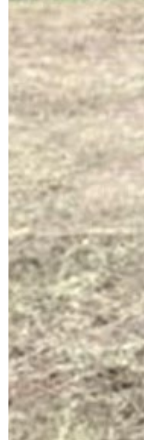


Estimativa da Biomassa de Milho por Imagens RGB de Drones



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Meio-Norte
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
140**

**Estimativa da Biomassa de Milho
por Imagens RGB de Drones**

*Aderson Soares de Andrade Junior
Alzeneide da Silva Lopes
Edson Alves Bastos
Milton José Cardoso
Rayssa Carolinne Mouzinho de Sousa*

***Embrapa Meio-Norte
Teresina, PI
2021***

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Meio-Norte
Av. Duque de Caxias, 5.650, Bairro Buenos Aires
Caixa Postal 01
CEP 64008-480, Teresina, PI
Fone: (86) 3198-0500
Fax: (86) 3198-0530
www.embrapa.br/meio-norte]
Serviço de Atendimento ao Cidadão(SAC)
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Unidade Responsável

Presidente
Rosa Maria Cardoso Mota de Alcantara

Secretário-Executivo
Jeudys Araújo de Oliveira

Membros
*Ligia Maria Rolim Bandeira, Edvaldo Sagrilo,
Orlane da Silva Maia, Luciana Pereira dos Santos
Fernandes, Francisco Jose de Seixas Santos, Paulo
Henrique Soares da Silva, João Avelar Magalhães,
Paulo Fernando de Melo Jorge Vieira, Alexandre
Kemenes, Ueliton Messias, Marcos Emanuel da
Costa Veloso, Jose Alves da Silva Câmara*

Supervisão editorial
Ligia Maria Rolim Bandeira

Revisão de texto
Francisco de Assis David da Silva

Normalização bibliográfica
Orlane da Silva Maia

Tratamento das ilustrações
Jorimá Marques Ferreira

Editoração eletrônica
Jorimá Marques Ferreira

Foto da capa
Rayssa Carolinne Mouzinho de Sousa

1ª edição
1ª impressão (2021): formato digital

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Meio-Norte

Estimativa da biomassa de milho por imagens RGB de drones / Aderson Soares de Andrade
Junior ... [et al.]. – Teresina : Embrapa Meio-Norte, 2021.
PDF (44 p.) : il. -- (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Meio-Norte, ISSN
1413-1455 ; 140).

1. Sensoriamento remoto. 2. UAV. 3. CSM. 4. Estrutura de planta. 5. Agricultura de precisão.
6. Zea mays. I. Andrade Junior, Aderson Soares de. II. Embrapa Meio-Norte. III. Série.

CDD 621.3678 (21. ed.)

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução.....	8
Material e Métodos	9
Resultados e Discussão	19
Conclusões.....	41
Recomendações.....	41
Referências	42

Estimativa da Biomassa de Milho por Imagens RGB de Drones

Aderson Soares de Andrade Junior¹

Alzeneide da Silva Lopes²

Edson Alves Bastos³

Milton José Cardoso⁴

Rayssa Carolinne Mouzinho de Sousa⁵

Resumo: A biomassa é um parâmetro agrônômico estratégico utilizado para indicar o status de crescimento da cultura, por causa dos efeitos das práticas de manejo agrícola. A metodologia convencional para se obter a biomassa ocorre por métodos destrutivos, que requerem a colheita manual das plantas, pesagem e secagem em estufa, inviabilizando as medidas em grandes áreas de produção. Como alternativa, recomendam-se técnicas de sensoriamento remoto com imagens aéreas adquiridas por drones, com boa precisão, economia de tempo e mão de obra. O estudo teve como objetivo a proposição e validação de modelos de estimativa da biomassa seca de plantas de milho, usando-se a altura das plantas extraída de modelos digitais de superfície (CSM) gerados de imagens aéreas de câmera RGB embarcada em veículo aéreo não tripulado. Utilizou-se um ensaio de avaliação de quatro regimes hídricos, com base na evapotranspiração da cultura (ETc) (0,60; 0,80; 1,00; e 1,20 ETc) e três cultivares de milho (BRS-3046, BRS-2022 e Status Vip-3 Syngenta). As imagens RGB foram efetuadas na fase de pendoamento do milho (59 dias após semeadura). A altura das plantas extraída dos CSMs obtidos das imagens RGB foi utilizada para a estimativa da biomassa seca das plantas das cultivares nos regimes

¹Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia-Irrigação, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

²Engenheira-agrônoma, mestre em Agronomia, doutoranda em agronomia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI.

³Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia-Irrigação, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

⁴Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia-Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

⁵Engenheira-agrônoma, mestranda em agronomia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI

hídricos avaliados. Modelos de regressão exponencial foram propostos e validados com base em medidas de altura e de biomassa efetuadas em campo. Utilizou-se como indicadores da qualidade dos modelos propostos o coeficiente de determinação (R^2), o erro-padrão de estimativa (SEE), a raiz quadrada do erro quadrado médio (RMSE) e a raiz quadrada do erro quadrado médio normalizado (nRMSE). A altura das plantas extraída dos CSMs teve correlação elevada com as medidas efetuadas em campo ($R^2 = 0,8897$ $p < 0,001$; SEE = 0,099 m; RMSE = 0,118 m; e nRMSE = 6,7%). Para todo o conjunto de dados, os modelos de regressão para estimativa da biomassa, com base na altura das plantas extraída dos CSMs, apresentaram ajuste adequado com as medidas de biomassa em campo ($R^2 = 0,8434$ $p < 0,001$; SEE = 0,1466 kg m⁻²; RMSE = 0,153 kg m⁻²; e nRMSE = 15,3%). Os modelos de regressão propostos são capazes de diferenciar a produção de biomassa seca das plantas de milho em resposta aos regimes hídricos e cultivares avaliados.

Termos para indexação: *Zea mays* L.; UAV; CSMs; altura de plantas; agricultura de precisão.

Estimation of corn biomass using RGB images from unmanned aerial vehicle

Abstract: Biomass is a basic agronomic parameter used to indicate the growth status of the crop, due to the effects of agricultural management practices. The conventional methodology for obtaining biomass occurs by destructive methods, which require manual harvesting of the plants, weighing and drying in the oven, making measurements in large production areas unfeasible. As an alternative, remote sensing techniques with aerial images acquired by unmanned aerial vehicles are recommended, with good precision, saving time and manpower. The study aimed to propose and validate models for estimating the dry biomass of corn plants, using the height of plants extracted from digital surface models (CSMs) generated from aerial images from an RGB camera embedded in an unmanned aerial vehicle. An evaluation trial of four water regimes, based on crop evapotranspiration (ETc) (0.60; 0.80; 1.00 and 1.20 ETc) and three corn cultivars (BRS-3046, BRS -2022 and Status Vip-3 Syngenta). RGB images were taken at the corn harvesting stage (59 days after sowing). The height of the plants extracted from the CSMs obtained from the RGB images was used to estimate the dry biomass of the plants of the cultivars in the evaluated water regimes. Exponential regression models were proposed and validated based on height and biomass measurements made in the field. It was used as indicators of the quality of the proposed models, the coefficient of determination (R^2), standard error of estimate (SEE), the square root of the mean square error (RMSE) and the square root of the normalized mean square error (nRMSE). The height of the plants extracted from the CSMs had a high correlation with the measurements made in the field ($R^2 = 0.8897$ $p < 0.001$; SEE = 0.099 m; RMSE = 0.118 m and nRMSE = 6.7%). For the entire data set, the regression models for estimating biomass, based on the height of the plants extracted from the CSMs, showed an appropriate adjustment with the biomass measurements in the field ($R^2 = 0.8434$ $p < 0.001$); SEE = 0.1466 kg m^{-2} ; RMSE = 0.153 kg m^{-2} and nRMSE = 15.3%). The proposed regression models are able to differentiate the dry biomass production of corn plants in response to the water regimes and cultivar evaluated.

Index terms: *Zea mays* L.; UAV; CSMs; plant height; precision agriculture.

Introdução

O monitoramento das culturas no período de seu ciclo de desenvolvimento é um pré-requisito fundamental para a prática da agricultura de precisão (Mulla, 2013). Os fatores como disponibilidade de água e de nutrientes no solo, status fitossanitário e práticas de manejo afetam o desenvolvimento e o rendimento das culturas agrícolas (Goyné et al., 1996; Shanahan et al., 2001). O conhecimento do estado de desenvolvimento da cultura em campo pode ser obtido a partir de parâmetros de cultivo, tais como, altura da planta, biomassa, teor de nitrogênio na planta, teor de nitrogênio no solo e índice de área folia (IAF), entre outras variáveis (Jensen et al., 1990; Thenkabail et al., 2000).

A biomassa desempenha papel importante na previsão do rendimento e no manejo das culturas agrícolas (Bendig et al., 2014). A biomassa pode ser estimada por meio de medições de refletância espectral do dossel das culturas (Jensen et al., 1990; Li et al., 2010; Koppe et al., 2012; Gnyp et al., 2014). No entanto essas medições frequentemente envolvem equipamentos sofisticados e de custo elevado, os quais requerem calibração. Como alternativa, recomendam-se técnicas de sensoriamento remoto com imagens aéreas adquiridas por drones, por causa das várias vantagens sobre os métodos convencionais de amostragem de campo (destrutivos) (Fassnacht et al., 2014; Wani et al., 2015).

Estudos demonstram que a altura da planta está positivamente correlacionada com a biomassa das culturas. Em combinação com um modelo de solo sem vegetação, a altura das plantas pode ser utilizada para quantificar, usando-se os modelos digitais de elevação (DEM) ou modelos de superfície (CSM) (Hoffmeister et al., 2010; Bendig et al., 2013; Hoffmeister et al., 2013; Li et al., 2016; Tumlisan, 2017; Acorsi et al., 2019). Bendig et al. (2013), ao utilizarem imagens aéreas RGB adquiridas com drone, correlacionaram a biomassa das culturas de cevada e de arroz com a altura da planta, usando-se modelos digitais de superfície com resultados promissores. As biomassas fresca e seca de plantas de cevada também foram modeladas por Bendig et al. (2014), em função da altura das plantas extraída de modelo digital de superfície, obtidas de imagens aéreas RGB utilizando-se drone. Os resulta-

dos alcançados nesses estudos indicam que o emprego de modelos digitais de superfície é uma metodologia promissora para estimativa da altura e da biomassa de plantas.

Para a cultura do milho, destacam-se os estudos conduzidos por Li et al. (2016), Tumlasan (2017) e Calou et al. (2019), os quais estimaram a altura das plantas e as biomassas fresca e seca de plantas de milho por meio da geração de modelos digitais de superfície e de nuvem de pontos, respectivamente, oriundos de imagens aéreas adquiridas por drones. Porém ainda são incipientes os estudos locais conduzidos para avaliar a aplicabilidade dessa metodologia em cultivo de milho nas condições de clima e solo de Teresina, PI.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo a proposição e validação de modelos de estimativa da biomassa seca de plantas de milho, usando-se a altura das plantas extraída de modelos digitais de superfície gerados de imagens aéreas RGB, capturadas por veículo aéreo não tripulado (vant).

Material e Métodos

O estudo foi conduzido na estação experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina, PI, Brasil (5°05' S, 42°29' W e 72 m de altitude). As imagens aéreas RGB foram obtidas de um ensaio de avaliação do desenvolvimento e desempenho produtivo de cultivares de milho em resposta a diferentes regimes hídricos (Figura 1).

O clima da região, segundo a classificação climática de Thornthwaite e Mather (1955), é do tipo C1sA'a', caracterizado como subúmido seco, mega-térmico, com excedente hídrico moderado no verão. Apresenta temperaturas médias anuais de 28,2 °C, máximas de 34 °C e mínimas de 22,4 °C, umidade relativa média do ar de 69,5% e precipitação pluviométrica média de 1.318 mm por ano (Bastos; Andrade Júnior, 2019). Os registros foram obtidos da estação meteorológica automática situada a 500 m da área experimental.

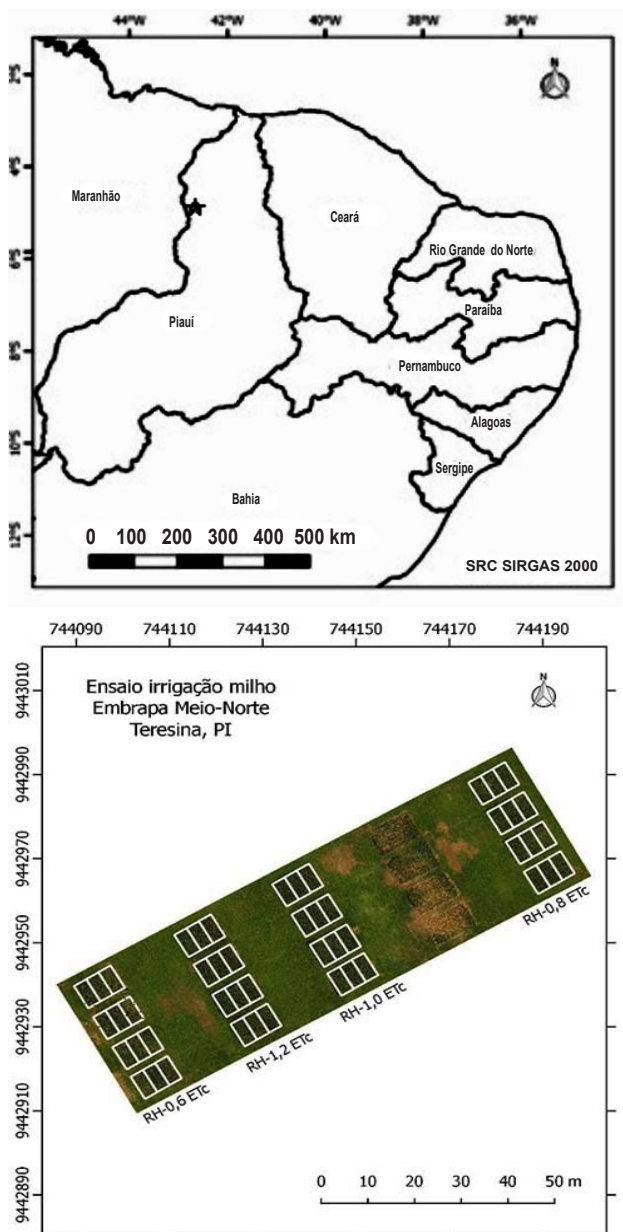


Figura 1. Localização do município de Teresina, PI (acima) e imagem digital aérea da área experimental (abaixo). Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (Melo et al., 2019), cujas características físico-hídricas determinadas pelo Laboratório da Embrapa Meio-Norte são as seguintes: camada 0,0 - 0,2 m: areia grossa (AG) = 532,0 g kg⁻¹, areia fina (AF) = 344,5 g kg⁻¹; silte (S) = 37,5 g kg⁻¹, argila (A) = 86,0 g kg⁻¹, capacidade de campo (CC) = 22,0% (em volume), ponto de murcha permanente (PMP) = 5,3% (em volume) e densidade (DS) = 1,65 g cm⁻³; camada 0,2 - 0,4 m: AG = 453,0 g kg⁻¹, AF = 358,5 g kg⁻¹, S = 52,5 g kg⁻¹, A = 136,0 g kg⁻¹, CC = 20,8% (em volume), PMP = 6,0% (em volume) e DS = 1,7 g cm⁻³. A adubação foi realizada conforme a análise prévia do solo e a recomendação para a cultura do milho (Cardoso et al., 2012).

O ensaio foi conduzido sob irrigação por aspersão convencional fixa, com os aspersores espaçados em 12 m x 12 m. Avaliou-se a aplicação de quatro regimes hídricos (RH) com base na evapotranspiração da cultura (ETc) (0,6; 0,8, 1,0; e 1,2 ETc) em três cultivares de milho (BRS-3046, BRS-2022 e Status Vip-3 Syngenta). Os RH diferenciados foram aplicados utilizando-se tempos de irrigação distintos. Utilizou-se o método de Penman - Monteith para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) e para os valores de coeficientes de cultura (Kc) da FAO (Allen et al., 1998). As lâminas totais de irrigação aplicadas em cada RH, desde a semeadura (05/08/2019) até a data da avaliação (03/10/2019), foram de 274,0 mm (RH = 0,6 ETc), 305,7 mm (RH = 0,8 ETc), 331,5 mm (RH = 1,0 ETc) e 357,9 mm (RH = 1,2 ETc).

Utilizou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso, com os tratamentos arranjados em parcelas subdivididas (RH nas parcelas e cultivares nas subparcelas), em cinco repetições (Figura 2). A semeadura foi efetuada em um espaçamento de 0,5 m entre fileiras, com cinco plantas por metro (10 plantas m⁻²). A subparcela foi composta por seis fileiras de 6 m (18 m²), com as quatro fileiras centrais (12 m²) usadas nas avaliações, das quais 6 m² foram usados para retirada de plantas para análise de crescimento e 6 m² para medida da produção final. A parcela experimental mediu 36 m². A semeadura ocorreu em 05/08/2019 e a colheita (grãos secos) em 31/10/2019.

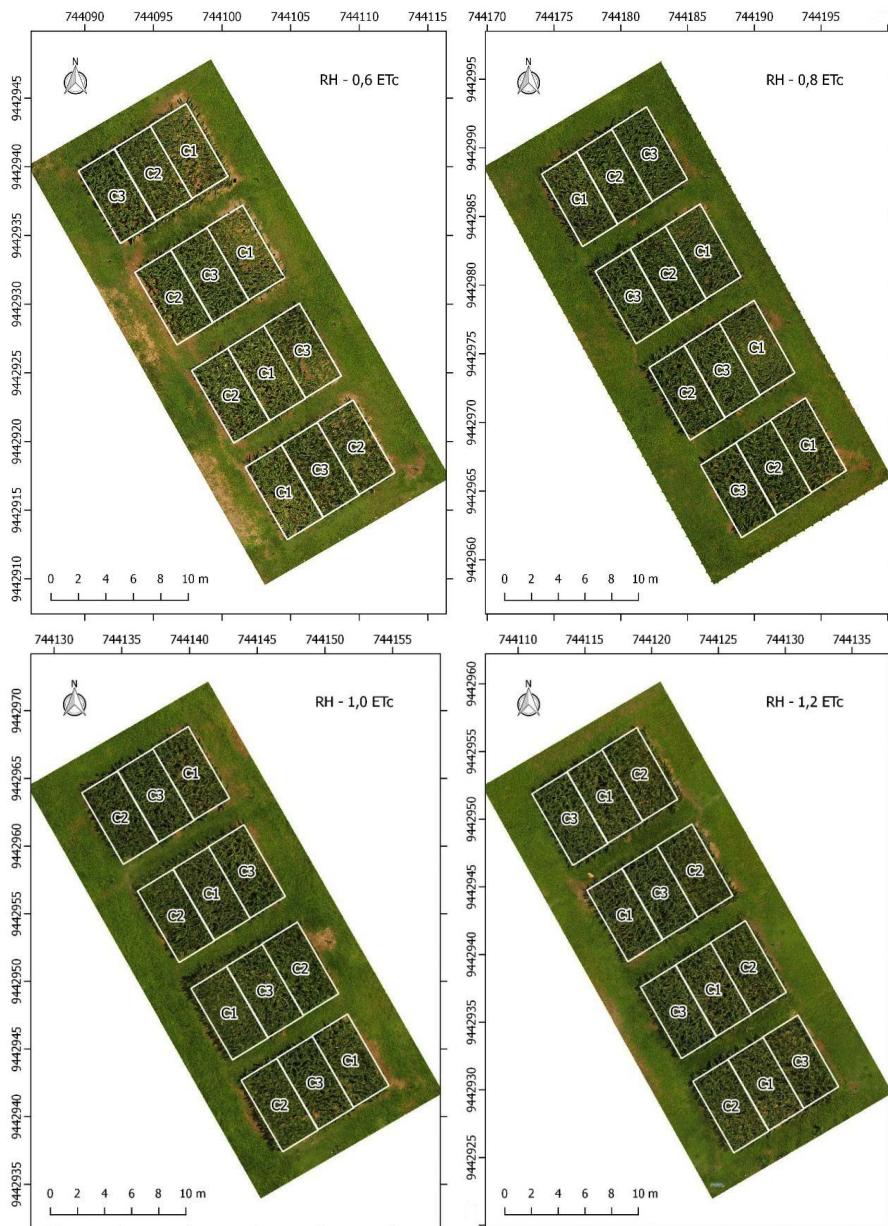


Figura 2. Distribuição dos tratamentos (RH e cultivares) na área experimental. Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI. C1: BRS-3046; C2: BRS-2022; C3: Status Vip-3 Syngenta.

Para o monitoramento do conteúdo de água do solo (% em volume), foram instalados três tubos de acesso de PVC em cada regime hídrico, com 1,0 m de profundidade, dispostos entre as fileiras centrais. Utilizou-se uma sonda de capacitância (FDR) modelo Diviner 2000® da Sentek Pty., Ltda, Austrália. As leituras foram realizadas diariamente, sempre antes das irrigações, nas camadas 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m e 0,4 m, durante o ciclo da cultura.

Quantificaram-se a altura e a biomassa seca de uma planta por subparcela, selecionada aleatoriamente na área destinada à análise de crescimento. A altura da planta correspondeu ao comprimento do colmo, medido com trena graduada, desde o nível do solo até a inserção da última folha completamente expandida. A biomassa seca total da parte aérea foi determinada por meio da secagem da planta (colmo, folhas e espigas) até massa constante, em estufa de circulação forçada de ar regulada para 65 °C. Posteriormente, a biomassa seca por planta foi transformada para biomassa seca por área (kg m^{-2}), utilizando-se como fator de correção o estande final de plantas de cada subparcela.

Para a aquisição das imagens, utilizou-se um veículo aéreo não tripulado (vant), tipo quadricóptero, marca DJI, modelo Phantom 3 Professional (DJI, Nanshan District, Shenzhen, China). Realizaram-se dois voos nos dias 21/08/2019 e 03/10/2019, aos 16 e 59 dias após a semeadura do milho (DAS), respectivamente, no horário entre 11h e 12h. Os voos foram planejados, utilizando-se o software Pix4D Capture®. Os planos de voo foram criados, garantindo-se que a captura fosse feita com sobreposições lateral e frontal de 80%, mantendo-se a linha de voo a 30 metros acima do nível do solo.

As imagens RGB foram adquiridas por um sensor marca DJI, modelo FC300X, abertura f/2.8, distância focal de 3,6 mm, resolução de 4000 x 3000 pixels (12 MP), capaz de capturar três bandas espectrais: red (668 nm), green (560 nm) e blue (475 nm). A configuração adotada por ocasião do voo foi: ISO 100, velocidade de abertura de 1/800 s e balanço de branco zero. Usou-se, para planejamento dos voos, o software Pix4D-Capture®

(www.pix4d.com), enquanto, para os ajustes de configuração da câmera, usou-se o software DJI GO® (www.dji.com). As imagens foram salvas em formato jpeg de 8 bits.

Para assegurar a criação dos ortomosaicos e dos modelos digitais de superfície (CSM) e de terreno (DTM) com qualidade adequada, utilizaram-se sobreposições lateral e frontal de 80% por ocasião do voo, o que resultou em um total de 93 fotografias aéreas para cobrir toda a área experimental, com GSD (ground sample distance) de $\approx 1,5 \text{ cm pixel}^{-1}$.

A geração dos ortomosaicos e os modelos digitais de superfície (CSM) e de terreno (DTM) das imagens aéreas foram processados com o software OpenDroneMap (WebODM). A configuração do software permitiu a geração dos ortomosaicos e dos modelos digitais de superfície com resoluções espaciais de $1,36 \text{ cm pixel}^{-1}$ e de $5,44 \text{ cm pixel}^{-1}$, respectivamente. O procedimento compreendeu as etapas de alinhamento das fotos, de geração das nuvens de pontos, de modelos digitais de superfície, de modelos digitais de terreno e de ortomosaicos (Figura 3). A sobreposição das imagens adotada proporcionou que os ortomosaicos fossem gerados com sobreposição de mais de nove imagens aéreas em cada ponto, notadamente na parte central da área experimental (Figura 4A). Os ortomosaicos foram submetidos à correção geométrica (ortorretificação) por meio de nove pontos de controle (CGPs) distribuídos na área, permitindo uma correção geométrica horizontal e vertical da ordem de $0,0045 \text{ m}$ (Figura 4B). O processo de geração dos ortomosaicos e dos modelos digitais de superfície seguiu o tutorial descrito no manual do usuário do WebODM (2020) (Figura 3).

O ortomosaico gerado com as imagens do dia 03/10/2019 passou por processo de classificação supervisionada (método da máxima verossimilhança), permitindo a rasterização do ortomosaico em duas classes (solo e folhas), que admitiu a remoção dos pixels classificados como solo do mosaico, assegurando que a estimativa da altura e da biomassa das plantas fosse efetuada apenas com os pixels classificados como folhas (Figura 5). O processo foi efetuado por meio do plugin SCP (Semi Automatic Classification) do QGIS v. 2.18 (QGIS, 2016).

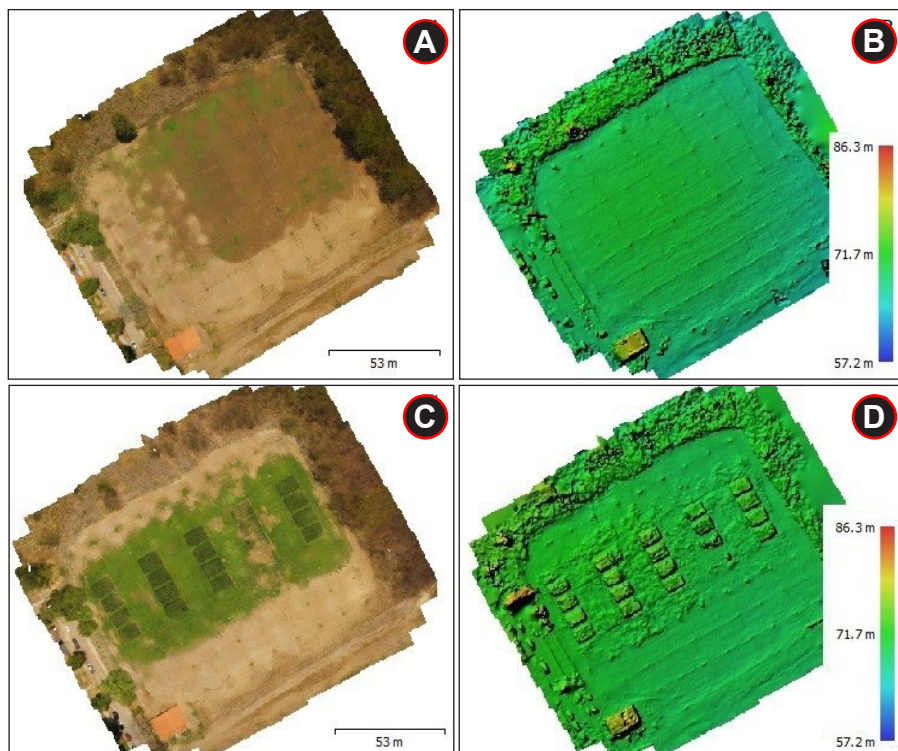


Figura 3. Ortomosaicos e modelos digitais de superfície (CSM) e de terreno (DTM) gerados com as imagens da área experimental. A: ortomosaico (21/08/2019); B: DTM (21/08/2019); C: ortomosaico (03/10/2019); D: CSM (03/10/2019). Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

A camada raster equivalente à altura das plantas (PH_{CSM}) aos 59 dias após a semeadura foi obtida subtraindo-se os valores dos pixels dos modelos digitais de superfície (CSM) da imagem do dia 03/10/2019 dos pixels da imagem do dia 21/08/2019, considerada como imagem de referência (DTM). Essa etapa foi efetuada utilizando-se a calculadora raster do QGIS v. 2.18. (QGIS, 2016). Utilizou-se uma camada vetorial com as subparcelas experimentais e a camada raster classificada contendo apenas a classe de vegetação (Figura 6A). Esse procedimento assegurou que a camada raster PH_{CSM} contivesse apenas valores de pixels referentes à classe de vegetação, ou seja, altura de plantas (6B).

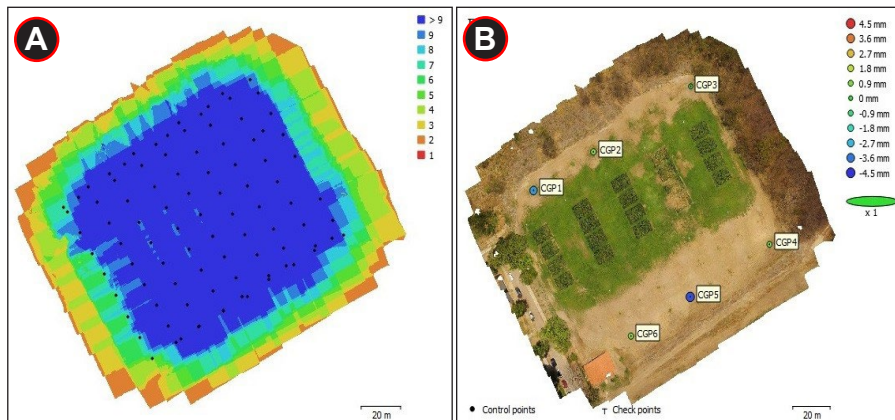


Figura 4. Número de imagens aéreas usadas para geração dos ortomosaicos e dos modelos digitais de superfície (CSM) e distribuição dos pontos de controle (CGPs) na área experimental. A: número de imagens sobrepostas na área experimental; B: ortomosaico retificado (03/10/2019) com indicação dos CGPs. Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.



Figura 5. Ilustração do processo de classificação supervisionada pelo método da Máxima Verossimilhança (recorte da imagem de 03/10/2019, RH = 1,2 ETc, Rep 2). A: ortomosaico original; B: imagem aérea após processo de classificação (folhas – áreas em verde; solo – áreas em amarelo). Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

Para a extração dos valores de altura das plantas da camada raster PH_{CSM} , utilizou-se o plugin Point Sampling Tools do QGIS v. 218 (QGIS, 2016). O plugin permite a extração de valores de pixels de camada raster com base em uma camada vetorial de pontos. A camada vetorial de pontos foi obtida por meio da ferramenta “Pontos aleatórios fixos no interior de polígonos” presente no menu Vetor > Investigar do QGIS v.218. Optou-se por um número de 100 pontos aleatórios, com distância mínima entre eles de 0,5 m. A camada vetorial contendo as subparcelas experimentais foi utilizada para delimitar os polígonos para geração dos pontos aleatórios. Como a área da classe de vegetação variou em cada subparcela experimental, dependendo da distribuição e do desenvolvimento das plantas nas subparcelas, o número de pontos aleatórios foi variável, apesar de ter-se optado por um número fixo de pontos (**Figura 6**).

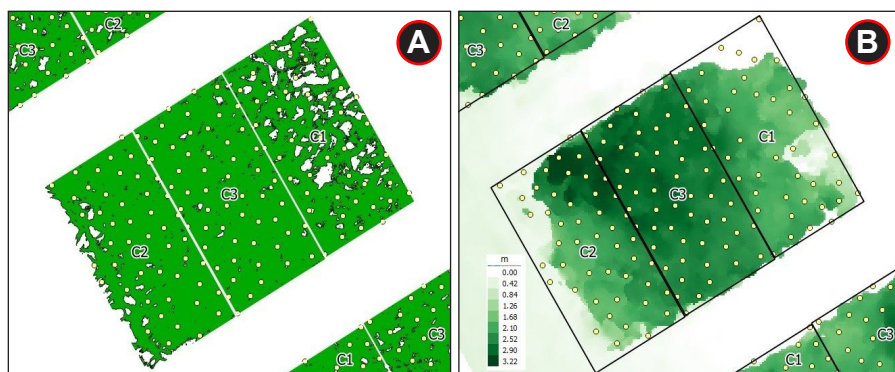


Figura 6. Ilustração do processo de extração dos valores de altura de plantas apenas de pixels classificados como vegetação, utilizando-se o plugin Point Sampling Tools. A: camada raster contendo a classe de vegetação; B: camada raster de altura de plantas (PH_{CSM}). Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

O conjunto de dados de altura de plantas extraído da camada raster PH_{CSM} por meio dos pontos aleatórios (plugin Point Sampling Tools) foi subdividido em duas partes: 70% para a etapa de geração dos modelos de regressão exponencial para estimativa da biomassa seca das plantas em função da altura das plantas (PH_{CSM} -M) e 30% para a etapa de validação dos modelos de regressão exponencial obtidos na etapa anterior (PH_{CSM} -V). Os

valores médios de altura de plantas medidos em campo ($PH_{REF}-C$), de altura de plantas para geração dos modelos de regressão ($PH_{CSM}-M$), de altura de plantas para validação dos modelos de regressão ($PH_{CSM}-V$) e de biomassa seca da parte aérea das plantas medida em campo ($BIO_{REF}-C$) das cultivares, em resposta aos regimes hídricos avaliados, foram submetidos à análise de correlação de Pearson. Efetuou-se também a análise de variância para avaliação das variáveis $PH_{REF}-C$, $PH_{CSM}-M$, $PH_{CSM}-V$ e $BIO_{REF}-C$ em resposta aos tratamentos aplicados de RH-ETc, de cultivar e de interação. A análise estatística foi efetuada com o pacote ExpDes.pt do R (Ferreira et al., 2014).

Para estimativa da biomassa seca das plantas em função da altura das plantas ($BIO_{CSM}-M$), foram ajustados modelos de regressão exponencial (Bendig et al., 2014; Acorsi et al., 2019). O grau de ajuste dos modelos de regressão exponencial obtidos para estimativa da biomassa seca das plantas ($BIO_{CSM}-M$) com o conjunto de dados de altura de plantas $PH_{CSM}-M$ foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2) (equação 1) e erro-padrão de regressão (SEE), que representa a distância média dos valores observados em relação à linha da regressão (equação 2). Na etapa de validação, os valores de biomassa seca de plantas estimados com os modelos de regressão exponencial ($BIO_{CSM}-M$), gerados a partir dos valores de altura de plantas do conjunto de dados de validação ($PH_{CSM}-V$), foram contrapostos aos valores de biomassa seca obtidos das plantas coletadas em campo (PH_{REF}) e medidos em laboratório. Para tanto, utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro quadrado médio (RMSE) (equação 3) e a porcentagem normalizada de RMSE (nRMSE) (equação 4). O RMSE relaciona a magnitude dos valores observados versus os valores estimados pelos modelos, enquanto o nRMSE é uma medida normalizada do RMSE usada para comparar o desempenho de diferentes modelos de regressão (Li et al., 2014, 2016).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (1)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{(\bar{Y}_i)} 100 \quad (4)$$

Em que:

n : número de observações; Y_i : valores de biomassa seca de plantas medidos em campo (kg m^{-2}); \hat{Y}_i : valores de biomassa seca de plantas estimados pelos modelos de regressão (kg m^{-2}); \hat{Y}_m : média dos valores de biomassa seca de plantas estimados pelos modelos de regressão (kg m^{-2}); \bar{Y}_i : média dos valores de biomassa seca de plantas medidos em campo.

Resultados e Discussão

Altura de plantas por modelos digitais de superfície (CSM)

A estatística descritiva dos valores de altura de plantas extraídos dos modelos digitais de superfície (CSM) relativa aos conjuntos de dados usados na fase de geração ($PH_{\text{CSM}}\text{-M}$) e de validação ($PH_{\text{CSM}}\text{-V}$) dos modelos de regressão para estimativa da biomassa seca das plantas é apresentada na Tabela 1. No conjunto de dados usados para a geração dos modelos de regressão (70% dos pontos aleatórios), considerando-se o total das quatro repetições de cada tratamento, o número de pontos utilizados na geração dos modelos variou de um mínimo de 142 (tratamento 0,6 ETc – C1) a um máximo de 159 (tratamento 1,2 ETc – C1) pontos. Para o conjunto de pontos destinados à fase de validação dos modelos (30% dos pontos aleatórios), o número de pontos utilizados variou de 60 (mínimo) (tratamento 0,6 ETc – C1) a 67 (máximo) (tratamento 1,2 ETc – C1) (Tabela 1). Mesmo

tendo-se optado por utilizar a ferramenta de “Pontos aleatórios fixos no interior de polígonos”, no caso de 100 pontos fixos por polígono (subparcela), esse número de pontos flutuou em função da área classificada como folhas em cada subparcela, conforme era esperado.

Contudo essa estratégia de seleção aleatória de pontos mostrou-se promissora, já que os valores mínimo, médio e máximo e desvio-padrão da altura de plantas extraídos dos CSMs foram bem similares para os mesmos tratamentos nos dois conjuntos de dados. Por exemplo, para o tratamento 1,2 ETc, na média das três cultivares, os valores mínimo, médio e máximo e desvio-padrão foram de 1,806 m, 2,011 m, 2,164 m e 0,159 m, respectivamente, para o conjunto de dados para geração dos modelos, enquanto para o conjunto de dados destinados à fase de validação, os valores mínimo, médio e máximo e desvio-padrão foram de 1,848 m, 1,989 m, 2,091m e 0,111 m, respectivamente (Tabela 1), valores estes próximos entre si.

Acorsi et al. (2019) conduziram estudo que avaliou o potencial de uso da altura de plantas baseada em CSMs, obtida a partir de imagens RGB na modelagem de biomassa da aveia-preta. Os autores utilizaram 30 polígonos com dimensões de 0,5 m x 0,5 m (0,25 m²), distribuídos nas parcelas, como camada vetorial para extração das variáveis estatísticas de altura de plantas dos CSMs, obtidos em diferentes fases fenológicas da aveia. Concluíram que as estatísticas descritivas, notadamente os valores médios de altura das plantas extraídos dos CSMs foram inferiores aos valores de referência medidos em campo, por causa da variabilidade dos pixels (cerca de 700 pixels) por área amostrada de 0,25 m², já que não apenas a parte superior das plantas está representada nos CSMs, mas também as partes inferiores ou até mesmo o nível do solo dependendo da estrutura da cultura, cobrindo mais detalhes do que as medições de altura de plantas baseadas no solo (Bendig et al., 2014). Daí, a importância de fazer-se a etapa prévia de classificação das imagens para extração dos valores de altura apenas de pixels de folhas.

Tabela 1. Estatística descritiva dos valores de altura de plantas extraídos dos modelos digitais de superfície (PH_{CSM}) relativa aos conjuntos de dados usados na fase de geração (PH_{CSM-M}) e de validação (PH_{CSM-V}) dos modelos de regressão para estimativa da biomassa seca das plantas.

RH-ETc	Cultivar	NP-V	Mín. (m)	Méd. (m)	Máx. (m)	DP (m)
PH_{CSM-M} (70% dos pontos aleatórios)						
0,6 ETc	C1	142	1,359	1,538	1,688	0,149
	C2	148	1,216	1,347	1,455	0,110
	C3	150	1,308	1,565	1,684	0,173
		147	1,294	1,483	1,609	0,144
0,8 ETc	C1	149	1,106	1,444	1,761	0,268
	C2	153	1,294	1,704	1,927	0,295
	C3	154	1,206	1,693	1,988	0,352
		152	1,202	1,614	1,892	0,305
1,0 ETc	C1	156	1,599	1,776	1,926	0,143
	C2	152	1,862	1,971	2,160	0,131
	C3	158	1,392	1,667	1,909	0,258
		155	1,618	1,804	1,998	0,177
1,2 ETc	C1	159	1,902	1,950	1,995	0,044
	C2	154	1,734	1,946	2,166	0,186
	C3	159	1,781	2,137	2,332	0,249
		157	1,806	2,011	2,164	0,159
PH_{CSM-V} (30% dos pontos aleatórios)						
0,6 ETc	C1	60	1,396	1,543	1,693	0,148
	C2	63	1,211	1,361	1,497	0,134
	C3	64	1,332	1,567	1,647	0,157
		62	1,313	1,490	1,613	0,146

Continua...

Tabela 1. Continuação.

RH-ETc	Cultivar	NP-V	Mín. (m)	Méd. (m)	Máx. (m)	DP (m)
0,8 ETc	C1	63	1,095	1,498	1,974	0,362
	C2	65	1,299	1,697	1,939	0,307
	C3	65	1,241	1,656	1,916	0,300
		64	1,211	1,617	1,943	0,323
1,0 ETc	C1	66	1,506	1,709	1,916	0,174
	C2	65	1,849	1,963	2,150	0,130
	C3	67	1,389	1,667	1,944	0,285
		66	1,581	1,779	2,003	0,196
1,2 ETc	C1	67	1,916	1,951	1,984	0,028
	C2	65	1,903	1,960	2,034	0,055
	C3	67	1,724	2,054	2,256	0,249
		66	1,848	1,989	2,091	0,111

RH-ETc: regimes hídricos aplicados com base na ETc; ETc: evapotranspiração da cultura; C1: cultivar BRS-3046; C2: cultivar BRS-2022; C3: cultivar Status Vip-3 Syngenta; NP-V: número de pontos aleatórios classificados como vegetação, para cada RH-ETc e cultivar, gerados pelo plugin Point Sampling Tools (total das quatro repetições); Mín.: valor mínimo de PH_{CSM} (m); Méd.: valor médio de PH_{CSM} (m); Máx.: valor máximo de PH_{CSM} (m); DP.: desvio-padrão dos valores de PH_{CSM} (m).

Nesse contexto, Bendig et al. (2014), ao avaliarem a extração da altura de plantas de cevada por meio dos CSMs, verificaram que a medida de referência das plantas em campo é muito subjetiva, quando se utilizam medidas efetuadas em plantas individuais. Os resultados indicaram que a medida efetuada em dez plantas isoladas escolhidas aleatoriamente não produz uma média representativa das plantas da parcela. Os autores recomendam que as medidas de altura das plantas em campo sejam efetuadas em um transecto dentro de cada parcela, medindo-se a altura a cada 0,5 m, de modo a cobrir melhor a heterogeneidade do dossel.

Considerando-se todos os regimes hídricos e as cultivares avaliadas, os valores de altura de plantas extraídos dos modelos digitais de superfície utilizados nas fases de geração (PH_{CSM-M}) e de validação (PH_{CSM-V}) dos modelos de regressão exponencial para estimativa da biomassa seca das plantas apresentaram elevada correlação com os valores de altura de plantas medidos em campo (PH_{REF-C}) (Figura 7). A correlação entre os valores de altura de plantas medidos em campo (PH_{REF-C}) com o conjunto de dados usados na geração dos modelos apresentou R^2 de 0,8897 ($p < 0,001$), enquanto o R^2 obtido com os dados utilizados na validação foi de 0,8412 ($p < 0,001$). Os valores de RMSE foram iguais a 0,118 m (PH_{CSM-M}) e 0,142 m (PH_{CSM-V}) e os de nRMSE foram de 6,7% (PH_{CSM-M}) e 8,0% (PH_{CSM-V}) (Figura 7). Os valores de RMSE e de nRMSE são considerados baixos para estudos dessa natureza e indicam que a metodologia usada para extração dos valores dos modelos digitais de superfície pode ser considerada adequada.

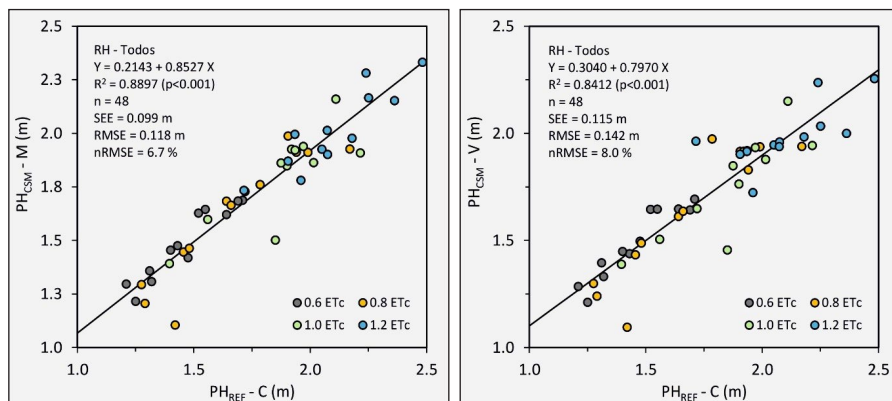


Figura 7. Correlação entre os valores de altura de plantas medidos em campo (PH_{REF-C}) e de altura de plantas extraídos dos modelos digitais de superfície usados na etapa de modelagem (PH_{CSM-M}) e de validação (PH_{CSM-V}) dos modelos de regressão exponencial para estimativa da biomassa seca das plantas. RH: regimes hídricos aplicados com base na ETc (0,6 ETc, 0,8 ETc, 1,0 ETc e 1,2 ETc); R^2 : coeficiente de determinação; p: nível de significância pelo teste t (***: < 0,001); n: número de pares de dados usados na análise de correlação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrado médio; nRMSE: raiz quadrada do erro quadrado médio normalizado. Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

É importante ressaltar que os valores de altura de plantas PH_{CSM-M} e PH_{CSM-V} foram subestimados em 0,15 m e 0,20 m, respectivamente, em relação aos valores de referência medidos em campo (PH_{REF-C}), com erros-padrão de estimativa (SEE) iguais a 0,10 m (PH_{CSM-M}) e 0,115 m (PH_{CSM-V}) (Figura 7). Bendig et al. (2014), ao avaliarem a extração da altura de plantas de cevada por meio dos CSMs, observaram que os valores de altura de plantas de cevada extraídos dos CSMs foram subestimados em 0,10 m, com R^2 igual a 0,92 e SEE de 0,25 m. Os autores atribuíram esse comportamento ao fato de a altura das plantas extraída dos CSMs representar a média dos valores de todos os pixels da parcela, incluindo as partes mais elevadas (espigas) e as mais baixas (folhas inferiores).

Em relação à cultura do milho, Li et al. (2016) avaliaram diferentes modelos para estimativa de altura das plantas (regressão linear simples – SLR, regressão linear *stepwise* – SWL e *Random Forest* – RF), a partir de imagens aéreas RGB obtidas por drone, em comparação às medidas efetuadas em campo (referência). Os autores obtiveram boa correlação entre os valores de altura de plantas estimados pelos modelos com a altura de plantas medida em campo, com valores de R^2 iguais a 0,74 ($p < 0,01$) (SLR), 0,88 ($p < 0,01$) (SWL) e 0,72 ($p < 0,01$) (RF). Os valores de RMSE e de nRMSE foram iguais a 0,21 m e 8,4% (SLR); 0,16 m e 6,4% (SWL) e 0,26 m e 10,4% (RF). Os valores de R^2 , de RMSE e de nRMSE obtidos no presente estudo foram superiores aos obtidos por Li et al. (2016), indicando que a metodologia empregada no presente estudo se mostrou mais assertiva na estimativa da altura das plantas de milho em comparação aos métodos recomendados por Li et al. (2016), notadamente em relação aos métodos SLR e RF.

Tumlisan (2017) concluiu que os CSMs obtidos por meio de imagens aéreas RGB de drones podem estimar com precisão a altura das plantas de milho em diferentes estádios de desenvolvimento. Observou que durante o estágio de pendoamento o R^2 encontrado foi 0,68, enquanto no estágio de maturação dos grãos foi de 0,85. Recomenda que, a fim de aumentar a precisão da estimativa da altura da planta, é necessário ter pontos de controle na área bem distribuídos e uma coleta de imagens criteriosa em campo.

Análise de variância e correlação

A análise de variância indicou que PH_{REF-C} , PH_{CSM-M} e PH_{CSM-V} foram responsivas apenas aos regimes hídricos aplicados (RH-ETc) ($p < 0,001$), enquanto a variável BIO_{REF-C} foi aos fatores RH-ETc ($p < 0,01$) e às cultivares avaliadas ($p < 0,05$) (Tabela 2). Os coeficientes de variação (CV) para PH_{REF-C} , PH_{CSM-M} e PH_{CSM-V} oscilaram de 10,1% a 13,7%, enquanto para BIO_{REF-C} a oscilação foi de 28,8% em relação ao RH-ETc e 27,5% à cultivar. Han et al. (2019) encontraram valores de CV de 14,4% a 17,4% para altura de plantas e de 29,1% a 39,7% para biomassa seca de milho. Tumlisan (2017) obteve valores de CV da ordem de 22,2% para biomassa seca de plantas, superiores aos alcançados para altura de plantas (18,8%). Enfatizou que a maior variabilidade dos dados de biomassa seca deveu-se ao fato de que plantas com a mesma altura podem ter biomassas distintas por outros fatores, tais como, o diâmetro do colmo e/ou o número de folhas. No presente estudo, a maior variabilidade na biomassa seca pode ter ocorrido em função da metodologia utilizada para sua determinação, já que foi necessário efetuar a transformação da biomassa seca por planta ($g \text{ planta}^{-1}$) para biomassa seca por área ($kg \text{ m}^{-2}$). Para tanto, usou-se o estande final de plantas, que se mostrou desuniforme, notadamente nas subparcelas com o tratamento de baixa disponibilidade de água no solo (RH = 0,6 ETc).

Considerando todo o conjunto de dados ($n = 48$), a correlação entre PH_{REF-C} , PH_{CSM-M} , PH_{CSM-V} e BIO_{REF-C} foi elevada, com valores de R^2 que variaram de 0,7934% ($p < 0,001$) a 0,9728% ($p < 0,001$). Importante ressaltar que a correlação de PH_{REF-C} com PH_{CSM} foi praticamente igual entre os conjuntos de dados usados na geração dos modelos (0,9433) e na validação dos modelos (0,9172) (Tabela 3). Quanto à biomassa seca (BIO_{REF-C}), a correlação com a altura das plantas foi superior para os dados de altura medidos em campo (PH_{REF-C}) (0,8741) em comparação aos valores de altura de plantas extraídos dos CSMs, os quais foram iguais a 0,8409 (PH_{CSM-M}) e 0,7934 (PH_{CSM-V}) (Tabela 3).

Tabela 2. Quadrado médio da análise de variância para altura de plantas medida em campo (PH_{REF-C}), altura de plantas extraída dos modelos digitais de superfície (CSM) usados na etapa de geração dos modelos de biomassa seca (PH_{CSM-M}), altura de plantas extraída dos modelos digitais de superfície (CSM) usados na etapa de validação dos modelos de biomassa seca (PH_{CSM-V}) e biomassa seca da parte aérea das plantas medida em campo (BIO_{REF-C}), em resposta aos fatores regimes hídricos (RH-ETc), cultivares e interação. Teresina, PI, 2019.

FV	GL	PH_{REF-C}	PH_{CSM-M}	PH_{CSM-V}	BIO_{REF-C}
RH-ETc	3	0,912 ***	0,6363 ***	0,5561 ***	0,81560 **
Bloco	3	0,086	0,0170	0,0367	0,17626
Erro a	9	0,032	0,0319	0,0383	0,08338
Cultivar	2	0,068	0,0335	0,0231	0,26703 *
RH-ETc *Cultivar	6	0,053	0,0839	0,0627	0,16781
Erro b	24	0,055	0,0547	0,0528	0,07599
CV1 (%)		10,1	10,3	11,4	28,8
CV2 (%)		13,2	13,5	13,7	27,5

RH-ETc: regimes hídricos aplicados com base na ETc; ETc: evapotranspiração da cultura; FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; PH_{REF-C} : altura de planta medida em campo (referência); PH_{CSM-M} : altura de planta extraída dos modelos digitais de superfície (CSM) – conjunto de dados para geração dos modelos de regressão (M); PH_{CSM-V} : altura de planta extraída dos modelos digitais de superfície (CSM) – conjunto de dados para validação dos modelos de regressão (V); BIO_{REF-C} : biomassa seca da parte aérea das plantas medida em campo (referência); CV1: coeficiente de variação relativo ao fator RH-ETc (%); CV2: coeficiente de variação relativo ao fator cultivar (%).

Níveis de significância (teste F): *** = < 1%, ** = 1%, * = 5%.

Li et al. (2016), ao avaliarem diferentes modelos para estimativa de altura das plantas a partir de imagens aéreas RGB, obtiveram boa correlação entre os valores de altura de plantas estimados pelos modelos com a altura de plantas medida em campo, com valores de R^2 que variaram de 0,72 ($p < 0,01$) a 0,88 ($p < 0,01$), muito próximos aos obtidos no presente estudo. Tumlisian (2017) também encontrou boa correlação entre as alturas de plantas medidas em campo com as alturas estimadas com base em modelos digitais de superfície, com R^2 igual a 0,84 ($p < 0,001$). Quanto à biomassa seca, observou que a correlação foi igual a 0,68 ($p < 0,001$) com PH_{CSM} e de 0,70 ($p < 0,001$) com PH_{REF} . Os valores de correlação observados no presente estudo foram superiores aos obtidos por Li et al. (2016) e Tumlisian (2017). As diferenças nos valores dos coeficientes de correlação entre os estudos devem-se, provavelmente, às metodologias distintas para estimativa de PH com base nos modelos digitais de superfície.

Tabela 3. Análise de correlação de Pearson entre altura de plantas medida em campo (PH_{REF-C}), altura de plantas extraída dos modelos digitais de superfície (CSM) usados na etapa de geração dos modelos de biomassa seca (PH_{CSM-M}), altura de plantas extraídas dos modelos digitais de superfície (CSM) usados na etapa de validação dos modelos de biomassa seca (PH_{CSM-V}) e biomassa seca da parte aérea das plantas medida em campo (BIO_{REF-C}).

	PH_{CSM-M}	PH_{CSM-V}	PH_{REF-C}	BIO_{REF-C}
PH_{CSM-M}	1,0000			
PH_{CSM-V}	0,9728 ***	1,0000		
PH_{REF-C}	0,9433 ***	0,9172	1,0000	
BIO_{REF-C}	0,8409 ***	0,7934	0,8741	1,0000

PH_{REF-C} : altura de planta medida em campo (referência); PH_{CSM-M} : altura de planta extraída dos modelos digitais de superfície (CSM) – conjunto de dados para geração dos modelos de regressão (M); PH_{CSM-V} : altura de planta extraída dos modelos digitais de superfície (CSM) – conjunto de dados para validação dos modelos de regressão (V); BIO_{REF-C} : biomassa seca da parte aérea das plantas medida em campo (referência).

Níveis de significância (teste t): *** = < 1%.

Os maiores valores de altura de plantas foram obtidos com a aplicação do regime hídrico equivalente à aplicação de 1,2 ETc (2,011±0,188 m), enquanto os menores foram alcançados com a aplicação do menor regime hídrico, 0,6 ETc (1,483±0,167 m). Valores medianos foram proporcionados pela aplicação dos regimes hídricos intermediários (1,614±0,305 m para RH-ETc = 0,8 e 1,804±0,214 m para RH-ETc = 1,0) (Figura 8A). Para um mesmo RH-ETc, as alturas de plantas extraídas dos CSMs (PH_{CSM}-M e PH_{CSM}-V) não variaram significativamente das alturas de plantas medidas em campo (PH_{REF}-C) (Figura 8A), indicando que a metodologia empregada para a extração dos valores de altura de plantas com base nos CSMs foi adequada e representou bem a altura das plantas medidas em campo.

A altura de planta é uma característica agrônômica importante diretamente relacionada à disponibilidade de água no solo (Brito et al., 2013; Simões et al., 2017). Segundo Santos et al. (2018), o crescimento em altura nas plantas do tipo C4 é limitado pela disponibilidade de água, bem como pela ocorrência da fase fisiológica reprodutiva, iniciada no florescimento. Carvalho (2020) constatou que o déficit hídrico associado às densidades mais elevadas proporcionou redução da altura das plantas de milho, quando comparado com o ensaio sem déficit hídrico. Para o híbrido AG-1051, a altura de plantas foi igual a 2,20 m (irrigação plena) e 1,91 m (irrigação deficitária). Em trabalhos realizados por Melo et al. (2018) e Almeida (2016), que avaliaram o desempenho da cultura do milho com déficit e excesso hídrico, os maiores valores em altura de plantas foram encontrados nos tratamentos com excedente hídrico. Por outro lado, os menores valores foram observados em plantas com déficit.

Os regimes hídricos proporcionaram variação na disponibilidade de água no solo para as plantas. A disponibilidade de água no solo obedeceu à ordem de aplicação dos regimes hídricos, ou seja, onde houve maior aplicação de água, a disponibilidade de água para as plantas foi maior. Essa variabilidade foi maior nas camadas de 0,1 m e 0,2 m (Figura 9). Em relação à profundidade total avaliada (0,0 m - 0,4 m), os valores médios de umidade do solo oscilaram de 7,53% (RH = 0,6 ETc) a 14,5% (RH = 1,2 ETc) (Figura

9A), resultando em uma variação média na disponibilidade de água no solo de 44,3% (RH = 0,6 ETc) a 85,2% (RH = 1,2 ETc) (Figura 9B). Logicamente, a disponibilidade de água diferenciada no solo foi responsável pela variação em crescimento das plantas, conforme já discutido.

Quanto à biomassa seca da parte aérea, os maiores valores foram obtidos com a aplicação do regime hídrico equivalente a 1,2 ETc ($1,319 \pm 0,465$ kg m⁻²), enquanto os menores foram alcançados com a aplicação do menor regime hídrico, 0,6 ETc ($0,724 \pm 0,206$ kg m⁻²). A aplicação dos regimes hídricos 0,8 ETc e 1,0 ETc proporcionou valores de biomassa seca de $0,870 \pm 0,306$ kg m⁻² e $1,096 \pm 0,265$ kg m⁻², respectivamente (Figura 8B). A cultivar Status Vip-3 Syngenta foi a que produziu maior quantidade de biomassa seca ($1,113 \pm 0,484$ kg m⁻²), enquanto a cultivar BRS-3046 foi a que produziu menos ($0,860 \pm 0,257$ kg m⁻²). A produção de biomassa seca da cultivar BRS-2022 ($1,033 \pm 0,276$ kg m⁻²) não diferiu estatisticamente ($p < 0,05$) das demais cultivares (Figura 8C).

Carvalho (2020) observou que a biomassa seca de plantas de milho, híbrido AG-1051, apresentou redução linear decrescente com o aumento da densidade de plantas com aplicação de irrigações plena e deficitária. Considerando-se a densidade de 10 plantas m⁻², a produção de biomassa com irrigação plena foi de 1,60 kg m⁻², enquanto com irrigação deficitária foi de apenas 1,180 kg m⁻². O autor atribuiu o decréscimo em biomassa seca das plantas à redução do diâmetro do colmo e da área foliar individual das plantas. No presente estudo, a redução em biomassa ocorreu devido à disponibilidade de água no solo diferenciada em função dos regimes hídricos aplicados (Ion et al., 2014) (Figura 9). Tumlisian (2017) obteve valores de biomassa seca de milho medidos no estágio de maturação dos grãos de 2,987 kg m⁻² (máximo), 2,042 kg m⁻² (médio), 0,586 kg m⁻² (mínimo) e 0,454 kg m⁻² (desvio padrão). As diferenças em biomassa em relação ao presente estudo provavelmente deveram-se às diferentes condições de clima, de solo, de cultivar e de estágio de desenvolvimento da cultura em que foi quantificada a biomassa seca das plantas.

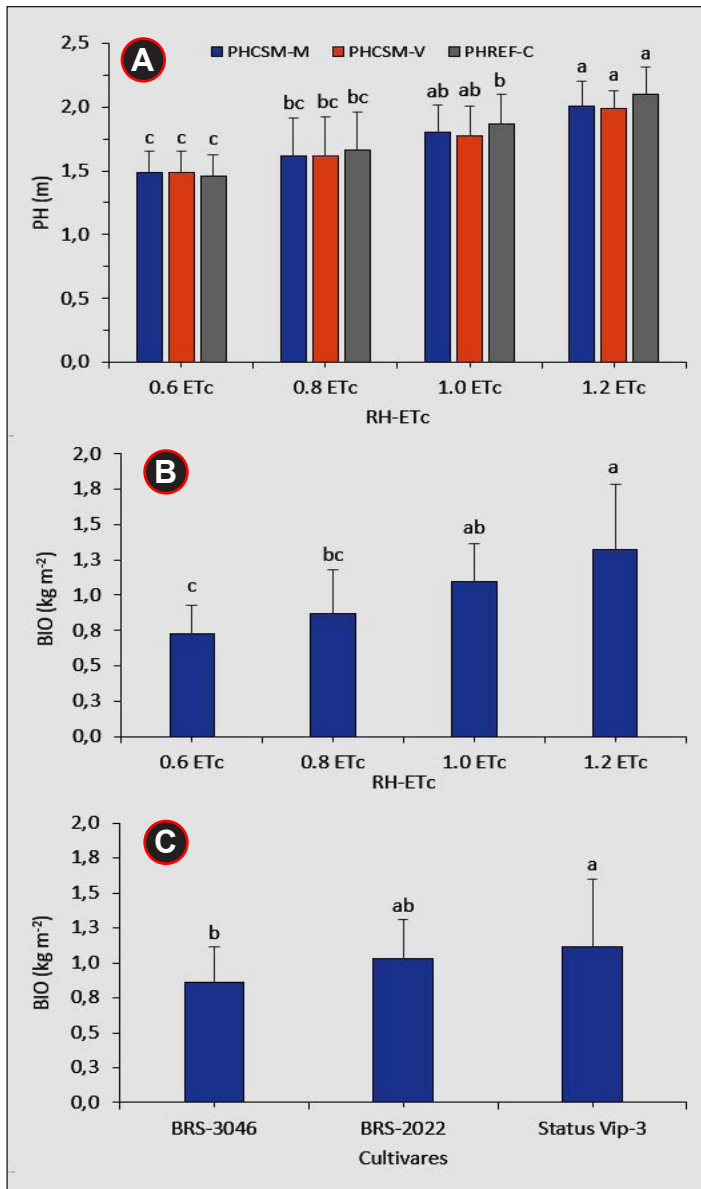


Figura 8. Altura (PH) e biomassa seca (BIO) de plantas de milho em resposta aos fatores regimes hídricos (RH-ETc) e cultivares. Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

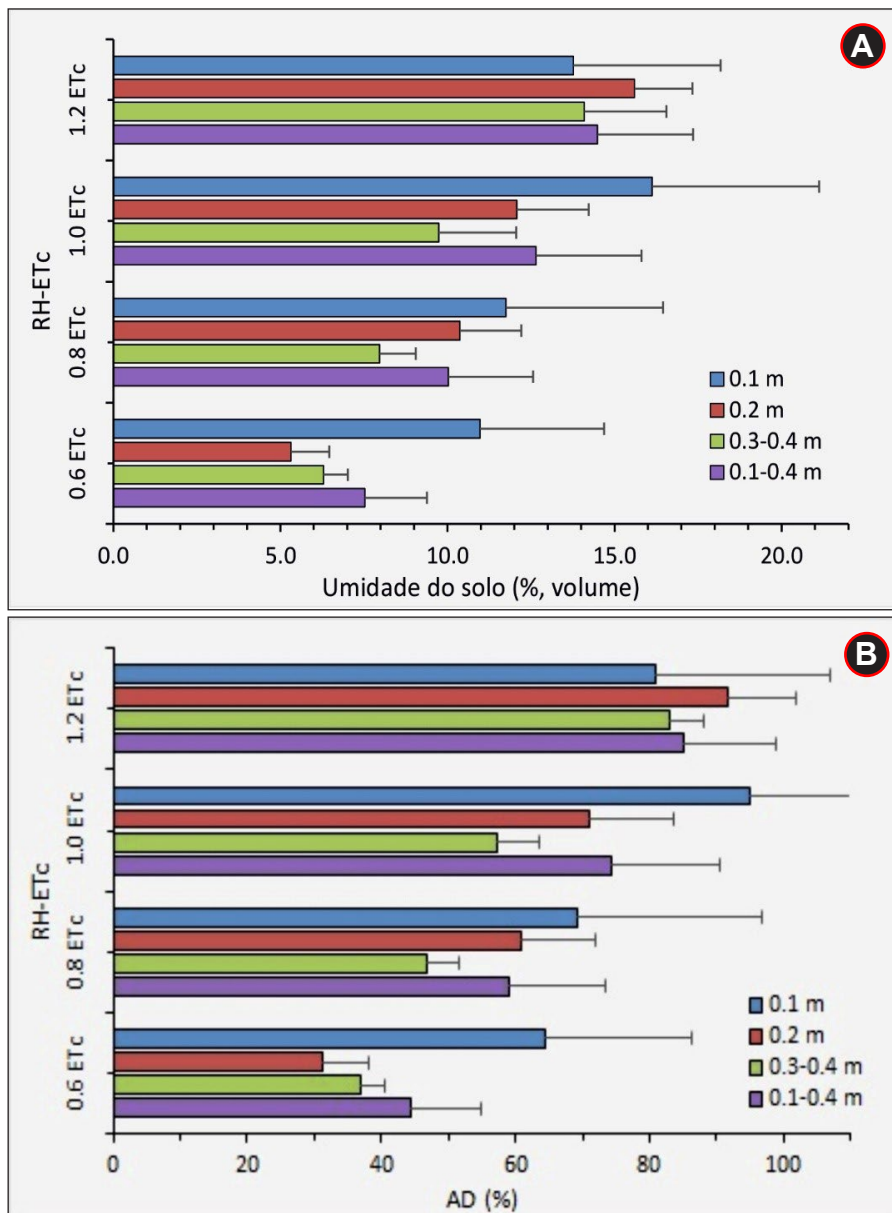


Figura 9. Umidade (% volume) e água disponível (AD, %) no solo, nas profundidades de 0,1 m, 0,2 m, 0,3 - 0,4 m e 0 - 0,4 m, em resposta aos regimes hídricos (RH-ETc) aplicados no ensaio. Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI.

Modelos para estimativa de biomassa seca

As equações de regressão para estimativa da biomassa seca das plantas de milho em função da altura de plantas extraída dos CSMs são apresentadas na Tabela 4 e nas Figuras 10 e 11. É importante destacar que as equações de regressão foram geradas para todo o conjunto de dados ($n = 48$), bem como para os fatores RH ($n = 12$) e cultivar ($n = 16$) separadamente. A biomassa seca de plantas de milho em função da altura de plantas extraída dos CSMs ajustou-se a modelos de regressão exponencial, com coeficientes de determinação (R^2) que variaram de 0,4782 (RH-ETc = 0,6) a 0,8639 (RH-ETc = 0,8) e erro-padrão de estimativa dos modelos (SEE) de 0,13 kg m⁻² (cultivar BRS-3046) a 0,3041 kg m⁻² (RH-ETc = 1,2).

Modelos de regressão exponenciais para estimativa de biomassa seca em função da altura de plantas extraída de CSMs também foram obtidos por Tumlisan (2017) com a cultura do milho, por Bendig et al. (2014) com a cevada, e por Acorsi et al. (2019) com a aveia-preta. Acorsi et al. (2019) obtiveram valores de R^2 que variaram de 0,69 a 0,94 e erro absoluto médio de 0,022 kg m⁻² a 0,058 kg m⁻², com melhores ajustes na fase de florescimento. Por sua vez, Bendig et al. (2014) encontraram, com a cultura da cevada, valores de R^2 que oscilaram de 0,39 a 0,68 e SEE de 0,61 kg m⁻² a 0,98 kg m⁻². Portanto os valores de R^2 e de SEE obtidos no presente estudo podem ser considerados muito bons em comparação aos referidos estudos, indicando elevado potencial de aplicação dos modelos de regressão gerados para estimativa da biomassa seca do milho com base na altura das plantas.

Com o milho, os modelos de regressão exponenciais para estimativa da biomassa seca com base na altura das plantas extraída de CSMs obtidos por Tumlisan (2017) apresentaram melhor desempenho no estágio de maturação, com $R^2 = 0,69$, RMSE = 0,3 kg m⁻² e nRMSE = 12,4% ($p < 0,001$). Porém os modelos para estimativa da biomassa seca durante os estádios de floração e de pendoamento foram fracos ($R^2 = 0,282$ e 0,362) em comparação aos outros estádios, provavelmente devido à baixa precisão do CSM em estimar a altura das plantas nesses períodos ($R^2 \approx 0,4$), o que não ocorreu no presente estudo.

Tabela 4. Equações de regressão exponencial para estimativa de biomassa seca de plantas de milho (BIO_{CSM-M}) em função da altura de plantas extraída dos CSMs (PH_{CSM-M}) e respectivos coeficientes de determinação (R^2) e erros-padrão de estimativa (SEE).

RH-ETc	Equação de regressão	n	R^2	SEE (kg m ⁻²)
0,6 ETc	$BIO_{CSM-M} = 0,1195 \text{ EXP}(1,2017^{ns} PH_{CSM-M})$	12	0,4782*	0,1574
0,8 ETc	$BIO_{CSM-M} = 0,1280 \text{ EXP}(1,1529^{***} PH_{CSM-M})$	12	0,8639***	0,1375
1,0 ETc	$BIO_{CSM-M} = 0,1802 \text{ EXP}(0,9896^* PH_{CSM-M})$	12	0,6915***	0,1559
1,2 ETc	$BIO_{CSM-M} = 0,0701 \text{ EXP}(1,4414^{***} PH_{CSM-M})$	12	0,6349***	0,3041
Cultivar	Equação de regressão	n	R^2	SEE (kg m ⁻²)
BRS 3046	$BIO_{CSM-M} = 0,1053 \text{ EXP}(1,2271^{***} PH_{CSM-M})$	16	0,7871***	0,1300
BRS 2022	$BIO_{CSM-M} = 0,1541 \text{ EXP}(1,0640^{***} PH_{CSM-M})$	16	0,8207***	0,1581
Status Vip 3	$BIO_{CSM-M} = 0,1398 \text{ EXP}(1,1366^{***} PH_{CSM-M})$	16	0,7560***	0,2638
Tudo	$BIO_{CSM-M} = 0,1213 \text{ EXP}(1,1867^{***} PH_{CSM-M})$	48	0,7904***	0,1913

RH-ETc: regimes hídricos aplicados com base na ETc; ETc: evapotranspiração da cultura; BIO_{CSM-M} : biomassa seca das plantas estimada pelos modelos de regressão exponencial (kg m⁻²); PH_{CSM-M} : altura de planta extraída dos modelos digitais de superfície (CSM) – conjunto de dados para geração dos modelos de regressão (M); n: número de pares de dados utilizados na geração dos modelos de regressão; R^2 : coeficiente de determinação; SEE: erro padrão de estimativa dos modelos de regressão (kg m⁻²).

Níveis de significância (teste t): *** = < 0,1%; * = 5%; ns = não significativo.

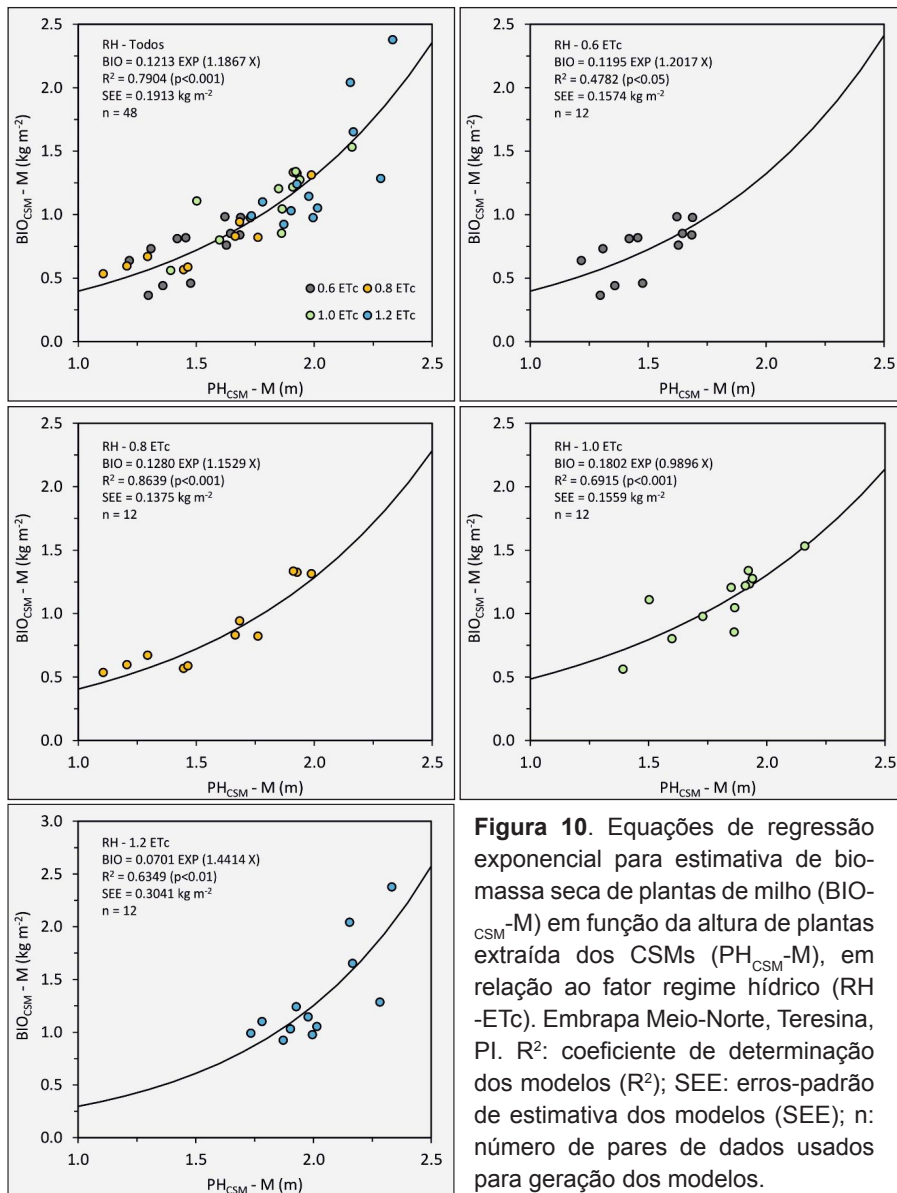


Figura 10. Equações de regressão exponencial para estimativa de biomassa seca de plantas de milho (BIO_{CSM}-M) em função da altura de plantas extraída dos CSMs (PH_{CSM}-M), em relação ao fator regime hídrico (RH-ETc). Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI. R²: coeficiente de determinação dos modelos (R²); SEE: erros-padrão de estimativa dos modelos (SEE); n: número de pares de dados usados para geração dos modelos.

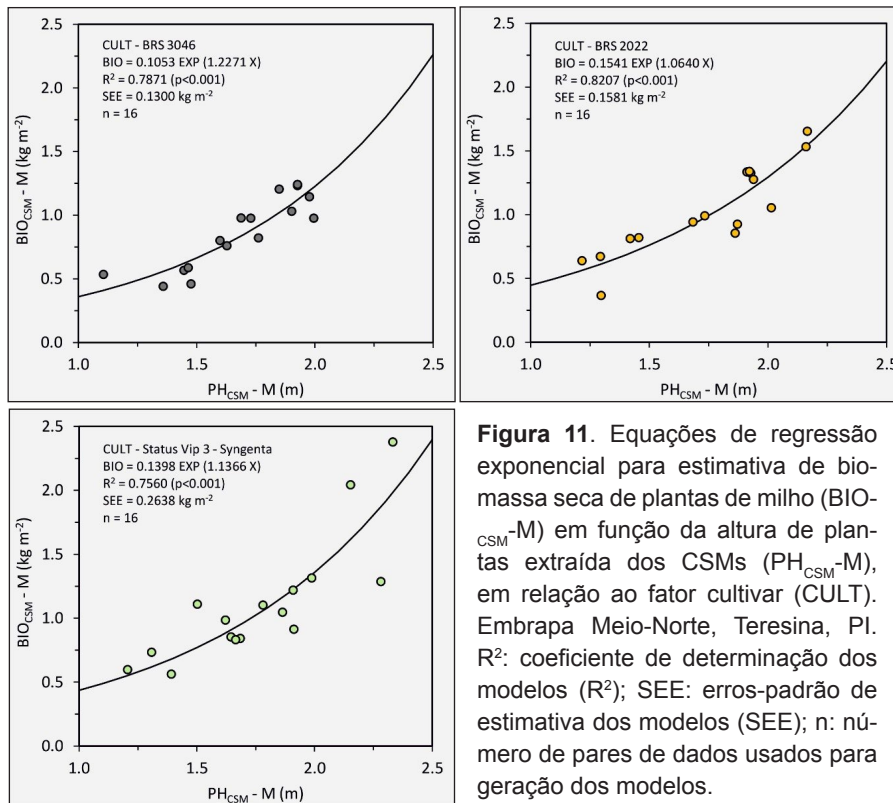


Figura 11. Equações de regressão exponencial para estimativa de biomassa seca de plantas de milho ($BIO_{CSM}-M$) em função da altura de plantas extraída dos CSMs ($PH_{CSM}-M$), em relação ao fator cultivar (CULT). Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI. R^2 : coeficiente de determinação dos modelos (R^2); SEE: erros-padrão de estimativa dos modelos (SEE); n: número de pares de dados usados para geração dos modelos.

Quanto aos regimes hídricos, os modelos de regressão exponenciais gerados para $RH-ETc = 0,8$ foram os que apresentaram melhor desempenho, com $R^2 = 0,8639$ ($p < 0,001$) e $SEE = 0,1373 \text{ kg m}^{-2}$, enquanto o pior desempenho foi observado com o modelo de regressão obtido para o $RH-ETc = 0,6$, com $R^2 = 0,4782$ ($p < 0,001$) e $SEE = 0,1574 \text{ kg m}^{-2}$ (Figura 10). Quanto ao fator cultivar, o modelo que apresentou melhor desempenho foi o gerado com a cultivar BRS-2022, com $R^2 = 0,8207$ ($p < 0,001$) e $SEE = 0,1581 \text{ kg m}^{-2}$, enquanto o pior foi obtido com a cultivar Status Vip-3 Syngenta, com $R^2 = 0,756$ ($p < 0,001$) e $SEE = 0,2638 \text{ kg m}^{-2}$ (Figura 11). O desempenho dos modelos gerados no presente estudo, notadamente quanto ao fator cultivar, pode ser considerado excelente, já que os modelos apresentaram $R^2 \geq 0,7$, mesmo para os casos em que houve os piores ajustes.

Segundo Tumlisan (2017), a altura da planta foi o parâmetro mais importante para a estimativa das biomassas fresca e seca de plantas de milho. Geralmente, a capacidade de previsão da altura das plantas extraída de CSMs para estimativa das biomassas fresca e seca aumenta com o desenvolvimento da cultura. Essa tendência também foi observada no presente estudo, já que os modelos para estimativa da biomassa seca gerados para os RH que proporcionaram maior disponibilidade de água no solo (RH-ETc = 0,8; RH-ETc = 1,0 e RH-ETc = 1,2), com as maiores médias de $PH_{CSM}-M$ iguais a $1,614 \pm 0,305$ m, $1,804 \pm 0,177$ m e $2,011 \pm 0,159$ m, respectivamente (Tabela 1), apresentaram melhor desempenho na estimativa da biomassa em relação ao RH-ETc = 0,6 (com menor disponibilidade de água no solo), onde se observou a menor média de $PH_{CSM}-M$ ($1,483 \pm 0,144$ m) (Tabela 1).

Validação dos modelos para estimativa da biomassa seca

As equações de regressão linear referentes à validação dos modelos para estimativa da biomassa seca das plantas de milho ($BIO_{CSM}-V$) em contraposição aos valores de biomassa medidos em campo ($BIO_{REF}-C$) e respectivos coeficientes de determinação (R^2), raiz quadrada do erro quadrado médio (RMSE) e raiz quadrada do erro quadrado médio normalizado (nRMSE) são apresentadas na Tabela 5 e nas Figuras 12 e 13. Destaca-se que se realizou a validação das equações de regressão para todo o conjunto de dados ($n=48$), bem como para os fatores RH ($n = 12$) e cultivar ($n = 16$) separadamente. Os valores de biomassa seca estimados pelos modelos de regressão exponenciais, obtidos a partir da altura de plantas extraída dos CSMs ($BIO_{CSM}-V$), foram muito próximos aos valores de biomassa seca medidos em campo ($BIO_{REF}-C$), com valores de R^2 que variaram de 0,6898 a 0,9243, RMSE de $0,091 \text{ kg m}^{-2}$ a $0,163 \text{ kg m}^{-2}$ e nRMSE de 12,1% a 18,7% (Tabela 5).

Tabela 5. Equações de regressão linear referentes à validação dos modelos de estimativa de biomassa seca de plantas de milho (BIO_{CSM-V}) em contraposição aos valores de biomassa medidos em campo (BIO_{REF-C}), com respectivos coeficientes de determinação (R^2), raiz quadrada do erro quadrado médio (RMSE) e raiz quadrada do erro quadrado médio normalizado (nRMSE).

RH-ETc	Equação de regressão	n	R^2	RMSE (kg m ⁻²)	nRMSE (%)
0,6 ETc	$BIO_{CSM-V} = 0,1875 + 0,7404^{***} BIO_{REF-C}$	12	0,7877 ^{***}	0,091	12,6
0,8 ETc	$BIO_{CSM-V} = 0,1641 + 0,8175^{***} BIO_{REF-C}$	12	0,7016 ^{***}	0,163	18,7
1,0 ETc	$BIO_{CSM-V} = -0,0036 + 0,9237^{***} BIO_{REF-C}$	12	0,7606 ^{***}	0,133	12,1
1,2 ETc	$BIO_{CSM-V} = 0,3904 + 0,7337^{***} BIO_{REF-C}$	12	0,8631 ^{***}	0,163	12,4
Cultivar	Equação de regressão	n	R^2	RMSE (kg m ⁻²)	nRMSE (%)
BRS-3046	$BIO_{CSM-V} = 0,1766 + 0,8557^{***} BIO_{REF-C}$	16	0,6898 ^{***}	0,194	24,9
BRS-2022	$BIO_{CSM-V} = 0,0909 + 0,8740^{***} BIO_{REF-C}$	16	0,8218 ^{***}	0,173	17,4
Status Vip 3	$BIO_{CSM-V} = 0,0487 + 0,9113^{***} BIO_{REF-C}$	16	0,9243 ^{***}	0,160	17,5
Tudo	$BIO_{CSM-V} = 0,1210 + 0,8670^{***} BIO_{REF-C}$	48	0,8434 ^{***}	0,153	15,3

RH-ETc: regimes hídricos aplicados com base na ETc; ETc: evapotranspiração da cultura; BIO_{CSM-V} : biomassa seca das plantas estimada pelos modelos de regressão, usando-se os dados de altura de plantas para validação (PH_{CSM-V}) (kg m⁻²); BIO_{REF-C} : biomassa seca das plantas medida em campo (kg m⁻²); n: número de pares de dados utilizados na validação; R^2 : coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro quadrado médio (kg m⁻²); nRMSE: raiz quadrada do erro quadrado médio normalizado com base na média dos dados medidos em campo (%).

Níveis de significância do modelo de regressão e dos coeficientes das equações (teste t) = ***: < 0,1%; ** = 1%; * = 5%.

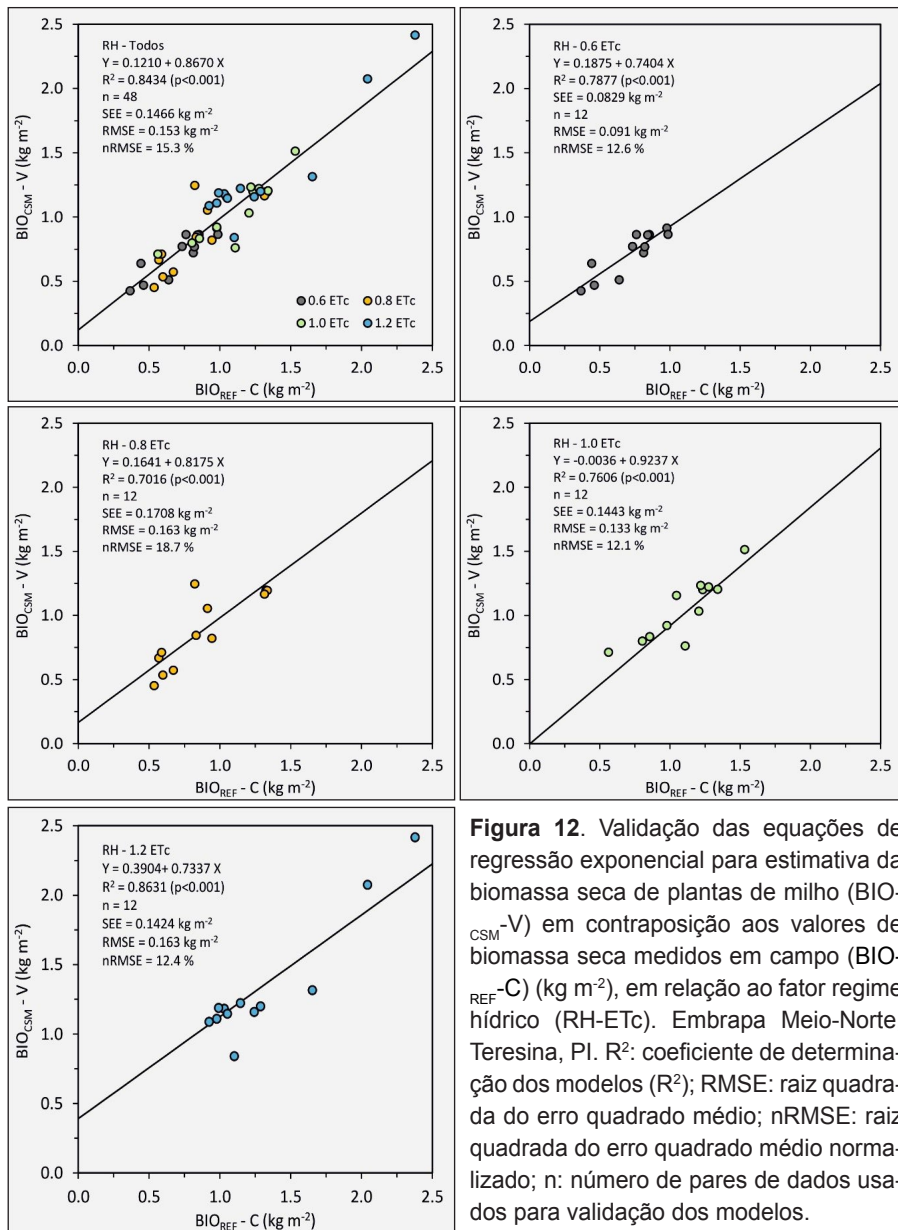


Figura 12. Validação das equações de regressão exponencial para estimativa da biomassa seca de plantas de milho ($BIO_{CSM} - V$) em contraposição aos valores de biomassa seca medidos em campo ($BIO_{REF} - C$) ($kg\ m^{-2}$), em relação ao fator regime hídrico (RH-ETc). Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI. R^2 : coeficiente de determinação dos modelos (R^2); RMSE: raiz quadrada do erro quadrado médio; nRMSE: raiz quadrada do erro quadrado médio normalizado; n: número de pares de dados usados para validação dos modelos.

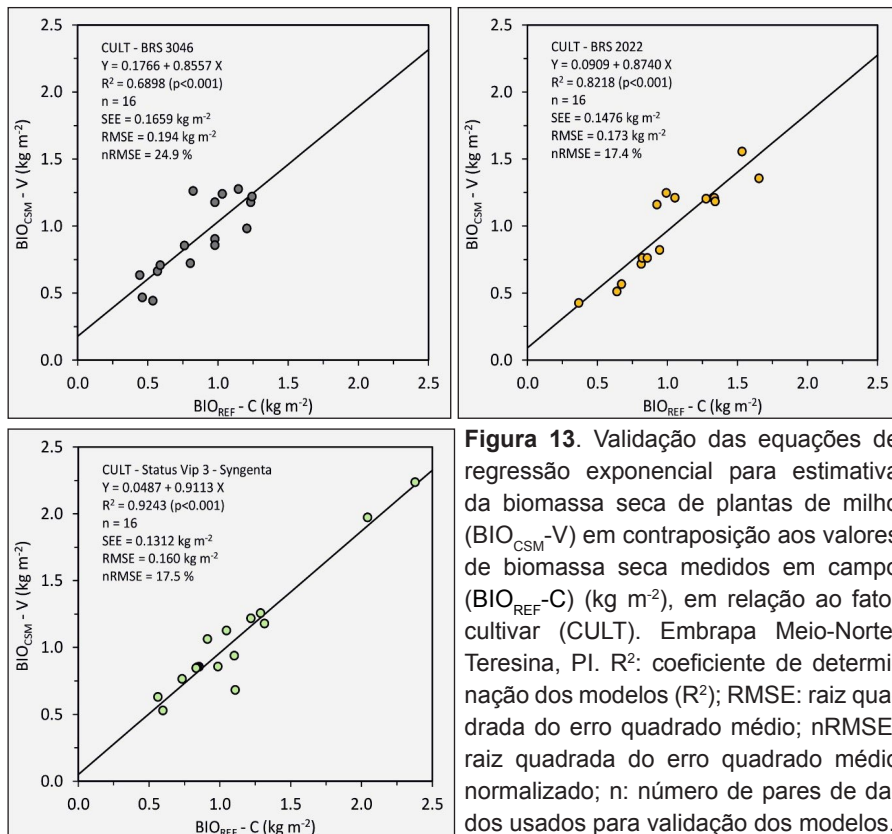


Figura 13. Validação das equações de regressão exponencial para estimativa da biomassa seca de plantas de milho ($BIO_{CSM} - V$) em contraposição aos valores de biomassa seca medidos em campo ($BIO_{REF} - C$) (kg m^{-2}), em relação ao fator cultivar (CULT). Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI. R^2 : coeficiente de determinação dos modelos (R^2); RMSE: raiz quadrada do erro quadrado médio; nRMSE: raiz quadrada do erro quadrado médio normalizado; n: número de pares de dados usados para validação dos modelos.

Em estudos conduzidos por Tumlasan (2017) com milho, Bendig et al. (2014) com cevada e Acorsi et al. (2019) com aveia-preta, também foram observados bons ajustes de valores de biomassa seca estimados por modelos exponenciais com base na altura de plantas extraída de modelos CSMs em contraposição a valores de biomassa medidos em campo. Com aveia-preta, Acorsi et al. (2019) obtiveram $R^2 = 0,84$, $RMSE = 0,063 \text{ kg m}^{-2}$ e $nRMSE = 20,3\%$. Com cevada, Bendig et al. (2014) encontraram valores de R^2 que oscilaram de 0,49 a 0,68 e $RMSE$ de $0,42 \text{ kg m}^{-2}$ a $0,83 \text{ kg m}^{-2}$, ao avaliarem diferentes conjuntos de dados para estimativa e validação dos modelos de regressão. Com milho, Tumlasan (2017) encontrou valores de R^2

que oscilaram de 0,4581 a 0,7642, RMSE de 0,2271 kg m⁻² a 0,3105 kg m⁻² e nRMSE de 10,8% a 14,76%. Comparativamente a esses estudos, os valores de R², de RMSE e de nRMSE obtidos no presente estudo foram superiores, evidenciando que os modelos de regressão exponenciais gerados são promissores para estimativa da biomassa seca do milho com base na altura das plantas extraída de CSMs.

Quanto aos regimes hídricos, os modelos de regressão exponenciais gerados para RH-ETc = 1,2 foram os que apresentaram melhor ajuste em relação aos valores de biomassa seca medidos em campo, com R² = 0,8631 (p<0,001), RMSE = 0,163 kg m⁻² e nRMSE = 12,4%; porém, sem diferenciar muito do ajuste obtido com todo o conjunto de dados: R² = 0,8434 (p<0,001), RMSE = 0,153 kg m⁻² e nRMSE = 15,3%. O pior ajuste foi observado com o modelo de regressão obtido para o RH-ETc = 0,8, com R² = 0,7016 (p<0,001), RMSE = 0,163 kg m⁻² e nRMSE = 18,7% (Figura 12). Quanto ao fator cultivar, o modelo que apresentou melhor ajuste em relação aos valores de biomassa seca medidos em campo, foi o obtido com a cultivar Status Vip-3 Syngenta, com R² = 0,9243 (p<0,001), RMSE = 0,160 kg m⁻² e nRMSE = 17,5%, enquanto o pior ajuste foi obtido com a cultivar BRS-3046, com R² = 0,6848 (p<0,001), RMSE = 0,194 kg m⁻² e nRMSE = 24,9% (Figura 13).

A etapa de validação demonstrou o bom desempenho e assertividade dos modelos de regressão exponencial para estimativa da biomassa seca de milho com base na altura de plantas extraída dos CSMs obtidos no presente estudo, independentemente do RH-ETc e da cultivar avaliados. Tumliyan (2017) também demonstrou o potencial de uso de imagens multitemporais de alta resolução para monitorar o desenvolvimento da cultura do milho durante toda a estação de cultivo para um planejamento e tomada de decisão eficientes.

Conclusões

A metodologia empregada para extração da altura das plantas de milho com base nos modelos digitais de superfície, gerados a partir de imagens aéreas obtidas por câmera RGB embarcada em drone, mostra-se eficiente e promissora.

Para os regimes hídricos e cultivares avaliados, os modelos de regressão exponenciais proporcionam estimativas precisas da biomassa seca das plantas de milho com base na altura das plantas extraída dos CSMs, no estágio de pendoamento.

Recomendações

Recomenda-se aperfeiçoar a metodologia proposta para extração dos valores de altura de plantas dos modelos digitais de superfície, utilizando-se a ferramenta de seleção aleatória de pontos fixa, porém direcionando-se a seleção dos pontos para a posição das fileiras de plantas. Esse procedimento visa reduzir a variabilidade dos valores de altura de plantas, já que os pixels situados entre as fileiras de plantas não serão utilizados nessa estimativa.

É indicado também que a altura das plantas seja medida em um número maior de plantas possível no campo. Sugere-se, no mínimo, um total de 10 plantas aleatoriamente selecionadas em cada parcela, medindo-se a altura com uma régua graduada, desde o nível do solo até as folhas finais e/ou inflorescência masculina da planta.

A biomassa seca das plantas deve ser quantificada por área e não por planta individual. Para tanto, sugere-se que as plantas sejam cortadas, ao nível do solo, em um metro de fileira para determinação da biomassa fresca total. Posteriormente, uma amostra equivalente a um terço das plantas deve ser pesada para obtenção da massa fresca e colocada em estufa de ventilação forçada a 65 °C até massa constante para determinação da biomassa seca da amostra. A determinação da biomassa seca por área é efetuada pela relação entre a biomassa fresca total e as biomassas fresca e seca da amostra, por meio de uma regra de três simples.

Por fim, sugere-se que a metodologia proposta seja aplicada e avaliada em outras fases de desenvolvimento da cultura do milho.

Referências

- ACORSI, M. G.; MIRANDA, F. D. A.; MARTELLO, M.; SMANIOTTO, D. A.; SARTOR, L. R. Estimating biomass of black oat using UAV-based RGB imaging. **Agronomy**, v. 9, n. 7, e344, 2019.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALMEIDA, B. M. **Déficit e excesso hídrico na cultura do milho (*Zea mays* L.) em ambiente protegido**. 2016. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BASTOS, E. A.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de. **Boletim agrometeorológico de 2018 para o município de Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2019. 37 p. (Embrapa Meio-Norte, Documentos, 266).
- BENDIG, J.; BOLTEN, A.; BARETH, G. UAV-based imaging for multi-temporal, very high-resolution crop surface models to monitor crop growth variability. **Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation**, v. 6, p. 551-562, 2013.
- BENDIG, J.; BOLTEN, A.; BENNERTZ, S.; BROSCHEIT, J.; EICHFUSS, S.; BARETH, G. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. **Remote Sensing**, v. 6, n. 11, p. 10395-10412, 2014.
- BRITO, M. E. B.; ARAÚJO FILHO, G. D. de; WANDERLEY, J. A. C.; MELO, A. S. de; COSTA, F. B. da; FERREIRA, M. G. P. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, p. 1244-1254, 2013.
- CALOU, V. B. C.; TEIXEIRA, A. S.; MOREIRA, L. C. J.; ROCHA NETO, O. C.; SILVA, J. A. Estimation of maize biomass using unmanned aerial vehicle. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 6, p. 744-752, 2019.
- CARDOSO, M. J.; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q.; GUIMARAES, L. J. M.; GUIMARAES, P. E. de O.; ROCHA, L. M. P. da. **Rendimento de grãos, componentes de rendimento e eficiência de uso da água de híbridos de milho em condições climáticas contrastantes**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2012. 23 p. (Embrapa Meio-Norte. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 103).
- CARVALHO, M. W. L. **Arranjo de plantas para a máxima produtividade técnica do milho AG-1051 irrigado com e sem deficiência hídrica**. 2020. 129 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Piauí, Teresina.
- FASSNACHT, F. E.; HARTIG, F.; LATIFI, H.; BERGER, C.; HERNÁNDEZ, J.; CORVALÁN, P.; KOCH, B. Importance of sample size, data type and prediction method for remote sensing-based estimations of aboveground forest biomass. **Remote Sensing of Environment**, v. 154, p. 102-114, Nov. 2014.

- FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes: an R package for ANOVA and experimental designs. **Applied Mathematics**, v. 5, n. 19, p. 2952-2958, 2014.
- GNYP, M. L.; BARETH, G.; LI, F.; LENZ-WIEDEMANN, V. I. S.; KOPPE, W.; MIAO, Y.; HENNIG, S. D.; JIA, L.; LAUDIEN, R.; CHEN, X.; ZHANG, F. Development and implementation of a multiscale biomass model using hyperspectral vegetation indices for winter wheat in the North China Plain. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 33, p. 232-242, Dec. 2014.
- GOYNE, P. J.; MEINKE, H.; MILROY, S. P.; HAMMER, G. L.; HARE, J. M. Development and use of a barley crop simulation model to evaluate production management strategies in north-eastern Australia. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 7, p. 997-1015, 1996.
- HAN, L.; YANG, G.; DAI, H.; XU, B.; YANG, H.; FENG, H.; LI, Z.; YANG, X. Modeling maize above-ground biomass based on machine learning approaches using UAV remote-sensing data. **Plant Methods**, v. 15, Article number 10, 2019. 19 p.
- HOFFMEISTER, D.; BOLTEN, A.; CURDT, C.; WALDHOFF, G.; BARETH, G. High-resolution crop surface models (CSM) and crop volume models (CVM) on field level by terrestrial laser scanning. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DIGITAL EARTH, 6th., 2009, Beijing. **Models, algorithms, and virtual reality: proceedings**. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2010. p. 78400E.
- HOFFMEISTER, D.; WALDHOFF, G.; CURDT, C.; TILLY, N.; BENDIG, J.; BARETH, G. Spatial variability detection of crop height in a single field by terrestrial laser scanning. In: STAFFORD, J. V. (ed.). **Precision agriculture'13**. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2013. p. 267-274.
- ION, V.; BĂȘA, A. G.; TEMOCICO, G.; DICU, G.; EPURE, L. I.; STATE, D. Maize plant biomass at different hybrids, plant populations, row spacing and soil conditions. **Romanian Biotechnological Letters**, v. 19, n. 4, p. 9543-9551, 2014.
- JENSEN, A.; LORENZEN, B.; ØSTERGAARD, H. S.; HVELPLUND, E. K. Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of barley grown at different nitrogen levels. **Remote Sensing**, v. 11, n. 10, p. 1809-1820, 1990.
- KOPPE, W.; GNYP, M. L.; HENNIG, S. D.; LI, F.; MIAO, Y.; CHEN, X.; JIA, L.; BARETH, G. Multi-temporal hyperspectral and radar remote sensing for estimating winter wheat biomass in the North China Plain. **Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation**, v. 3, p. 281-298, Jun. 2012.
- LI, F.; MIAO, Y.; FENG, G.; YUAN, F.; YUE, S.; GAO, X.; LIU, Y.; LIU, B.; USTIN, S. L.; CHEN, X. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. **Field Crops Research**, v. 157, p. 111-123, Feb. 2014.
- LI, F.; MIAO, Y.; HENNIG, S. D.; GNYP, M. L.; CHEN, X.; JIA, L.; BARETH, G. Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 4, p. 335-357, 2010.

- LI, W.; NIU, Z.; CHEN, H.; LI, D.; WU, M.; ZHAO, W. Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system. **Ecological Indicators**, v. 67, p. 637-648, Aug. 2016.
- MELO, A. V. de; SANTOS, V. M. dos; VARANDA, M. A. F.; CARDOSO, D. P.; DIAS, M. A. R. Desempenho agrônômico de genótipos de milho submetidos ao estresse hídrico no sul do estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 2, p. 177-189, 2018.
- MELO, F. de B.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de; PESSOA, B. L. de O. **Levantamento, zoneamento e mapeamento pedológico detalhado da área experimental da Embrapa Meio-Norte em Teresina, PI**. 2. ed. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2019. 41 p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 265).
- MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358-371, 2013.
- QGIS Development Team. **QGIS user guide**. Version 2.18. Chicago: Open Source Geospatial Foundation, 2019. QGIS Project. Disponível em: https://docs.qgis.org/2.18/pdf/pt_BR/QGIS-2.18-UserGuide-pt_BR.pdf. Acesso em: 13 abr. 2020.
- SANTOS, A. L. F. dos; MECCHI, I. A.; RIBEIRO, L. M.; CECCON, G. Eficiência fotossintética e produtiva de milho safrinha em função de épocas de semeadura e populações de plantas. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 5, n. 4, p. 52-60, out./dez. 2018.
- SHANAHAN, J. F.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D.; VARVEL, G. E.; WILHELM, W. W.; TRINGE, J. M.; SCHLEMMER, M. R.; MAJOR, D. J. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 3, p. 583-589, 2001.
- SIMÕES, W. L.; GUIMARÃES, M. J. M.; OLIVEIRA NETO, H. T. de; OLIVEIRA, A. R. de; VOLTOLINI, T. V. Ajuste da lâmina de irrigação no cultivo de milho para silagem no Vale do Submédio São Francisco. **Revista Científica Intellecto**, v. 2, n. 3, p. 95-104, 2017.
- THENKABAIL, P. S.; SMITH, R. B.; DE PAUW, E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 2, p. 158-182, 2000.
- THORNTWHAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. New Jersey: Drexel institute of technology, 1955. 104 p. (Climatology, v. 8, n. 1).
- TUMLISAN, G. Y. **Monitoring growth development and yield estimation of maize using very high-resolution UAV-images in Gronau, Germany**. 2017. 52 f. Thesis (Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation) - University of Twente, Enschede.
- WANI, A. A.; JOSHI, P. K.; SINGH, O. Estimating biomass and carbon mitigation of temperate coniferous forests using spectral modeling and field inventory data. **Ecological Informatics**, v. 25, p. 63-70, Jan. 2015.
- WEBODM. **Web OpenDroneMap tutorials**. Version 2.6.4, 2020. Disponível em: <https://docs.opendronemap.org/tutorials/>. Acesso em: 5 nov. 2020."

Embrapa

Meio-Norte

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO

