

O presente trabalho foi realizado utilizando o modelo MANIHOT-Cassava, incluído, como módulo de cultura, na versão 4.7.5.036 do DSSAT (Hoogenboom et al., 2019). Informações detalhadas sobre os processos envolvendo a simulação do cultivo da cultura da mandioca no MANIHOT-Cassava são encontrados no trabalho desenvolvido por Moreno-Cadena, (2018) e por Moreno et al., (2020; 2021). A breve descrição realizada abaixo foi realizada a partir de informações contidas nesses trabalhos.

O MANIHOT-Cassava é um modelo baseado em processos que considera a mandioca como uma cultura de crescimento indeterminado, de modo que o cultivo não tem uma fase fenológica de maturidade como as culturas de grãos, representadas em outros módulos de cultura do DSSAT.

No modelo, o desenvolvimento da planta ocorre na medida em que a planta acumula tempo térmico e o tempo térmico é calculado a partir de temperaturas cardinais que variam de acordo com os processos de desenvolvimento simulados pelo MANIHOT-Cassava.

O modelo calcula a quantidade de fotoassimilados produzidos diariamente pela planta a partir do produto entre a radiação solar interceptada e a eficiência no uso da radiação solar. A abordagem de distribuição de fotoassimilados utilizada no modelo é do tipo “spill-over” e considera que a parte aérea e as raízes fibrosas da planta têm preferência no consumo de energia em relação as raízes de reserva da planta, que fica com a energia que resta.

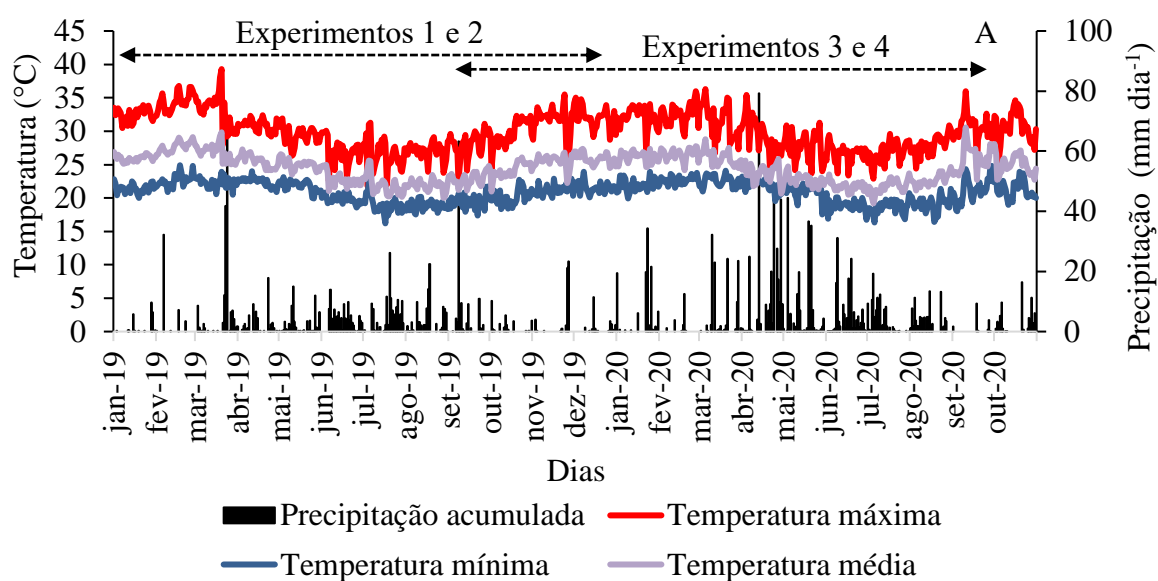
O espaço ocupado entre folhas ou cicatrizes de abscisão foliar, também denominada como nó, representa a unidade de crescimento básica do modelo. A parte aérea das plantas cresce de forma simétrica, de acordo com um princípio de espelhamento do número de nós nos ramos da planta. Se a quantidade de carboidratos produzida não é suficiente para manter o crescimento potencial da planta as taxas de crescimento de folhas e raízes fibrosas é penalizada.

O déficit hídrico e/ou nutricional, também penaliza o crescimento da planta. Salienta-se que o modelo só reconhece o déficit nutricional que ocorre em função da disponibilidade de nitrogênio. O fator de déficit hídrico é definido de acordo com o conteúdo de água no solo, considerando dois momentos distintos: antes e após a emergência.

Base de dados experimentais, meteorológicos e de solo

O modelo foi calibrado com informações relacionadas a variedade BRS Novo Horizonte e Eucalipto. A variedade BRS Novo Horizonte é uma variedade de alto potencial produtivo desenvolvida para indústria e avaliada nas condições de cultivo do Recôncavo Baiano (Oliveira et al., 2020). A variedade Eucalipto é uma variedade crioula, de mesa, cultivada tradicionalmente por mandiocultores da região.

O processo de calibração foi realizado a partir de informações coletadas em quatro experimentos. Os experimentos 1 e 2 foram conduzidos entre 4 de janeiro de 2019 e 20 de dezembro de 2019 e os experimentos 3 e 4 entre 15 de setembro de 2019 e 15 de setembro de 2020. Os experimentos 1 e 2 foram cultivados 2,5 meses antes da época chuvosa, enquanto os experimentos 3 e 4 foram semeados cerca de 5 meses antes da época chuvosa. As duas épocas de plantio também apresentaram diferenças quanto ao fotoperíodo, temperatura e radiação, em especial nos primeiros 180 dias após o plantio (DAP), conforme figura 1.



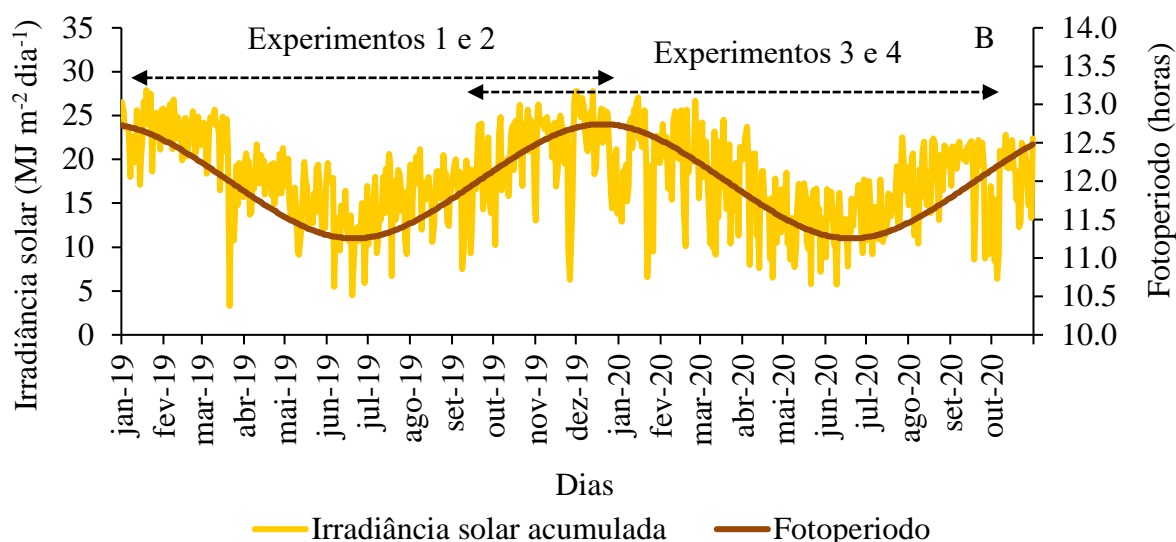


Figura 1. Registro diário de precipitação pluviométrica, temperatura média, máxima e mínima (A) e irradiância solar e fotoperíodo (B), entre janeiro de 2019 e outubro de 2020, em Cruz das Almas-BA.

As plantações cultivadas no experimento 1 foram cultivadas sem restrição hídrica, com irrigação complementar do plantio a colheita. Entretanto, as plantações cultivadas nos experimentos 2, 3 e 4 receberam irrigação complementar apenas até próximo dos 60, 140 e 45 dias após o plantio (DAP), respectivamente. Os experimentos 1 e 2 tiveram sua colheita final aos 350 DAP, enquanto os experimentos 3 e 4 tiveram sua colheita final aos 363 DAP.

Os experimentos foram desenvolvidos em campos experimentais da Embrapa Mandioca e Fruticultura, localizados em Cruz das Almas, Bahia, Brasil. Os campos experimentais estão situados a cerca de 220 m de altitude em relação ao nível do mar, próximo das coordenadas geográficas: 12°40'31" S e 39°05'17" W.

O clima da região de Cruz das Almas é do tipo tropical úmido ou subúmido (Am), segundo a classificação climática de Köppen, conforme descrição da normal meteorológica realizada por Silva et al., (2016). O solo dos campos experimentais caracterizado, por Souza e Souza (2001), como Latossolo Amarelo Distrófico, possui declividade próxima a 3%. O sistema de manejo adotado para condução da cultura da mandioca incluiu o preparo convencional do solo, controle de plantas espontâneas, pragas, correção da reação do solo, adubação de plantio, adubação de cobertura e irrigação complementar.

Arquivos digitais contendo dados sobre a condição de cultivo de cada experimento foram preparados de acordo com o padrão dos arquivos de dados do DSSAT, em função do tipo de dado. Os dados meteorológicos foram organizados em arquivos de entrada de clima do DSSAT (.wth), os dados de solo nos arquivos de entrada de solo (.sol) e as

informações sobre as condições de cultivo, de cada experimento, foram organizados nos arquivos de entrada informações experimentais (.csx). As condições iniciais do ambiente de cultivo foram informadas considerando o início das simulações no ano anterior ao início dos experimentos, de modo a regular o balanço hídrico. Os experimentos foram conduzidos em condição de manejo intensivo ótimo, com fertilização e controle de pragas e doenças. Desse modo, nas condições de cultivo simuladas, o manejo foi considerado ótimo, sendo mantido, apenas o módulo que controla as perdas por estresse hídrico. Por fim os resultados observados nos experimentos foram organizados nos arquivos de resultados experimentais em série temporal (.cst).

Os resultados experimentais observados que foram utilizados para confrontar os resultados simulados e ajustar os parâmetros de calibração, estão associados as variáveis nível de ramificação da parte aérea, produção de folhas por ápice, índice de área foliar, produção de fitomassa seca da planta e sua distribuição entre parte aérea e raízes de reserva.

Calibração do modelo e sua avaliação

O processo de calibração do MANIHOT-Cassava foi realizado a partir do ajuste de parâmetros de calibração que definem as características do genótipo, contidas nos arquivos de dados de entrada sobre as cultivares CSYCA047.cul e CSYCA047.eco (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros de calibração ajustados durante o processo de calibração do modelo MANIHOT-Cassava

Arquivo de informações sobre as características fenotípicas das cultivares (CSYCA047.cul)	
Parâmetro	Definição
BxyND	Intervalo de tempo térmico entre a ramificação X e Y (°Cd)
BRxFX	Número de ápices que se desenvolveram a partir da ramificação X
LAXS	Área foliar de folhas desenvolvidas sem estresse (cm ²)
SLAS	Área foliar específica (cm ² g ⁻¹)
LLIFA	Tempo térmico entre a expansão foliar máxima e o início da senescência (°Cd)
LPEFR	Fração de massa de pecíolo na massa da folha completa
LNSLP	Inclinação da curva crescimento associada a produção de folhas
NODWT	Peso do nó primeiro nível de ramificação da parte aérea aos 3400 °CD (g)
NODLT	Comprimento entre nós no primeiro nível de ramificação lignificado da parte aérea (cm)
Arquivo de informações sobre o comportamento ecofisiológico das cultivares (CSYCA047.eco)	
Parâmetro	Definição
KCAN	Coefficiente de extinção da radiação fotossinteticamente ativa (PAR)
PARUE	Fator de conversão radiação fotossinteticamente ativa em massa seca (g MJ ⁻¹)
HMPC	Porcentagem de massa de matéria seca nas raízes de reserva (%)

Os resultados experimentais do experimento 1 foram utilizados para calibrar o modelo, enquanto os resultados dos experimentos 2, 3 e 4 foram utilizados para avaliar a calibração. O ajuste foi realizado utilizando a abordagem de tentativa e erro, por meio da verificação da correlação entre dados observados e simulados, avaliada a partir de índices estatísticos. O protocolo de calibração utilizado no presente trabalho foi baseado no trabalho realizado por Phoncharoen et al. (2021). Os índices estatísticos utilizados nos processos de calibração e avaliação do modelo foram os mesmos. No presente trabalho foram utilizados os seguintes índices estatísticos:

A. Coeficiente de determinação (r^2): é uma medida que indica precisão, descreve a fração da variância total nos dados observados que pode ser explicada pelo modelo. O r^2 é calculado a partir da equação abaixo:

$$r^2 = \frac{\sum(Ei - \bar{O})^2}{\sum(Oi - \bar{O})^2}$$

Em que:

r^2 : coeficiente de determinação

Ei : valor estimado

\bar{O} : valor médio observado

Oi : valor observado

O valor do coeficiente de determinação varia entre 0 e 1. Na medida em que o valor se aproxima de 1, maior a precisão do modelo em relação a variância dos dados observados.

B. Índice de concordância de Willmott (d): o índice de concordância de Willmott é uma estimativa de acurácia, que mede a concordância entre os valores observados e simulados. O índice d é calculado a partir da equação abaixo:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(Ei - \bar{O})^2}{\sum(|Ei - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2} \right]$$

Em que:

d : índice de concordância de Willmott (1982)

E_i : valor estimado

\bar{O} : valor médio observado

O_i : valor observado

Os valores do índice d variam dentro da faixa de 0 a 1. Quanto mais próximo a um, maior a correlação dos dados e melhor o desempenho do modelo para prever determinado processo ou variável.

C. Índice de confiança ou desempenho (c): o índice de confiança mede a confiança ou desempenho do modelo, é obtido pelo produto entre o índice de precisão “ r ” e o índice de acurácia “ d ”, segundo a equação abaixo:

$$c = d \times (r^2)^{0,5}$$

c : índice de confiança ou desempenho

d : índice de concordância de Willmott (1982)

r^2 : coeficiente de determinação

A interpretação do índice de confiança é realizada a partir das faixas de desempenho: superior a 0,85: ótimo; entre 0,76 e 0,85: muito bom; entre 0,66 e 0,75: bom; entre 0,61 e 0,65: mediano; entre 0,51 e 0,60: sofrível; entre 0,41 e 0,50: mau; inferior a 0,40: péssimo. No presente trabalho, será apresentada, somente, a interpretação do índice de confiança, com base nas faixas de classificação.

D. Raiz quadrática média do erro (RMSE): o RMSE é uma medida de dispersão que representa o desvio padrão dos erros. Os erros são calculados com objetivo de avaliar o quão distantes os valores observados estão dos valores simulados. Na prática, o índice informa o quão concentrados ou dispersos os dados estão em torno da linha de tendência simulada.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(E_i - O_i)^2}{n}}$$

RMSE: raiz quadrática média do erro

E_i: valor estimado

\bar{O} : valor médio observado

O_i: valor observado

n: número de observações

O RMSE possui a mesma escala dimensional da variável estudada. Quanto mais próximo de zero menor a dispersão dos dados observados em relação aos simulados, e, portanto maior a acurácia da simulação. Valores muito altos de RMSE podem indicar a presença de outliers e/ou de falhas em parte da simulação. O RMSE será apresentado nas tabelas, mas não será usado nas discussões e apresentações de resultados. Para essa finalidade será utilizado o RRMSE.

E. Raiz quadrática média relativa do erro (RRMSE): RRMSE é parecido com RMSE. Contudo, representa em termos percentuais o quão distante os valores médios observados estão em relação aos simulados. É obtido a partir da equação abaixo:

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100$$

RRMSE: raiz quadrática média relativa do erro

RMSE: raiz quadrática média do erro

\bar{O} : valor médio observado

Assim como o RMSE quanto mais próximo de 0 melhor. Entretanto, é possível avaliar a correlação entre dados observado e simulados a partir das faixas: abaixo de 10 %: perfeita, entre 10 e 20%: bom; entre 20 e 30%: moderado e acima de 30%: ruim, a exemplo do trabalho de calibração do modelo MANIHOT-Cassava apresentado por Phoncharoen et al. (2021).

Apresentação dos resultados

Os parâmetros de calibração de cada variedade e os índices estatísticos associados a correlação entre os dados simulados e observados foram apresentados na forma de tabelas. A correlação entre os dados observados e simulados também foi apresentada de

forma gráfica, de modo a permitir a avaliação visual da capacidade do modelo de simular as tendências de crescimento das variáveis avaliadas. Na representação gráfica a linha plotada representou a evolução dos dados simulados e os pontos destacados os resultados observados em campo.

Resultados e discussão

Parâmetros de calibração do modelo MANIHOT-Cassava

Os parâmetros de calibração do modelo MANIHOT-Cassava ajustados para simulação de cultivo, em ambiente tropical subúmido, das variedades BRS Novo Horizonte e Eucalipto são apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de calibração do modelo MANIHOT-Cassava ajustados para as variedades BRS Novo Horizonte e Eucalipto

Arquivo de entrada	Parâmetro	Unidade	BRS Novo Horizonte	Eucalipto	
.cul	B01ND		500,00	450,00	
	B12ND	°Cd	450,00	500,00	
	B23ND		250,00	400,00	
	B34ND		250,00	400,00	
	BR1FX		4,50	2,00	
	BR2FX	Ápices	1,00	2,00	
	BR3FX		2,00	2,00	
	BR4FX		2,00	2,00	
	LAXS		cm ²	950,00	425,00
	SLAS	g cm ⁻²	250,00	185,00	
	LLIFA	°Cd	1600,00	1500,00	
	LPEFR	-	0,25	0,25	
	LNSLP	-	1,05	0,90	
	NODWT	G	13,00	9,25	
	NODLT	Cm	2,50	4,00	
	.eco	KCAN	-	0,65	0,75
		PARUE	g MJ ⁻¹	2,45	1,70
HMPC		%	39,00	31,00	

No presente trabalho, o ajuste dos parâmetros: BR1FX, BR2FX, BR3FX, LAXS, SLAS, LPEFR, NODWT, NODLT e HMPC foram iniciados a partir de informações obtidas em campo. Os demais parâmetros foram ajustados a partir dos valores padrão sugeridos no arquivo de informações de cultivar e ecofisiologia de variedades de mandioca do DSSAT, localizadas no arquivo de informações genéticas do modelo MANIHOT-Cassava.

A variedade BRS Novo Horizonte, apresentou parâmetros BR3FX, LFPR, HMPC e NODLT com valores ajustados dentro ou muito próximos aos da faixa de valores observados em campo, enquanto a variedade Eucalipto apresentaram valores ajustados dentro ou muito próximo aos da faixa de valores observados para os parâmetros BR1FX, BR2FX, BR3FX, SLAS, LFPR, HMPC e NODLT. Os valores de LAXS e NODWT foram muito superiores aos valores registrados em campo, para ambas as variedades e os valores ajustados para os parâmetros BR1FX, BR2FX e SLAS ficaram acima da faixa de valores observada para variedade BRS Novo Horizonte.

Moreno-Cadena et al. (2021) explicaram que não há como ter certeza se as características observadas em campo, de variedades cultivadas em condições específicas, terão uma boa correlação com os parâmetros do modelo, pois os parâmetros do modelo são desenvolvidos a partir de uma grande quantidade de informações, que contemplam o comportamento geral da espécie em diferentes ambientes. Entretanto, conhecer as faixas de valores reais associados aos parâmetros pode ajudar a nortear o ajuste e, também, a entender quais variáveis são mais relevantes em nível de coleta de dados em campo, visando o processo de calibração do modelo.

Performance da calibração do MANIHOT-Cassava com informações das variedades

Na calibração das variedades BRS Novo Horizonte e Eucalipto, simulando as condições de cultivo e base de dados experimentais do experimento 1, todas as variáveis estudadas, com exceção do índice de área foliar (IAF), apresentaram elevada correlação entre os valores observados e simulados com valores de r^2 e d próximos a 1 e nível de confiança classificado como ótimo (Tabela 3).

Tabela 3. Índices estatísticos usados para verificar a performance da calibração do modelo MANIHOT-Cassava com informações da variedade BRS Novo Horizonte e Eucalipto

Variedade	Variável	RMSE	RRMSE	r^2	D	Confiança
BRS Novo Horizonte	Nível de ramificação do ápice	0,36	21,04	0,98	0,98	Ótima
	Número acumulado de folhas por ápice	15,01	15,45	0,97	0,97	Ótima
	Índice de área foliar	0,98	31,56	0,59	0,83	Moderada
	Prod. de massa seca total da plantação	706,62	3,41	1,00	1,00	Ótima
	Prod. de massa seca da parte aérea	1716,97	14,20	0,98	0,98	Ótima
	Prod. de massa seca de raízes de reserva	2392,69	30,80	0,98	0,97	Ótima
Eucalipto	Nível de ramificação da parte aérea	0,06	4,00	1,00	1,00	Ótima
	Número acumulado de folhas por ápice	11,70	15,00	0,97	0,97	Ótima
	Índice de área foliar	0,90	38,00	0,33	0,77	Sofrível
	Prod. de massa seca total	855,70	6,00	0,99	1,00	Ótima

Prod. de massa seca da parte aérea	1057,77	15,00	0,95	0,98	Ótima
Prod. de massa seca de raízes de reserva	1304,74	22,00	0,94	0,97	Ótima

O índice RRMSE revelou que, para BRS Novo Horizonte, ocorreu dispersão muito baixa dos dados observados em relação a tendência simulada da produtividade de massa seca total da plantação, poucos erros, com baixa dispersão dos dados, para as variáveis número acumulado de folhas por ápice e produtividades de massa seca total e da parte aérea. Contudo, o RRMSE indicou que a dispersão dos dados observados em relação aos simulados foi moderada para o nível de ramificação do ápice e mais elevada nas simulações de índice de área foliar e massa seca de raízes de reserva Figura 2.

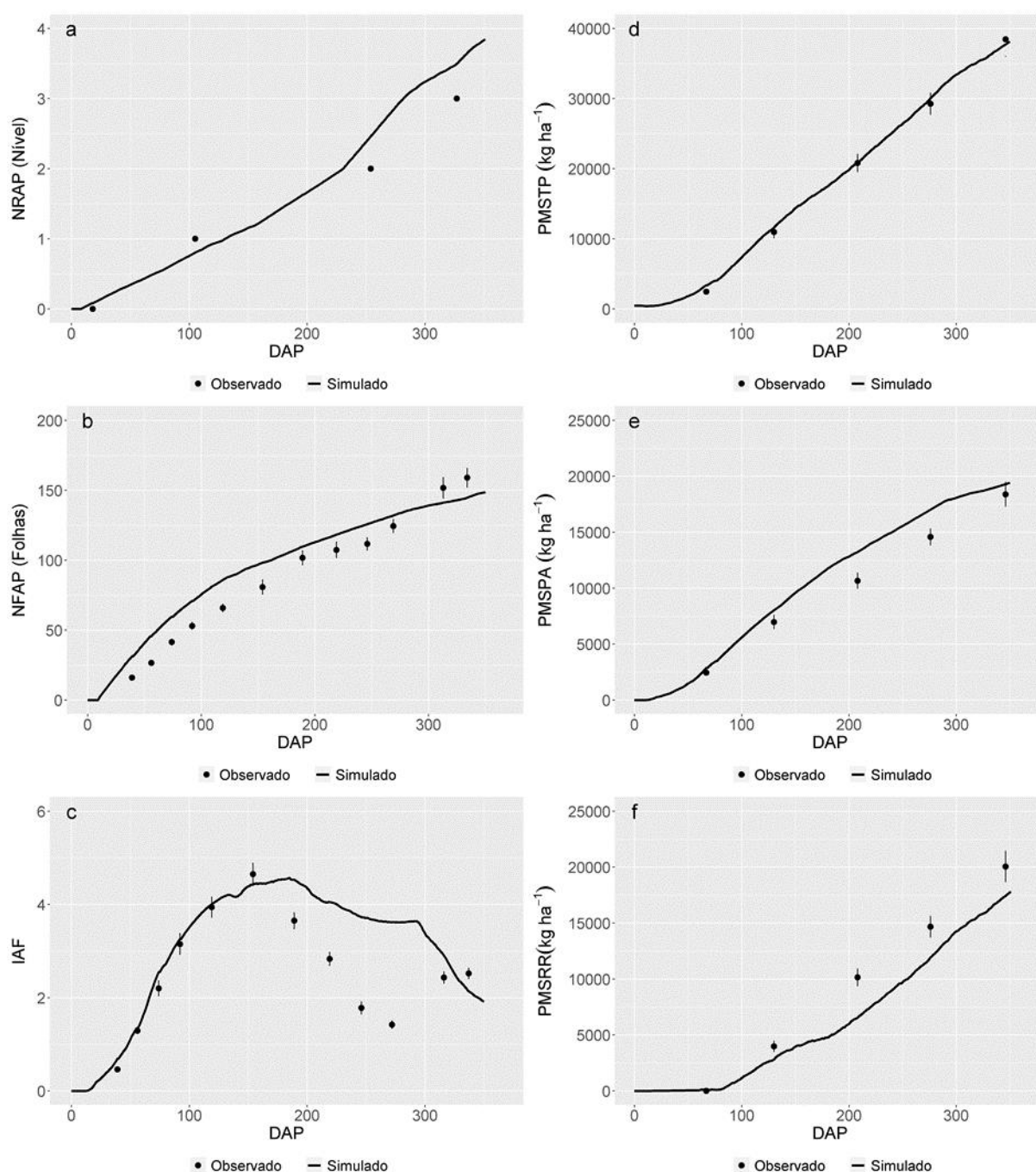


Figura 2. Tendências de crescimento simuladas, para variedade BRS Novo Horizonte, com valores observados plotados para o (a) nível de ramificação do ápice (NRAP); (b) número de folhas do ápice (NFAP); (c) índice de área foliar (IAF); (d) produtividade de massa seca total da plantação (PMSTP); (e) produtividade de massa seca da parte aérea (PMSPA); (d) produtividade de massa seca de raízes de reserva (PMSRR). As barras de erro representam o erro padrão da média da amostra

Para variedade Eucalipto o RRMSE indicou que ocorreu dispersão muito baixa dos dados observados em relação a tendência simulada do nível de ramificação do ápice e produtividade de massa seca total da plantação, com poucos erros e baixa dispersão dos dados para as variáveis número acumulado de folhas por ápice e produtividades de massa seca total e da parte aérea. Por fim, a dispersão dos dados observados em relação aos simulados foi moderada para a produtividade de massa seca de raízes de reserva e mais elevada nas simulações de índice de área foliar (Figura 3).

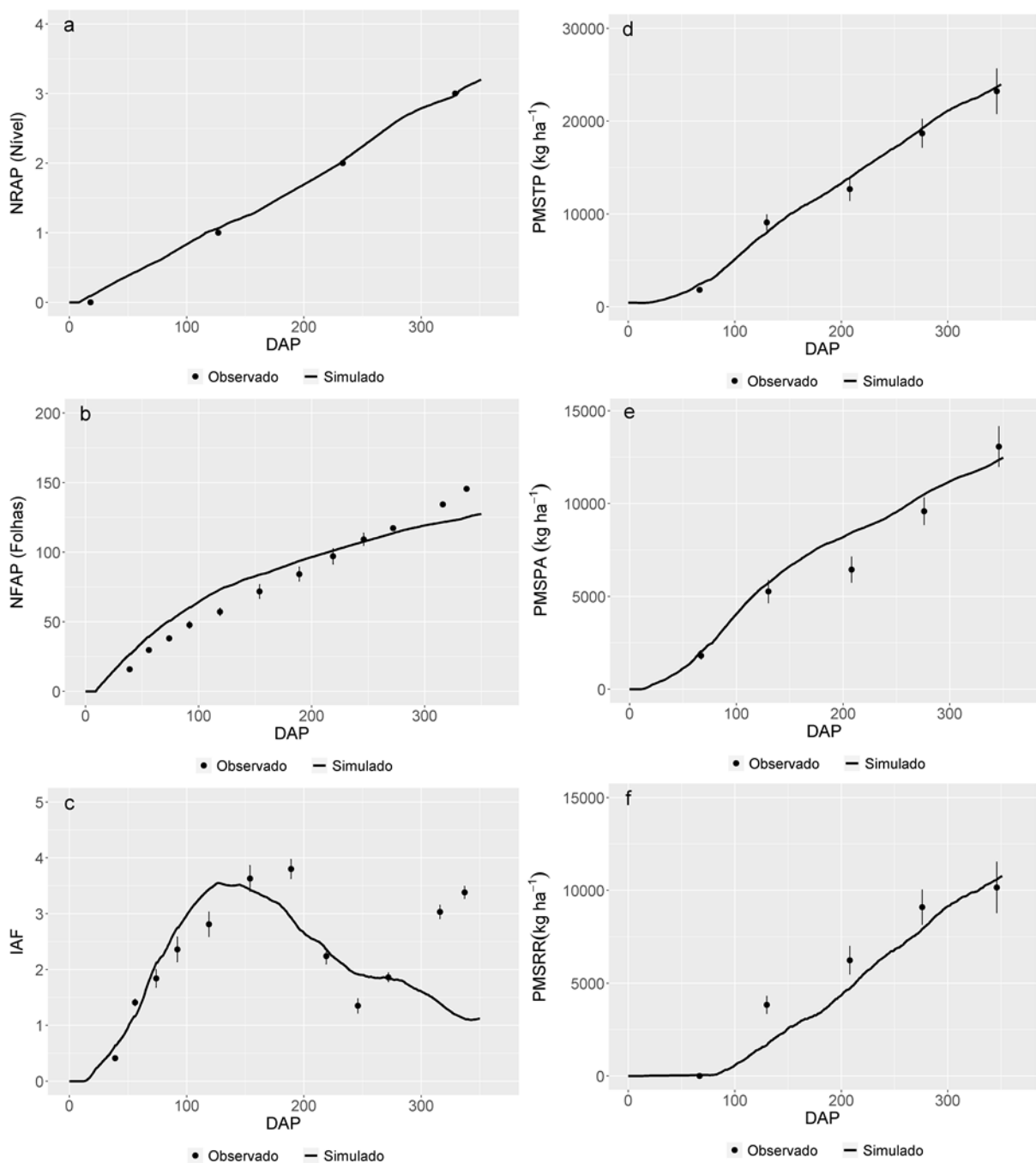


Figura 3. Tendências de crescimento simuladas, para variedade Eucalipto, com valores observados plotados para o (a) nível de ramificação do ápice (NRAP); (b) número de folhas do ápice (NFAP); (c) índice de área foliar (IAF); (d) produtividade de massa seca total da plantação (PMSTP); (e) produtividade de massa seca da parte aérea (PMSPA); (f) produtividade de massa seca de raízes de reserva (PMSRR). As barras de erro representam o erro padrão da média da amostra

Avaliação da calibração das variedades BRS Novo Horizonte e Eucalipto

Na avaliação da calibração, foi verificado que ocorreu variação de desempenho na simulação dos experimentos 2, 3 e 4 (Tabela 4). Ao utilizar a base de dados conjunta desses experimentos o desempenho da simulação dos dados de saída, com exceção do índice de área foliar (IAF), para ambas as variedades, e da produtividade de massa seca de raízes

de reserva, para variedade Eucalipto, alcançaram valores próximos a 1, dos índices r^2 e d, com nível de confiança classificado como ótimo (Tabela 4).

Tabela 4. Índices estatísticos usados para verificar a performance da calibração do modelo MANIHOT-Cassava com informações da variedade BRS Novo Horizonte e Eucalipto

Variável	Exp.	BRS Novo Horizonte					Eucalipto				
		RMSE	RRMSE	r^2	D	Confiança	RMSE	RRMSE	r^2	D	Confiança
NRAP	2	0.23	0.15	0.98	0.99	Ótima	0.12	0.08	1.00	1.00	Ótima
	3	0.27	0.33	1.00	0.97	Ótima	0.39	0.39	0.96	0.92	Ótima
	4	0.63	1.15	1.00	0.76	M. bom	0.64	0.64	0.96	0.75	Bom
	Todos	0.40	0.38	0.86	0.96	Ótima	0.42	0.35	0.87	0.95	Ótima
NFAP	2	14.49	0.15	0.97	0.97	Ótima	9.62	0.12	0.98	0.98	Ótima
	3	15.11	0.16	0.99	0.98	Ótima	7.82	0.10	0.99	0.99	Ótima
	4	22.93	0.29	0.99	0.94	Ótima	19.06	0.23	0.99	0.95	Ótima
	Todos	17.47	0.20	0.93	0.96	Ótima	12.69	0.16	0.94	0.97	Ótima
IAF	2	0.78	0.27	0.58	0.87	Bom	0.85	0.39	0.30	0.75	Sofrível
	3	0.49	0.14	0.96	0.98	Ótima	0.98	0.36	0.63	0.88	Bom
	4	1.17	0.38	0.64	0.86	Bom	0.79	0.34	0.66	0.88	Bom
	Todos	0.85	0.27	0.72	0.91	M. bom	0.87	0.37	0.55	0.85	Mediano
PMSTP	2	2010.23	0.10	0.98	0.99	Ótima	946.67	0.07	0.98	1.00	Ótima
	3	4374.14	0.17	0.99	0.98	Ótima	4140.81	0.31	1.00	0.95	Ótima
	4	2548.98	0.14	0.98	0.99	Ótima	3231.21	0.29	0.98	0.96	Ótima
	Todos	3144.91	0.15	0.97	0.99	Ótima	3081.30	0.25	0.95	0.97	Ótima
PMSPA	2	1967.80	0.17	0.99	0.97	Ótima	1319.24	0.17	0.95	0.96	Ótima
	3	1039.09	0.08	0.98	1.00	Ótima	493.98	0.06	0.99	1.00	Ótima
	4	1247.80	0.12	0.97	0.99	Ótima	600.27	0.08	0.98	0.99	Ótima
	Todos	1472.97	0.13	0.96	0.99	Ótima	884.07	0.11	0.96	0.99	Ótima
PMSRR	2	3841.05	0.55	0.98	0.91	Ótima	1591.45	0.26	0.97	0.96	Ótima
	3	3476.21	0.31	0.95	0.95	Ótima	3556.64	0.73	0.99	0.88	Ótima
	4	1659.53	0.22	0.99	0.98	Ótima	2572.15	0.67	1.00	0.91	Ótima
	Todos	3140.69	0.37	0.82	0.95	Ótima	2695.57	0.55	0.79	0.91	M. bom

Exp: experimento; Todos: avaliação do conjunto de dados dos experimentos 2, 3 e 4; NRAP: nível de ramificação do ápice; NFAP: número de folhas do ápice; IAF: índice de área foliar; PMSTP: produtividade de massa seca total da plantação; PMSPA: produtividade de massa seca da parte aérea; PMSRR: produtividade de massa seca de raízes de reserva; M. bom: muito bom.

De modo geral, independente da variedade, houve pouca diferença entre os índices obtidos na calibração (Tabela 3) e na avaliação (Tabela 4), para as variáveis nível de ramificação do ápice, massa de matéria seca total da plantação e massa de matéria seca da parte aérea. A performance da simulação do IAF na avaliação da calibração foi superior à da calibração, para ambas as variedades, e a simulação da produtividade de massa seca de raízes de reserva teve performance inferior na avaliação da calibração, para variedade Eucalipto.

Para BRS Novo Horizonte e Eucalipto o RRMSE foi mais elevado, na avaliação da calibração do que na calibração para todas as variáveis, exceto para o IAF e produtividade de massa seca da parte aérea, que apresentaram redução do RRMSE. Os maiores incrementos do RRMSE ocorreram nas variáveis nível de ramificação do ápice, produtividade de massa seca total da plantação e produtividade de massa seca de raízes de reserva. Comenta-se que o nível de ramificação do ápice e produtividade de massa seca de raízes de reserva, apresentaram maior dispersão dos dados observados em relação aos simulados, quando comparados aos demais dados de saída avaliados (Tabela 4).

As tendências de crescimento simuladas dos dados de saída simulados e a dispersão dos dados observados nos experimentos 2, 3 e 4, podem ser verificadas nas figuras 4 e 5, para as variedades BRS Novo Horizonte e Eucalipto, respectivamente.

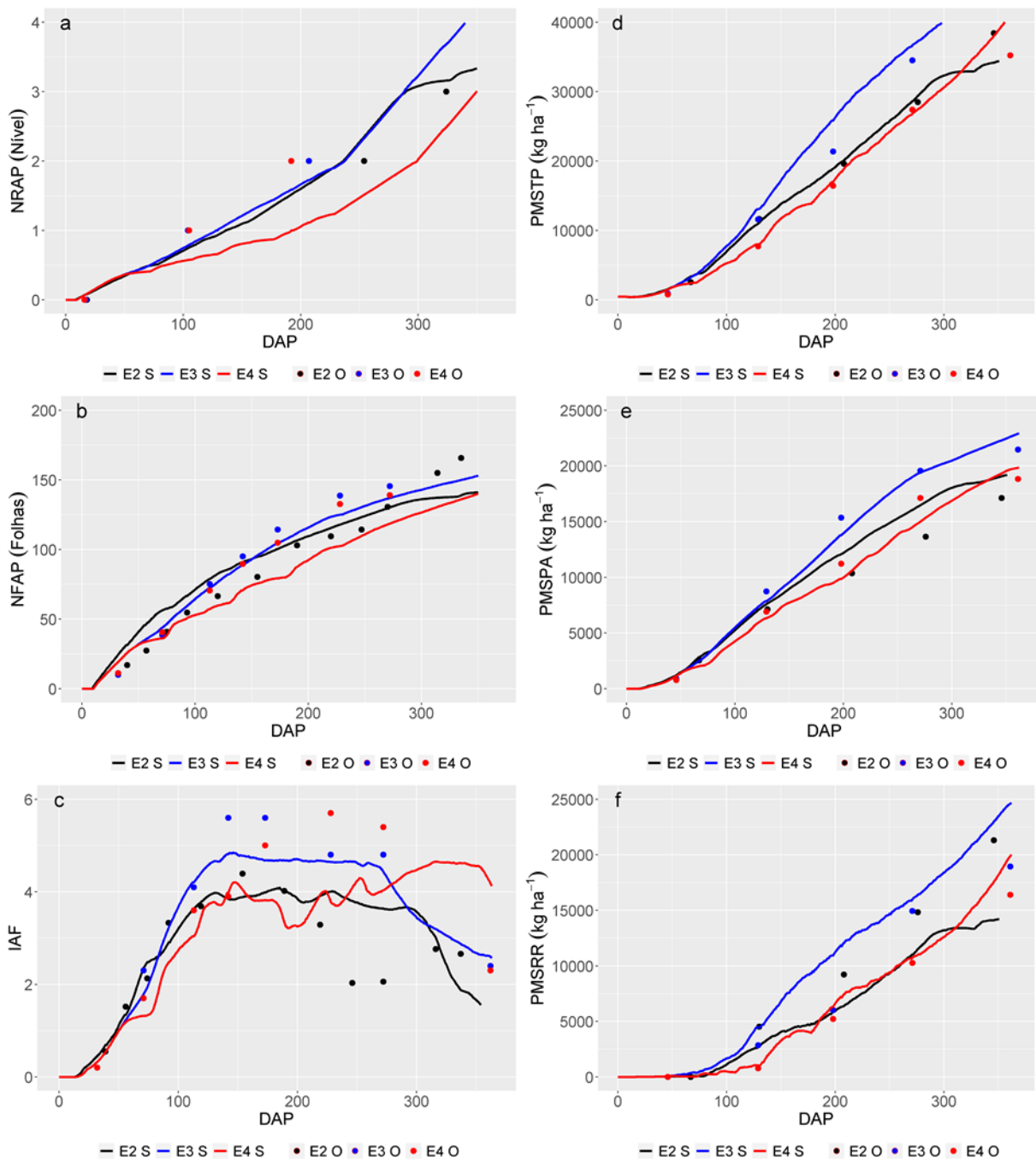


Figura 4. Tendências de crescimento simuladas, para variedade BRS Novo Horizonte, com valores observados plotados para o (a) nível de ramificação do ápice (NRAP); (b) número de folhas do ápice (NFAP); (c) índice de área foliar (IAF); (d) produtividade de massa seca total da plantação (PMSTP); (e) produtividade de massa seca da parte aérea (PMSPA); (f) produtividade de massa seca de raízes de reserva (PMSRR). E2 S: experimento 2 simulação; E3 S: experimento 3 simulação; E4 S: experimento 4 simulação; E2 O: experimento 2 observação; E3 O: experimento 3 observação; E4 O: experimento 4 observação

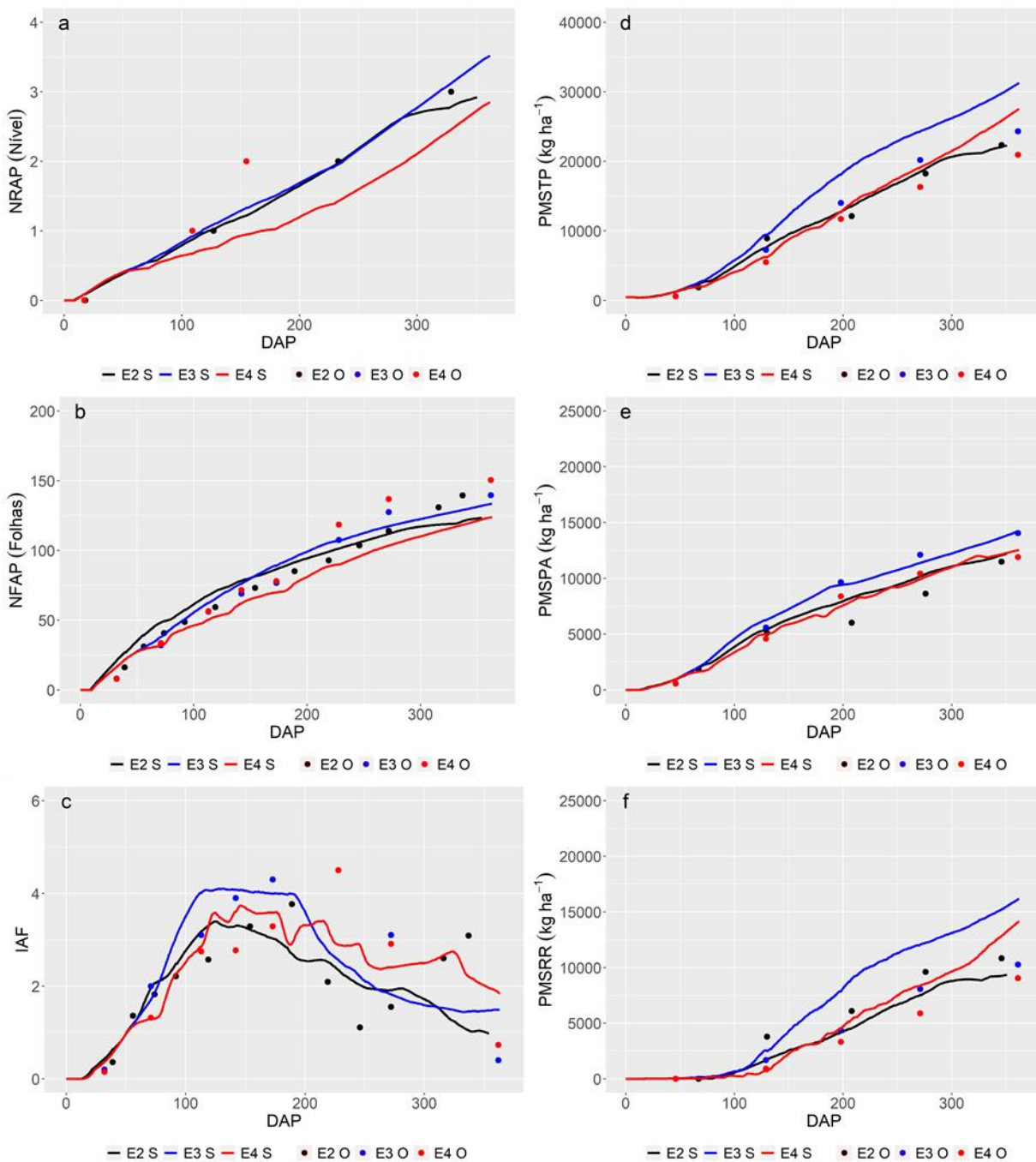


Figura 5. Tendências de crescimento simuladas, para variedade Eucalipto, com valores observados plotados para o (a) nível de ramificação do ápice (NRAP); (b) número de folhas do ápice (NFAP); (c) índice de área foliar (IAF); (d) produtividade de massa seca total da plantação (PMSTP); (e) produtividade de massa seca da parte aérea (PMSPA); (f) produtividade de massa seca de raízes de reserva (PMSRR). E2 S: experimento 2 simulação; E3 S: experimento 3 simulação; E4 S: experimento 4 simulação; E2 O: experimento 2 observação; E3 O: experimento 3 observação; E4 O: experimento 4 observação

Houve maior dispersão dos dados observados em relação aos dados simulados na simulação da tendência de crescimento do nível de ramificação do ápice (Figuras 4, 5 a) e número de folhas por ápice (Figuras 4, 5 b), independente da variedade, no experimento 4, que nos demais (Tabela 4). O experimento 4 representou a condição de cultivo com

condição de oferta hídrica mais limitada em relação aos demais experimentos, com plantio durante a época seca e irrigação complementar apenas até os 45 DAP. A diferença entre as simulações com condição de cultivo com suprimento hídrico ótimo e restrito pode ser observada ao verificar as diferenças nas tendências de crescimento dos dados de saída dos experimentos 3 e 4, para ambas as variedades (Figuras 4 e 5), pois o plantio se deu na época mais seca, mas a oferta de água adequada no experimento 3.

A penalidade que o modelo aplica em função da restrição hídrica é coerente, pois, embora tolerante, a cultura da mandioca apresenta sensibilidade a falta de água e, dependendo da severidade do estresse tende a apresentar reações morfofisiológicas, como uma forma de melhorar a convivência com a época seca, como a redução de área foliar e controle estomático (El-Sharkawy, 2006). Moreno-Cadena et al., (2021) explica que no modelo o estresse por déficit hídrico é baseado no conteúdo de água disponível do solo disponível em vez da razão entre a transpiração real e potencial que é usada nos outros modelos que simulam o cultivo da mandioca. A autora explica que esse fator de estresse atua retardando a emergência e a ramificação, diminuindo a taxa de aparecimento de folhas, o tamanho das folhas e a fotossíntese.

Por outro lado, comenta-se que a penalidade atribuída pelo modelo na simulação dessas variáveis, nas condições do experimento 4, parece ter sido exagerada. Até mesmo porque, apesar de ter oferta hídrica mais limitada que os demais experimentos, entre o segundo e quinto mês de cultivo, o experimento 4 não representou uma condição de déficit hídrico tão severa, pois ocorreram chuvas, mesmo que mais pouco intensas e espaçadas, de acordo com a figura 1.

Outro detalhe, sobre a simulação do nível de ramificação da parte aérea, é que o modelo não foi capaz de simular as diferenças que ocorreram entre as épocas de plantio (Figura 1), entre os experimentos 1 e 2 (Figuras 2; 3; 4; 5 a) e os experimentos 3 e 4 (Figuras 4; 5 a), mesmo com variação de parâmetros que controlam a sensibilidade do modelo ao fotoperíodo. Algo que pode ser aperfeiçoado, em uma possível atualização da calibração, com uma base de dados obtida para essa finalidade, uma vez que a sensibilidade a variações de época de plantio é um fator importante, principalmente em simulações usadas na avaliação da produtividade em diferentes épocas do ano, pois o nível de ramificação da parte aérea interfere na simulação do IAF e pode influenciar na simulação da produtividade de massa seca da planta (Phoncharoen et al., 2021).

Em relação ao IAF, independente da variedade, não apresentou correlação tão boa quanto as demais variáveis avaliadas tanto na calibração, quanto na avaliação. O modelo não simulou bem a fase de senescência foliar, para variedade BRS Novo Horizonte, que

ocorreu, próximo, do intervalo de tempo entre 180 e 270 DAP (Figura 4 c). De forma parecida, apresentou falhas na simulação do IAF para variedade Eucalipto, após a fase de senescência foliar, entre 270 e 350 DAP (Figura 5 c).

Phoncharoen et al. (2021), que realizaram a calibração do modelo MANIHOT-Cassava com informações de variedades de mandioca, em clima tropical, também registraram erros parecidos em parte das simulações de IAF. Para esses autores a simulação do IAF e massa seca de folhas apresentaram maior quantidade de erros quando comparado as demais variáveis. Na simulação de IAF desses autores as tendências de crescimento simuladas ora falhavam em alcançar o IAF máximo, ora falhavam em simular a fase de senescência foliar, algo bem próximo ao que foi verificado no presente trabalho.

É provável que dentre os dados de saída do modelo simulados pelo modelo, o IAF seja um dos mais desafiadores. Isso ocorre porque a maioria dos parâmetros de calibração ajustados tem alguma influência sobre a variável. Moreno-Cadena et al., (2020) que estudou a sensibilidade de dados de saída do MANIHOT-Cassava em função de variações nos parâmetros de calibração registraram que 10 dos 16 parâmetros avaliados durante a análise de sensibilidade interferiram na simulação do IAF máximo, em ambiente quente.

Em relação a distribuição de fitomassa, o modelo foi eficiente na simulação da tendência de crescimento da produtividade de massa de matéria seca total da plantação e da parte aérea para ambas as variedades, tanto na calibração quanto em sua avaliação (Tabelas 3 e 4). Contudo, houve mais erros na simulação da produtividade de massa seca de raízes de reserva para BRS Novo Horizonte, ocorrendo ora tendências de sobrestimativa da produtividade final de massa seca de raízes de reserva, para os experimentos 3 e 4 (Figura 4 f), ora tendências de subestimativas para o experimento 1 e 2 (Figura 2 f; Figura 4 f). A variedade Eucalipto apresentou subestimativa leve nos experimentos 1 e 2 (Figura 3 f; figura 5 f). Contudo, houve sobrestimativa da produtividade final nos experimentos 3 e 4 (Figura 5 f).

Também é possível verificar a partir das diferenças entre as tendências de crescimento dos experimentos 3 e 4, que o modelo acerta ao penalizar a produtividade de massa seca no experimento 4 que teve menor disponibilidade hídrica, para variedade BRS Novo Horizonte (Figuras 4 d, e, f) e para variedade Eucalipto (Figuras 5 d, e, f). Contudo, assim como verificado para as variáveis de desenvolvimento e crescimento, a penalidade imposta pelo modelo parece ter sido demasiada, sobretudo na simulação da produtividade de massa seca da variedade BRS Novo Horizonte.

É possível que o fato da calibração ter sido realizada apenas com um experimento, cultivado em condição de oferta hídrica ótima, possa ter influenciado negativamente a

simulação dos experimentos cultivados sob oferta hídrica mais limitada. Em uma possível atualização da calibração do MANIHOT-Cassava nas condições avaliadas no presente trabalho é importante avaliar melhor as diferenças que ocorrem entre as épocas de plantio e entre as condições de cultivo associadas a oferta hídrica. Avaliar o desenvolvimento, crescimento e produção das plantas em um ambiente mais quente e seco, como o do Semiárido, também pode ser útil e oportuno, para aperfeiçoar as simulações do modelo para condições de cultivo mais severas.

Conclusão

O modelo calibração do modelo MANIHOT-Cassava foi eficiente em simular o desenvolvimento, crescimento e produção das variedades BRS Novo Horizonte e Eucalipto. As exceções foram o índice de área foliar que apresentou falhas nas simulações das tendências de crescimento, principalmente após os 180 DAP. Além disso o modelo penalizou demasiadamente o desempenho das plantas em condição de oferta hídrica mais limitada, principalmente a BRS Novo Horizonte.

Referências bibliográficas

- Bongiovani, P. F. **Mudanças climáticas, seus impactos na cultura da mandioca no Semiárido Brasileiro e estratégias de manejo para mitigação das perdas.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019.
- Boote, K. J. et al. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, v. 88 n. 5, 704-716, 1996.
- Corrêa, S. T. R. et al. Aplicações e limitações da modelagem em agricultura: revisão. **Revista de Agricultura**, v. 86, n. 1, p. 1-13, 2011.
- El-Sharkawy, M. A. International research on cassava photosynthesis, productivity, eco-physiology, and responses to environmental stresses in the tropics. **Photosynthetica**, v. 44, n. 4, p. 481-512, 2006.
- Hoogenboom, G. et al. The DSSAT crop modeling ecosystem. In: K.J. Boote. **Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture.** Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, United Kingdom, 2019.
- Jones, J. W. et al. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural systems**, v. 155, 240-254, 2017.
- Moreno-Cadena, P. et al. Modeling growth, development and yield of cassava: A review. **Field Crops Research**, v. 267, p. 1-13, 2021.

Moreno-Cadena, L. P. et al. Importance of genetic parameters and uncertainty of MANIHOT, a new mechanistic cassava simulation model. **European Journal of Agronomy**, v. 115, p. 1-14, 2020.

Moreno-Cadena, L. P. **Modelo de simulación de yuca (Manihot esculenta Crantz) en el trópico. 2018.** Dissertação (Mestrado em Fisiologia dos cultivos). Palmira: Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2018.

Oliveira, E. J. et al. BRS Novo Horizonte-a new cassava variety for industrial use. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, p. 1-5, 2020.

Phoncharoen, P. et al. The impact of seasonal environments in a tropical savanna climate on forking, leaf area index, and biomass of cassava genotypes. **Agronomy**, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2019.

Phoncharoen, P. et al. Performance of the CSM–MANIHOT–Cassava model for simulating planting date response of cassava genotypes. **Field Crops Research**, v. 264, n.1, p 1-15 2021

Silva, T.S.M. et al. **Boletim Meteorológico da Estação Convencional de Cruz das Almas, BA: Variabilidade e Tendências Climáticas**; Documentos 216; Embrapa Mandioca e Fruticultura: Cruz das Almas, 2016.

Souza, L. S.; Souza, L.D. **Caracterização físico-hídrica de solos da área do Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura Tropical.** Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 56 p., 2001.