



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS – CECA
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



PEDRO LUÃ VIEIRA DE SOUZA SARMENTO

**PRODUÇÃO DE CANA-ENERGIA E SUAS CARACTERÍSTICAS
ENERGÉTICAS EM CONDIÇÃO TROPICAL**

Rio Largo – AL

2019

PEDRO LUÃ VIEIRA DE SOUZA SARMENTO

**PRODUÇÃO DE CANA-ENERGIA E SUAS CARACTERÍSTICAS
ENERGÉTICAS EM CONDIÇÃO TROPICAL**

Orientador:

Profº Dr. Guilherme Bastos Lyra

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, em cumprimento as exigências para obtenção do título de Doutor em Agronomia, Área de Concentração: Produção Vegetal.

Rio Largo – AL

2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Agrárias
Bibliotecário: Erisson Rodrigues de Santana

S246p Sarmiento, Pedro Luã Vieira de Souza

Produção de cana-energia e suas características energéticas em condição tropical. / Pedro Luã Vieira de Souza Sarmiento. Rio Largo - AL – 2019.

102 f.; il; 33 cm

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós - graduação em Agronomia, Área de concentração: Produção Vegetal, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2019.

1. Coeficiente de extinção de Luz. 2. Poder calorífico superior.
3. Energia – conversão. I. Título.

CDU: 633.61

TERMO DE APROVAÇÃO

PEDRO LUÃ VIEIRA DE SOUZA SARMENTO

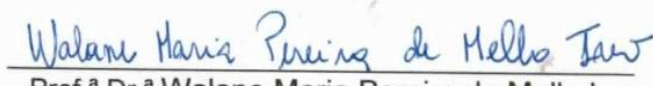
(Matrícula 15140057)

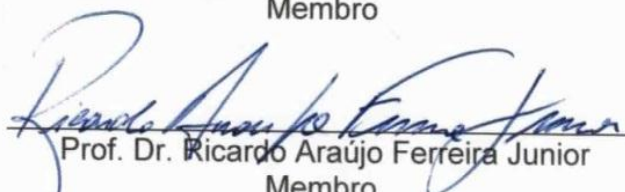
"PRODUÇÃO DE CANA-ENERGIA E SUAS CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS EM CONDIÇÃO TROPICAL"

Tese apresentada e avaliada pela banca examinadora em 10 de julho de 2019, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal do Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Unidade Acadêmica Centro de Ciências Agrárias da UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS.


Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra
Presidente


Prof. Dr. Renan Cantalice de Souza
Membro


Prof.ª Dr.ª Walane Maria Pereira de Mello Ivo
Membro


Prof. Dr. Ricardo Araújo Ferreira Junior
Membro

Rio Largo - AL
Julho-2019

DEDICATÓRIA

Primeiramente, a Deus, pela saúde e a proteção;

A minha querida mãe, Sônia Maria, pelo amor, carinho, paciência e companheirismo que sempre esteve lado a lado em todos os momentos da minha vida. Ao meu pai, Edjan Vieira pelo apoio, amizade, caráter e ética de ter conduzindo minha educação e acreditado em meu potencial, apesar da difícil situação que passamos não deixou que faltasse o mais importante na minha formação, à educação.

Ao meu querido tio, Eridan Vieira que sempre acreditou em meu esforço e na perseverança em vencer, e a força que me deu durante todos os anos de minha formação e os conselhos como líder da família;

A minha companheira, Nadiane Viana pelo o amor, apoio, incentivo e por sempre está ao meu lado em todas as horas de dedicação acadêmica;

Ao meu filho, Pedro Murilo Belo de Souza pela paciência e companheirismo durante o curso;

Aos meus irmãos Isabelle Cristina, João Felipe, João Paulo, Maria Edja, Maria Victória e Victor Hugo;

Aos meus avos Maria Honorato
(*in memoriam*) e José Caetano;

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Guilherme Lyra pelos ensinamentos, conselhos e indicações durante minha vida profissional. Sempre foi um exemplo de docente a ser seguido pelo respeito e bastante ética que conduz a profissão de docente;

Ao professor Leonaldo de Souza pelas aulas e ensinamentos durante o curso, exemplo de pesquisador, comprometido com o ensino e a pesquisa;

Ao professor, Iêdo Teodoro, pelos ensinamentos, confiança, conselhos, incentivo e oportunidades;

Ao professor Ricardo Araújo pelo o apoio e ensinamento ao conduzir o experimento e principalmente nas medidas de radiação solar;

Aos demais professores do CECA que contribuíram de maneira significativa para minha pós-graduação;

Aos meus amigos integrantes do grupo de pesquisa do Laboratório de irrigação e Agrometeorologia: Adolpho Rocha, André Carvalho, Joelmir Farias, Renato Araújo, Ivomberg Magalhães, pela convivência e momentos compartilhados;

Ao programa de pós-graduação, produção vegetal, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que possibilitou a parceria entre a GranBio e a pós graduação da UFAL;

A empresa GranBio pela cessão da estrutura para realização da pesquisa, em especial aos colaboradores Adolpho Rocha, Luiz Sérgio, Hugo Soriano e o José Bressiani por todo apoio prestado durante a pós-graduação;

Ao Laboratório de Biocombustíveis e Energia (LABEN) da UFAL e a EMBRAPA, por disponibilizar as análises do conteúdo energético da cana-de-açúcar;

A Usina Santa Clotilde S.A pelo tempo cedido para se dedicar ao doutorado, em nomes dos amigos: Cristovão Oiticica, Daniel Berard, Leonardo Pinto, José Carlos, Mauricio Barbosa, Evaldo Gomes, Alex Aldo e Joseneide Gomes;

- Ambiente limpo não é o que mais se limpa e sim o que menos se suja (Chico Xavier);

- A estratégia de ontem foi o que nos possibilitou sobreviver até agora, mas uma nova estratégia deve ser criada se quisermos garantir nossa sobrevivência no futuro (Paul Levesque).

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL	16
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	A matriz energética	16
2.2	O cultivo da cana-de-açúcar e a cana-energia	17
2.3	Componentes de produção, radiação solar e energia na biomassa.....	21
2.4	Referências	27
3.	CAPÍTULO 1	33
3.1	COMPONENTES DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE CANA-ENERGIA EM CONDIÇÕES TROPICAIS	33
3.1.1	Introdução	35
3.1.2	Material e Métodos.....	36
3.1.3	Resultados e Discussão	43
3.1.4	Conclusões	73
3.1.5	Referências	73
4.	CAPÍTULO 2	78
4.1	CONVERSÃO ENERGÉTICA SOLAR EM ENERGIA DA BIOMASSA PARA CANA-ENERGIA EM CONDIÇÃO TROPICAL.....	78
4.1.1	Introdução	80
4.1.2	Material e Métodos.....	81
4.1.3	Resultados e Discussão	82
4.1.4	Conclusões	97
5.1.5	Referências	97

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Variação na composição de cana-de-açúcar, cana-energia tipo I e cana-energia tipo II (adaptado Tew e Cobill, 2008)..... 21
- Figura 2.** Dados climatológicos da região de Teotônio Vilela-AL, no período de 1978 a 1991. Dados cedidos pelo Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia, CECA, UFAL, coletados na Usina Seresta, nas coordenadas Geodésicas (9°41'S;36°20'W;153m). 38
- Figura 3.** Elementos meteorológicos: temperatura média do ar (Tmed), umidade relativa média do ar (URmed) e precipitação pluvial (P), irradiação fotossintética incidente (HFA) e evapotranspiração de referência (ET0), durante o cultivo de cana-de-açúcar. 44
- Figura 4.** Balanço hídrico sequencial do cultivo com capacidade de água disponível (CAD), intervalo de água facilmente disponível (AFD), armazenamento de água no solo (ARM), em escala diária e precipitação pluvial (P), irrigação (I) e evapotranspiração da cultura (ETC) por decêndio, durante o cultivo de cana-energia e cana-de-açúcar na região de Teotônio Vilela em Alagoas. 45
- Figura 5.** Altura de planta (AP) e comprimento de colmo (CC) para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulados (GDA) em condições tropicais, ajustados pelo modelo logístico com seus respectivos parâmetros. 47
- Figura 6.** Relação entre índice de área foliar e os graus-dia acumulados (GDA) para os genótipos de cana em condições tropicais, simulado pelo modelo log normal com seus respectivos parâmetros. 49
- Figura 7.** Perfilhos por metro (PERF) e diâmetro do colmo (DC) para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulados (GDA) em condições tropicais. 51
- Figura 8.** Coeficiente de extinção de luz (k) estimado pela relação entre a fração de irradiância transmitida (fRf_T) e o índice de área foliar (IAF), para os genótipos de cana. 53
- Figura 9.** Coeficiente de extinção de luz (k) estimado pela relação entre a fração de irradiância transmitida (fRf_T) e o índice de área foliar (IAF), para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar. 54
- Figura 10.** Relação entre a matéria seca acumulada (BS) e a irradiação fotossintética interceptada (HF_INT), irradiação fotossintética ativa (HFA) e irradiação global (Hg) para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar. 57

Figura 11. Biomassa verde (BV) e biomassa seca (BS) para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulado (GDA) em condições tropicais, simulado pelo modelo logístico com seus respectivos parâmetros.	59
Figura 12. Fibra e brix para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulado (GDA) em condições tropicais, em função de regressão linear ou quadrática conforme a estatística.	64
Figura 13. Pureza e umidade para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulado (GDA) em condições tropicais, em função de regressão linear ou quadrática conforme a estatística.	67
Figura 14. Açúcares redutores totais (ART) e açúcares totais recuperáveis (ATR) em kg t^{-1} para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulado (GDA) em condições tropicais, em função de regressão linear ou quadrática conforme a estatística.	71
Figura 15. Açúcares redutores totais (ART) e açúcares totais recuperáveis (ATR) em t ha^{-1} para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulado (GDA) em condições tropicais, em função de regressão linear ou quadrática conforme a estatística.	72
Figura 16. Elementos meteorológicos: irradiação global (Hg) e fotossintética (HFA), precipitação pluvial (P), evapotranspiração de referência (ET0), por mês, durante o cultivo de cana na região de Teotônio Vilela em Alagoas.	83
Figura 17. Balanço hídrico do cultivo com déficit hídrico, excesso hídrico, precipitação pluvial (P), irrigação (I) e evapotranspiração da cultura (ETC) mensal, durante o cultivo de cana na região de Teotônio Vilela em Alagoas.	84
Figura 18. Poder calorífico superior (PCS) ao longo do ciclo para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar.	87
Figura 19. Cinzas e combustibilidade ao longo do ciclo para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar.	90
Figura 20. Eficiência na conversão de energia solar em biomassa (ECE) para irradiação fotossintética interceptada (HF_INT), irradiação fotossintética ativa (HFA) e irradiação global (Hg), para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar.	93
Figura 21. Acúmulo de biomassa em forma de energia (BS, GJ ha^{-1}), em função dos graus-dia acumulado, para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados da análise química e física do solo da área experimental, nas profundidades de 0 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m.	37
Tabela 2. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de genótipos de cana para as variáveis de crescimento, na colheita: Altura de plantas (AP), comprimento do colmo (CC), diâmetro do colmo (DC) e perfilhos por metro (PERF).	48
Tabela 3. Teste de média dos genótipos de cana para as variáveis de crescimento, na colheita: Altura de plantas (AP), comprimento do colmo (CC), diâmetro do colmo (DC) e perfilhos por metro (PERF/m).	48
Tabela 4. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de genótipos de cana para as variáveis de produção, na colheita: biomassa verde (BV), biomassa seca (BS), fibra, brix cana, umidade (UMID), ART (kg t^{-1}), ATR (kg t^{-1}), ART (t ha^{-1}), ATR (t ha^{-1}) e pureza.	60
Tabela 5. Teste de média dos genótipos de cana para as variáveis de produção, na colheita: biomassa verde (BV), biomassa seca (BS), fibra, brix cana, umidade, (kg t^{-1}), ATR (kg t^{-1}), ART (t ha^{-1}), ATR (t ha^{-1}) e pureza.	61
Tabela 6. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para fibra ao longo do ciclo.	62
Tabela 7. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para brix ao longo do ciclo.	63
Tabela 8. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para umidade ao longo do ciclo.	65
Tabela 9. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para pureza do caldo ao longo do ciclo.	66
Tabela 10. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para açúcares redutores totais (ART, kg t^{-1}) ao longo do ciclo.	68
Tabela 11. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para açúcares totais recuperáveis (ATR, kg t^{-1}) ao longo do ciclo.	68

Tabela 12. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para açúcares redutores totais (ART, t ha ⁻¹) ao longo do ciclo.	69
Tabela 13. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para açúcares totais recuperáveis (ATR, tha ⁻¹) ao longo do ciclo.	69
Tabela 14. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de genótipos de cana-energia e cana-se-açúcar para poder calorífico superior (PCS), ao longo do ciclo.	85
Tabela 15. Teste de média dos genótipos de cana para poder calorífico superior ao longo do ciclo.	85
Tabela 16. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de dias após o plantio dos genótipos de cana para poder calorífico superior ao longo do ciclo.....	86
Tabela 17. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de dias após o plantio dos genótipos de cana para cinzas e combustibilidade ao longo do ciclo.....	89
Tabela 18. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de genótipos de cana para cinzas (CZ) e Combustibilidade (CB), ao longo do ciclo.....	89
Tabela 19. Efeito dos genótipos de cana para cinzas (CZ), ao longo do ciclo.	89
Tabela 20. Efeito dos genótipos de cana para combustibilidade (CB), ao longo do ciclo.	91
Tabela 21. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de genótipos de cana-energia para energia por hectare (GJ ha ⁻¹), ao longo do ciclo.	94
Tabela 22. Teste de média dos genótipos de cana para energia por hectare ao longo do ciclo.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFD - água facilmente disponível;
ARM - armazenamento de água no solo;
BS - Biomassa seca;
CAD - conteúdo de água disponível;
CB - teor de combustibilidade;
CC - capacidade de campo;
CECA - Centro de Ciências Agrárias;
CO₂- Dióxido de carbono;
CZ – teor de cinzas;
DAT - dias após o transplântio;
ECE - eficiência de conversão de energia;
ECE_{HFA} - eficiência de conversão de energia pela irradiação fotossintética ativa;
ECE_{Hg} - eficiência de conversão de energia pela irradiação global;
ECE_{HF_INT} - eficiência de conversão de energia pela irradiação fotossint. Interceptada;
ET_c - evapotranspiração da cultura;
ET₀ - evapotranspiração de referência;
f - fator de disponibilidade de água;
EUR - eficiência no uso da radiação para a biomassa seca total;
FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations;
f_rf_T - fração de irradiância transmitida;
FV - fonte de variação;
GD - graus-dia;
GDA - graus-dia acumulado;
GEE - gases do efeito estufa;
GJ – Gigajoule;
GJ ha⁻¹ – giga joule por hectares;
GL - grau de liberdade;
g m⁻² - grama por metro quadrado;
g MJ⁻¹ - grama por megajoule;
Ha - irradiação solar no topo da atmosfera;
ha - hectares;
HfA - irradiação solar fotossintética incidente;

Hf_Int - irradiação fotossintética interceptada;
Hg - irradiação solar global;
I – irrigação;
IAA- Instituto do Açúcar e do Alcool;
IAF - índice de área foliar;
J g⁻¹ - Joule por grama;
k - coeficiente de extinção da luz;
Kc - coeficiente da cultura único;
Kt - índice de claridade ou transmitância atmosférica;
LIA - laboratório de irrigação e agrometeorologia;
Mbb/d - milhões de barris de petróleo por dia;
MJ m⁻² - megajoule por metro quadrado;
mm – milímetro;
MPB - pré-brotadas;
Mtep - milhões tonelada equivalente de petróleo;
n – número de amostras;
nm – nanômetro;
ns – não significativo;
P - precipitação pluvial;
p – probabilidade de erro;
PCI - poder calorífico inferior;
PCS - poder calorífico superior;
PCU - poder calorífico útil;
R² – coeficiente de determinação;
Regr. – regressão;
RFA- radiação fotossinteticamente ativa;
Rf_T - irradiância solar fotossintética transmitida;
Rg - irradiância solar global;
t - teste de student;
t – tonelada;
Tmed - temperatura do ar média;
Tb - temperatura basal da planta;
t ha⁻¹ – tonelada por hectare;
TWh - terawatt-hora;

UC - umidade crítica;

UFAL - Universidade Federal de Alagoas;

URmed - umidade relativa do ar média.

PRODUÇÃO DE CANA-ENERGIA E SUAS CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS EM CONDIÇÃO TROPICAL

Resumo Geral: O uso em excesso dos insumos como petróleo e carvão mineral, nas últimas décadas, provocou um desequilíbrio das condições climáticas do planeta, principalmente devido à alta liberação dos gases causadores do efeito estufa, e o desequilíbrio tem levado ao aumento da temperatura global. Como estratégia para atender a demanda mundial de descarbonização da atmosfera e suprir a demanda de energia no mundo, cita-se o cultivo de biomassa com elevada capacidade de gerar energia e entre elas a cana-energia. O presente trabalho objetivou determinar os componentes de produção para cana-energia e suas características energéticas, para conversão de biomassa em energia. Foi conduzido um estudo experimental composto por 7 genótipos de cana-energia e um genótipo de cana-de-açúcar. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições. A radiação fotossinteticamente ativa interceptada foi calculada levando-se em consideração o índice de área foliar, a radiação fotossinteticamente ativa incidente e o coeficiente de extinção da luz (k). O poder calorífico superior, o teor de combustibilidade e o teor de cinzas foi determinado bimestralmente. A eficiência de conversão de energia foi calculada pela relação entre a energia presente na biomassa ao longo do ciclo e a irradiação fotossintética interceptada, irradiação fotossintética ativa e irradiação global no dossel. O coeficiente de extinção de luz foi em média 0,88 para cana-energia e 0,75 para cana-de-açúcar. A eficiência no uso da radiação foi de 1,77 g MJ⁻¹ para RB92579 e 2,28 g MJ⁻¹, em média, para os genótipos de cana-energia. O poder calorífico para os genótipos de cana-energia na colheita foi, em média, 18.716 J g⁻¹, e 18.318 J g⁻¹ para RB92579. A RB92579 apresentou o menor teor de cinzas na colheita (2,4%) e o maior teor de combustibilidade (97,6%), de que os genótipos de cana-energia. Apesar do menor teor de combustibilidade os genótipos de cana-energia apresentaram mais eficiente na conversão de energia fotossintética interceptada e consequentemente produziram mais energia por unidade de área. A variedade RB92579 produziu 535 GJ ha⁻¹ de energia e a média dos genótipos de cana-energia foi de 830 GJ ha⁻¹.

Palavras-chave: coeficiente de extinção de luz, poder calorífico superior e conversão em energia.

ENERGY CANE PRODUCTION AND ITS ENERGY CHARACTERISTICS IN TROPICAL CONDITION

Abstract: The excessive use of inputs such as oil and coal in recent decades has caused an imbalance in climate conditions on the planet, mainly due to the high release of greenhouse gases, and the imbalance has led to a rise in global temperature. As a strategy to meet the global demand for decarbonization of the atmosphere and supply the world's energy demand, we mention the cultivation of biomass with high capacity to generate energy and among them the sugarcane. The present work aimed to determine the production components for energy cane and their energy characteristics for conversion of biomass to energy. An experimental study consisting of 7 energy cane genotypes and one sugar cane genotype was conducted. The experimental design was in randomized blocks with three replications. The intercepted photosynthetically active radiation was calculated taking into account the leaf area index, the incident photosynthetically active radiation and the light extinction coefficient (k). The higher calorific value, fuel content and ash content were determined every two months. The energy conversion efficiency was calculated by the relationship between the energy present in the biomass throughout the cycle and the intercepted photosynthetic irradiation, active photosynthetic irradiation and global canopy irradiation. The coefficient of extinction of light was on average 0.88 for cane-energy and 0.75 for sugarcane. The efficiency in the use of radiation was 1.77 g MJ^{-1} for RB92579 and 2.28 g MJ^{-1} , on average for sugarcane genotypes. The calorific value for the sugarcane genotypes at harvest was, on average, $18,716 \text{ J g}^{-1}$, and $18,318 \text{ J g}^{-1}$ for RB92579. RB92579 had the lowest ash content at harvest (2.4%) and the highest combustibility content (97.6%), than the sugarcane genotypes. Despite the lower highest combustibility, the sugarcane genotypes were more efficient in the conversion of intercepted photosynthetic energy and consequently produced more energy per unit area. The RB92579 variety produced 535 GJ ha^{-1} of energy and the average of the sugarcane genotypes was 830 GJ ha^{-1} .

Keywords: coefficient of extinction of light, higher calorific value and conversion in energy.

1. INTRODUÇÃO GERAL

As emissões de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, que estão entre os principais gases do efeito estufa, alcançaram novos recordes em 2017. O nível de dióxido de carbono em 1994 foi de 357 partes por milhão e em 2017 alcançou 405 partes por milhão (BLUNDEN, ARNDT e HARTFIELD, 2018). As principais causas do aumento na concentração dos gases que provocam o efeito estufa estão diretamente ligadas à queima de combustíveis fósseis pelos setores industriais e de transporte. A preservação ambiental e a insegurança energética mundial necessitam privilegiar fontes de energias renováveis, que substituem combustíveis mais poluentes. O uso de fontes de energia renováveis é cada vez mais necessário para alcançar as mudanças necessárias para a descarbonização da atmosfera.

A solução para o suprimento energético através de fontes renováveis é questão estratégica de cada país para ampliação da participação das energias renováveis na matriz energética. As fontes de energia renováveis mais utilizadas são águas dos rios e oceanos (energia de hidrelétrica), biomassa, energia solar, ventos (energia eólica), ondas e maré (energia maremotriz) e o calor proveniente da terra (energia geotérmica). A biomassa lignocelulósica é o recurso biológico renovável mais abundante e constitui a maior fonte de carboidratos naturais do mundo. A produção de biomassa resulta da conversão de energia solar em energia química por meio da fotossíntese e suas principais vantagens é o aproveitamento direto por meio de combustão da matéria orgânica em fornos ou caldeiras.

A biomassa escolhida para produção de energia deve assegurar baixo custo de produção, aptidão para ser cultivadas em áreas marginais não competindo com a produção de alimentos, boas características de composição química, conversão energética de alta eficiência, baixo teor de cinzas, alto poder calorífico e elevada combustibilidade. Como fonte de biomassa energética se destaca plantas oleaginosas, milho, cana-de-açúcar, cana-energia, beterraba, sorgo, resíduos florestais e agroindustriais, entre outras.

Nos países tropicais o cultivo de cana-de-açúcar tem se destacado como uma das mais importantes alternativas de energia renovável, com isso, pesquisas foram geradas com o objetivo de desenvolver cultivares de cana-de-açúcar com maior quantidade de biomassa lignocelulósica (KIM e DAY, 2011; SILVEIRA 2014), ou seja, cultivares de *Saccharum spp.* com maior potencial de geração de energia, etanol e eletricidade, sendo

assim denominada cana-energia. A produção de cana-energia favorece tanto a produção do etanol de segunda geração, ou celulósico, quanto a capacidade de aumentar a quantidade de energia elétrica no sistema nacional (MATSUOKA et al., 2012).

As características morfológicas da cana-energia tornam a cultura com maior potencial de produção de matéria seca quando comparado com a cana-de-açúcar e outras biomassas. Tal desempenho é dado principalmente pela densidade de plantas, rápido crescimento, elevado acúmulo de biomassa, índice de área foliar com ótima distribuição espacial das folhas e alta taxa fotossintética. Essas características estão diretamente relacionadas à interceptação da radiação e à conversão de energia solar em energia química. Pesquisas têm mostrado uma relação linear entre a biomassa acumulada e a energia fotossinteticamente ativa absorvida ao longo do ciclo de muitas espécies vegetais (KUNZ, et al., 2007). Em condições edafoclimáticas ideais, supridas de todas as exigências nutricionais e livre de ataque de pragas e doenças, a radiação torna-se fator primordial para o rendimento potencial da cultura. Diante do exposto, o presente trabalho objetivou determinar os componentes de produção da cana-energia e suas características energéticas, para conversão de energia da biomassa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A matriz energética

A demanda total de energia mundial foi da ordem de 13.729 milhões toneladas equivalente de petróleo (Mtep) no ano de 2016, na qual 81,3% dessa energia foram provenientes da queima de combustíveis fósseis. A matriz energética mundial em 2016 apresentou a seguinte distribuição: 32,0 % petróleo e seus derivados, 27,5% de carvão mineral, 21,8% de gás natural, 5,0% nuclear, 2,5% hidráulica e 11,2% outras não especificadas. A somatória entre hidráulica e outras não especificadas, apresenta o percentual de energias renováveis (13,7%) presente na matriz energética mundial, dentre estes, vale a pena salientar a produção de 82,52 e 52,87 Mtep, de energia eólica e solar, respectivamente (MME, 2017).

A matriz energética brasileira no ano 2016 consumiu 288 Mtep e foi distribuída da seguinte forma: 43,5% de energias renováveis, equivalente a 17,4% de derivados da cana-de-açúcar, 12,6% hidráulica, 8,0% de lenha e carvão vegetal e 5,4% de outras renováveis e 56,5% de energia não renováveis, em que foi 36,5% de petróleo e seus derivados, 12,3% de gás natural, 5,5% de carvão mineral e seus derivados e 2,2% de nuclear. Das fontes renováveis no Brasil, o etanol e o bagaço de cana detêm a maior participação, 40,1%.

O consumo de energias não renováveis provoca a carbonização da atmosfera, o indicador brasileiro de emissão de dióxido de carbono foi de 1,47 toneladas de CO₂ por tonelada equivalente de petróleo (t CO₂/tep), em 2016, e representou 63% do indicador mundial de emissão de dióxido de carbono. A emissão mundial foi da ordem de 32.320 milhões de toneladas de CO₂, com indicador de 2,35 t CO₂/tep. Essa diferença acentuada no indicador de emissão CO₂ por energia é em razão da maior presença de fontes renováveis na sua matriz energética brasileira (MME, 2017; EPE/MME, 2017). Por isso, o aumento da matriz energética através de fontes renováveis torna-se de suma importância ambiental e energética para o mundo.

A matriz elétrica mundial, no ano de 2016, consumiu 36,1% da demanda mundial de energia, isso produziu 27.789 terawatt-hora (TWh), sendo distribuída 76% não renováveis e 24% renováveis. Das fontes não renováveis se destaca carvão mineral (38,5%), gás natural (22,8%), nuclear (10,6%) e petróleo e seus derivados (4,0%). Já as fontes renováveis, o grande potencial é hidráulica (16,2%), e as demais são fontes

desconhecidas. No Brasil, a matriz elétrica é caracterizada por 81,7% de fontes renováveis, com ênfase para energia hidráulica que representa 61,5%. A oferta de energia eólica e do bagaço somou 11,1% na oferta interna de energia. O total de energia elétrica disponível no Brasil foi 619 TWh. No caso do bagaço, dos 35,2 TWh gerados, 21,1 TWh foram excedentes para o mercado, e 14,1 TWh para demanda própria para produção de açúcar e etanol. Dentro da matriz elétrica renovável no Brasil a hidráulica representa 83,3%, o bagaço 7,0% e a eólica 6,6%, esses são os mais expressivos. A maior fonte de energia elétrica não renovável é o gás natural com 9,1% do total, isso representa 49,8% da matriz elétrica não-renovável (MME, 2017; EPE/MME, 2017).

2.2 O cultivo da cana-de-açúcar e a cana-energia

A cultura da cana-de-açúcar é cultivada em todas as regiões tropicais e subtropicais do mundo ocorrendo em 130 países (BARNES, 1974). Porém, na maioria dessas regiões, essa cultura possui restrições hídricas que reduzem sua produtividade. Na Austrália, por exemplo, 60% da cana produzida necessitam de algum tipo de irrigação e na África do Sul, 40% dos cultivos são feitos com irrigação (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005).

A produção mundial de cana foi 1.661 milhões de toneladas colhidas em 24 milhões de hectares. O Brasil é o maior produtor dessa matéria-prima (671 milhões de toneladas produzidos em 2009), seguidos por Índia e China, com 285 e 116 milhões de t produzidos em 2009, respectivamente. O Brasil é também o maior exportador de açúcar e etanol do mundo (BARBOSA, 2014). O rendimento mundial foi de 69,8 toneladas por hectares, porém o país que possui o maior rendimento de cana, naqueles que produzem mais de 10 milhões de toneladas, é o Egito com média de 121 t/ha (STEDUTO et al., 2012).

O Brasil possui 851,5 milhões de hectares (ha), destes foram destinados 8,7 milhões de hectares para a colheita da cana-de-açúcar e mais aproximadamente 1,5 milhões de ha de mudas e plantios, totalizando 10,2 milhões de hectares com a cultura, na safra 2017/2018. Nesta área colhida foi quantificada 633,3 milhões de toneladas (t) moída, em que 290,3 e 343,0 milhões t destinadas para a produção de açúcar e etanol, respectivamente. Os estados brasileiros maiores produtores são: São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, Mato Grosso, Alagoas e Pernambuco, em ordem decrescente. Apenas o estado de São Paulo responde por aproximadamente 60%

da produção nacional. A produtividade média nacional foi de 72,5 toneladas por hectare (t ha^{-1}) e os maiores estados em rendimento agrícola em ordem decrescente foram: Minas Gerais ($78,8 \text{ t ha}^{-1}$), Goiás ($77,4 \text{ t ha}^{-1}$), São Paulo ($76,6 \text{ t ha}^{-1}$) e Bahia ($75,2 \text{ t ha}^{-1}$). No Nordeste brasileiro, Alagoas e Pernambuco responderam por aproximadamente 4,4 % da produção nacional, na safra 2017/2018. O maior produtor do Nordeste é Alagoas com 13,7 milhões de toneladas, e produtividade média de $44,9 \text{ t ha}^{-1}$, na safra 2017/2018 (CONAB,2018). Alagoas tem passado por bastante dificuldade de produção devido à meteorologia da região, pelos longos períodos de estresse hídrico, que impacta diretamente no rendimento agrícola. O estado de Alagoas já possuiu 24 unidades industriais operando e atualmente conta com 15 unidades, com risco e tendência de redução desse número, dentre elas, já tem 6 destas unidades estão em processo de Recuperação Judicial (SINDAÇÚCAR, 2018).

O baixo rendimento de cana-de-açúcar, em alguns estados brasileiros, ocorrem pois o crescimento e desenvolvimento da cultura são dependentes da interação de vários elementos meteorológicos, que incluem principalmente a precipitação pluvial, radiação solar, temperatura e umidade do ar. Em relação à disponibilidade hídrica (por se tratar de uma cultura de ciclo longo), em regiões cujas precipitações pluviais se concentram em determinado período com distribuição irregular, o seu cultivo requer a adoção de irrigação para suplementar a água proveniente das chuvas (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005). Em termos quantitativos, a demanda hídrica da cana-de-açúcar é variável com a região e a variedade, sendo relatados valores de 1.710 mm nas condições do Submédio do Vale do São Francisco (SILVA et al., 2012); entre 1.400 e 1.500 mm em Sindh no Paquistão (QURESHI e MADRAMOOTOO, 2002); e entre 1.448 e 1.584 mm na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas (ALMEIDA et al., 2008). Porém, BISWAS (1988) indica uma quantidade de 1.200 mm de chuva, bem distribuída, dá para satisfazer as exigências hídricas e potencializar a produção da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar é uma planta de metabolismo fotossintético C4, com elevada taxa fotossintética, sendo uma das culturas mais eficientes na conversão de energia radiante em energia química (TEW e COBILL, 2008). Conforme TAIZ E ZEIGER (2006) neste tipo de mecanismo (C4), a concentração de CO_2 é maior, pois a enzima pepcase não tem afinidade com o O_2 atmosférico, sendo assim a planta não apresenta efeito negativo, com relação ao gasto energético, do processo de fotorespiração (assimilação de O_2 ao invés de CO_2 pela enzima Rubisco), que ocorre em plantas de metabolismo C3.

As plantas de cana-de-açúcar podem variar as características morfológicas de acordo com os genótipos. As características de morfologia e a distribuição das folhas e dos colmos definem a interceptação e a absorção da radiação fotossinteticamente ativa incidente no dossel da planta. Estas características são essenciais para a eficiência fotossintética da cultura (SINGELS et al., 2005; LONG et al., 2006). Para elevada produção de biomassa busca-se genótipos com morfologia adaptada a elevada densidade de plantas, com grande capacidade de interceptar energia fotossintética.

Pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de desenvolver clones de cana-de-açúcar com maior quantidade de biomassa lignocelulósica, denominada cana-energia (SUN e CHEN, 2002; GIRIO et al., 2010; KIM e DAY, 2011; SILVEIRA, 2014). SILVEIRA et al. (2015) reportam a importância da identificação de genótipos superiores de cana-de-açúcar para uso em hibridações com o objetivo de obter cultivares de cana-energia com as características desejadas com maior potencial de geração de energia. MING et al. (2006) e SILVEIRA (2014) afirmam que para incrementar o teor de fibra das futuras cultivares, pode-se recorrer a hibridações envolvendo acessos de *Saccharum spontaneum* e *Saccharum robustum* com as variedades modernas de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.).

Para JENKINS et al. (1998), a fibra da cana-de-açúcar é a parte sólida da planta formada por celulose, hemicelulose, ligninas, pentosanas, pectinas e outros componentes. Sendo responsável pela sustentação da planta, auxiliando na formação de vasos condutores de seivas, além de armazenar o caldo e seus constituintes. Em Louisiana, o bagaço analisado consistia em aproximadamente 36% de celulose, 28% de hemicelulose, 20% de lignina, 13% de outros orgânicos e 2% de cinza com base na massa seca (IRVINE e BENDA, 1979). Porém de acordo com OGATA (2013), foi observado ampla variabilidade genética para os constituintes sólidos da fibra: celulose 26,5% a 54,2%, hemicelulose 16,7% a 26% e lignina 17,7% a 27,1%, para 207 clones de cana-energia com elevado teores de fibra.

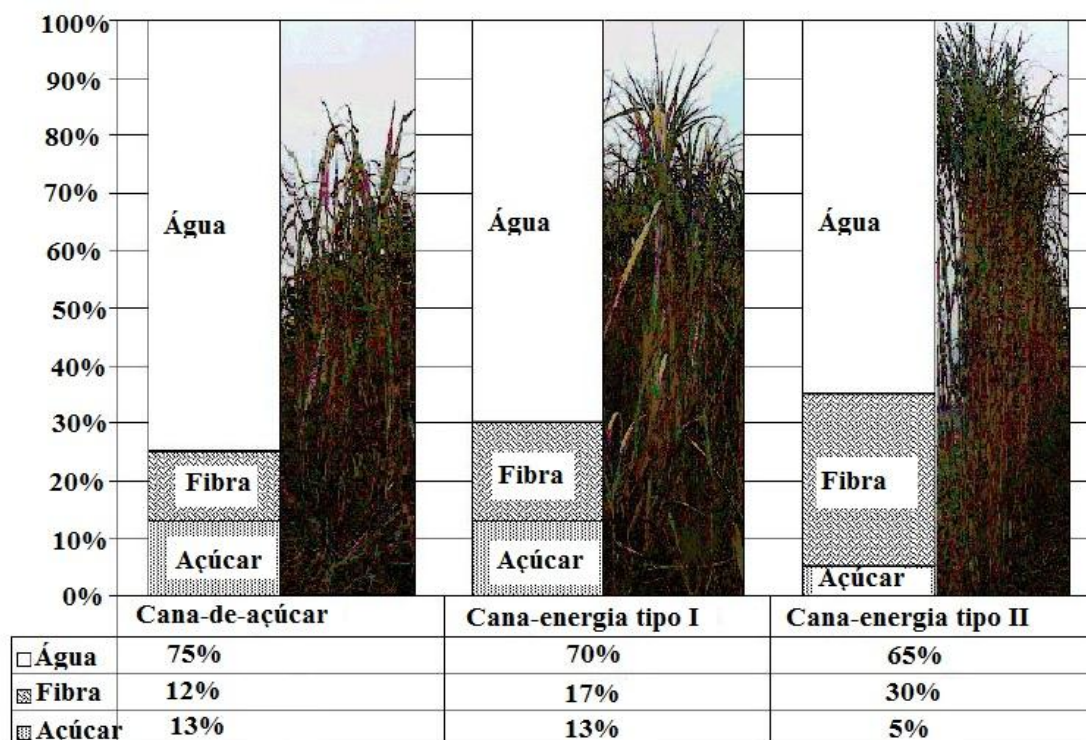
De acordo com CASTRO et al. (2001) e MATSUOKA et al. (1999), as principais características da espécie *S. spontaneum* são perfilhamento e capacidade de rebrota de soqueira, resistência a estresses, doenças e pragas. Esta espécie apresenta plantas de menor porte, colmos curtos e finos, fibrosos e praticamente sem açúcar, com o sistema radicular bem desenvolvido com grande número de indivíduos por touceira, isso faz alcançar mais horizontes no solo melhorando a adaptação a condições adversas de solo e clima.

McKENDRY (2002) e WACLAWOVSKY (2010) citam em suas revisões que, para alcançar a sustentabilidade, as culturas energéticas não devem exigir uso extensivo de terras agrícolas privilegiadas, deve ter baixo custo de produção de energia a partir da biomassa, alto rendimento em biomassa seca, composição com menos contaminantes e baixos requisitos de nutrientes. A cana-energia surgiu para atender as novas demandas do setor sucroenergético. De acordo com TEW e COBILL (2008) estas promissoras cultivares tem o potencial de apresentar mais de 30% de fibra e proporcionar maior produtividade agrícola.

A cana-energia atualmente apresenta uma produção de biomassa muito superior à cana-de-açúcar tradicional, alcançando cerca de 250 t ha⁻¹ ao ano. Essa variedade de cana tem apresentado características bastante promissoras, como por exemplo, 28% de fibra, enquanto a cana-de-açúcar comercial proporciona apenas 13%, além de apresentar alta produtividade e menores custos para sua produção, a cana-energia tem mostrado excelente desempenho produtivo para geração de energia (VIOLANTE, 2012). As futuras cultivares passam a ser denominadas de cana-energias compostas por mais de 30% de fibra. No programa de melhoramento da Louisiana State University (LSU) e o HoumaUSDA desenvolveram a cultivar US79-1002, que apresenta teor de fibra de 28% e produtividade com média de 211 t ha⁻¹ após 5 cortes (TEW e COBILL, 2008).

Nesse novo modelo futurístico, existirão três tipos de cana: cana-de-açúcar, com visão para alta produção de açúcar (acima de 13%) e baixa produção de fibra (abaixo de 12%); a cana-energia tipo I, definida para maximizar os teores de açúcares (acima de 13%) e fibra (acima de 17%) que seriam mais eficientes energeticamente do que as cultivares atuais; e por último a cana-energia tipo II, selecionada e cultivada principalmente ou apenas pelo seu conteúdo de fibra (acima de 30%) e baixa produção de açúcar (em média 5%), que se adapte bem em ambientes mais restritivos (Figura 1). A cana-energia tipo I e II são ideais para indústrias que visam a produção de etanol celulósico e/ou cogeração de energia (TEW e COBILL, 2008).

Figura 1. Variação na composição de cana-de-açúcar, cana-energia tipo I e cana-energia tipo II (adaptado Tew e Cobill, 2008).



2.3 Componentes de produção, radiação solar e energia na biomassa

Os componentes de produção são definidos como uma associação de diferentes caracteres que resulta na produção ou rendimento da planta (FERREIRA et al., 2007). Em cana-de-açúcar a produção de colmos é determinada pela altura, pelo diâmetro e número de colmos. Estudos conduzidos nessa cultura revelaram que a densidade de plantas com colmos industrializáveis é um dos caracteres mais importantes na produtividade de colmos (SUKHCHAIN e SAINI, 1997).

O levantamento de informações sobre as componentes de produção da cana-de-açúcar torna-se de grande importância, visto que permite inferir a influência de fatores abióticos (adubação, irrigação, data de início do ciclo, clima, solo ou bióticos (doenças, pragas, variedade e ciclo de cana-planta ou cana-soca, entre outros) no rendimento final da cultura (GILBERT et al., 2006; SINGH; SHUKLA; BHATNAGAR, 2007). De acordo com MACHADO et al. (1982), a análise de crescimento é considerada o primeiro passo da análise de produção vegetal. KNOX et al. (2010) ratificam a importância de avaliar variáveis de análise biométrica, podendo esta, ser utilizada em

modelos de simulação, a fim de se descrever o crescimento e quantificar o rendimento da cana-de-açúcar submetida a diversas condições de cultivo.

LIMA (2012) concluiu que a utilização das componentes de produção é uma ferramenta extremamente importante, da qual os agricultores dispõem, uma vez que alterações nesses componentes são responsáveis diretos pelo ajuste da produtividade. Porém, o autor explica que existe variabilidade nas componentes entre indivíduos de uma população em função de vários fatores, que vão desde a implantação da cultura até a disponibilidade de assimilados.

A radiação solar é a principal fonte de energia para os processos de biossíntese das plantas, por isso a mesma torna-se fator limitante para o rendimento potencial da cultura, quando todas as exigências das plantas estão supridas (OTTOMAN e WELCH, 1989). Aproximadamente 40 a 50% da radiação incidente na superfície terrestre está disponível em forma de energia para ser utilizada pelas plantas no processo de fotossíntese. Esta radiação é definida como radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e esta compreendida entre os comprimentos de onda de 400 a 700 nanômetros (nm) (ROSENBERG, 1983). A radiação solar que chega à planta (tanto a direta como a difusa) só pode ser utilizada na fotossíntese se for absorvida, pois quando incide no dossel a mesma pode ser refletida para atmosfera ou transmitida para o solo através da folha. Esse processo de absorção depende do ângulo de incidência dos raios solares e das características estruturais das plantas, entretanto para valores elevados do IAF, a quantidade de energia solar interceptada depende das condições do céu e da qualidade da RFA incidente (HIPPS et al., 1983; MACHADO et al., 1985).

O dossel das plantas é a estrutura receptora da energia luminosa, e é nele que ocorre a fotossíntese e a transpiração, nestes processos são produzidos os carboidratos (fotoassimilados) essenciais para o crescimento e desenvolvimento do vegetal. FERREIRA JUNIOR (2013) ratifica a importância do conhecimento da área foliar ou do dossel de uma planta para determinação da transpiração, da radiação interceptada e transmitida, fotossíntese e, conseqüentemente, a produtividade da cultura.

A distribuição espacial das folhas, ângulo de inserção foliar, IAF e propriedades óticas da vegetação estão diretamente relacionadas à interceptação da radiação solar (VILANI et al., 2007). MACHADO et al. (1985) relatam que a interceptação da radiação solar realizada pelas folhas de uma planta, acarreta a diminuição da densidade de fluxo de radiação solar ao longo da altura das plantas. SAEKI (1960), ALLEN et al. (1964), YOCUM et al. (1964) afirmam em seus estudos que a densidade de fluxo de

radiação solar dentro da cobertura vegetal (dossel) decresce exponencialmente em função do IAF acumulado de cima para baixo. Esse fenômeno é explicado pela Lei de Beer, que trata de observações de transmissão de luz da matéria. De acordo com MONSI e SAEKI (1953), a estrutura foliar horizontal intercepta mais energia do que a vertical e a interceptação da radiação no dossel das plantas é análoga a Lei de Beer (HIROSE, 2005). A radiação transmitida pelo dossel das plantas depende da quantidade de radiação interceptada pela estrutura foliar das plantas e o arranjo espacial das folhas. A quantificação da estrutura foliar das plantas pode ser definida pelo IAF e o arranjo foliar pode ser definido pelo coeficiente de extinção de luz (k). O k representa o produto entre a relação da área sombreada do dossel e a área foliar do mesmo (HIROSE, 2005; MONSI e SAEKI, 2005). Alguns estudos (SHIBLLES e WEBER, 1966; GALLAGHER e BISCOE, 1978) revelam que os parâmetros: IAF e k definem o rendimento potencial da cultura.

De acordo com as observações de MONSI e SAEKI (2005), o k varia entre 0,3 e 2,0. Mas de forma geral para a vegetação do tipo grama o k varia aproximadamente entre 0,3 e 0,5 e para folha larga varia de 0,7 a 1,0. Conforme a conclusão dos autores, o k é bastante variado entre comunidade de plantas diferentes, entretanto plantas da mesma comunidade os valores são quase constantes. Vale salientar que em cultivos muito denso, com IAF muito alto, o k pode ser inversamente proporcional a absortância.

MONTEITH e UNSWORTH (1990) explicam que o k revela o grau de diminuição da luz no dossel, por absorção e espalhamento, ou seja, quando a folhagem não é densa o suficiente para interceptar toda a radiação incidente, o coeficiente de reflexão do dossel depende, até certo ponto, da reflexão do solo, bem como da densidade das folhas. JENSEN (1932) comprovou em seus estudos que plantas com folhas distribuídas de forma vertical e inclinadas repassam de maneira uniforme a luz dentro do dossel aumentando assim sua eficiência por luz. Para LOOMIS e CONNOR (1992), o k relaciona o ângulo foliar à habilidade de cada unidade de IAF interceptar luz solar.

FERREIRA JUNIOR et al. (2015) estudando a eficiência de conversão de energia em cana sob dois espaçamentos entre fileiras no nordeste do Brasil, encontraram valores de k de 0,50 em média para o espaçamento combinado, porém os autores comprovaram que o k , e consequentemente a cobertura do solo (irradiação solar interceptada) não sofreram influencia quando submetidos a dois diferentes espaçamentos.

LONG et al. (2006) reportam que plantas com folhas eretas no topo do dossel vegetativo possibilitam melhor a distribuição de energia luminosa entre a folhagem e assim aumenta a eficiência no uso da radiação. Concluindo que plantas com essa arquitetura chegam a aumentar a fotossíntese em 40% nos horários próximos ao meio-dia, resultando em uma conversão mais eficiente da luz, refletindo em maiores produtividades (RHODES, 1973). Para BONNETT et al. (2005), a incidência de radiação solar no dossel da cana-de-açúcar permitiu a atividade metabólica das folhas inferiores, conservando-as fotossinteticamente ativas por mais tempo, além de aumentar o perfilhamento das plantas e assim a produção final de colmos.

A metodologia mais utilizada para estudar a interação entre a radiação solar e o rendimento das culturas agrícolas é através da relação entre a quantidade de energia solar interceptada por uma cultura e o acúmulo de matéria seca. Essa relação foi definida como eficiência do uso da radiação (EUR). A EUR pode ser definida também com o acúmulo de biomassa e a radiação incidente (FERREIRA JUNIOR et al., 2015). SINCLAIR e MUCHOW (1999) afirmam que a análise de crescimento em função do tempo pode gerar avaliações não confiáveis devido as diferentes condições meteorológicas. Por isso esse tipo de estudo deve-se avaliar a qualidade da época de cultivo. FRANÇA et al. (1999), utilizaram dados de radiação fotossinteticamente ativa interceptada e de temperatura para ajustar um modelo de crescimento através do monitoramento do acúmulo da biomassa seca em função dessas variáveis meteorológicas.

Os valores de EUR variam conforme relaciona a biomassa seca produzida e o tipo de radiação (radiação global, radiação fotossintética ativa e radiação fotossintética interceptada ou absorvida). Em média os valores são maiores quando utiliza a radiação fotossintética absorvida. SILVA et al. (2014) encontraram valores de $2,67 \text{ g MJ}^{-1}$ para radiação fotossintética interceptada e $1,30 \text{ g MJ}^{-1}$ para radiação global, na região de Juazeiro da Bahia.

FERREIRA JUNIOR et al. (2015) sugerem a variável eficiência de conversão de energia (ECE) para definir resultados de eficiência quando se trata de entrada e saída de energia, pois em relação a eficiência no uso da radiação (Biomassa/radiação, em g MJ^{-1}) essa pode ser calculada com diferentes tipos de radiação (incidente, interceptada ou absorvida), além do mais é unidade de massa por unidade de energia e desta forma não pode ser comparada em diferentes espécies de plantas, então a ECE possibilita comparação em base percentual, em que a base massa sofre influencia do poder

calorífico, sendo convertida em unidade de energia. O conceito de ECE é a razão entre a energia contida na biomassa e a energia radiante interceptada pelas folhas da cultura.

ZHU et al. (2008) avaliando a eficiência máxima com a qual a fotossíntese pode converter energia solar em biomassa, concluíram que na Terra apenas 6% da radiação solar total incidente é convertida em fitomassa por plantas C4, influenciando diretamente no crescimento vegetal e a produtividade das espécies cultivadas, pois fornece substratos necessários para posterior oxidação (LAWLOR, 1995; LONG et al., 2006; WACLAWOVSKY, 2010). FERREIRA JUNIOR et al. (2015) encontraram resultados de 4,9 e 5,8%, em estudo de espaçamento simples e combinado no nordeste do Brasil, na cultura da cana-de-açúcar. ZHU et al. (2008) afirmam que o principal fator responsável pela baixa eficiência de conversão de radiação em biomassa é a baixa capacidade dos dosses em utilizar a radiação incidente sobre as folhas e que a eficiência na utilização da radiação pode ser reduzida pelo excesso de energia, que desencadeia mecanismos de fotoproteção, no mecanismo das plantas C3.

Conforme SINGELS et al. (2005), a eficiência fotossintética pode ser analisada como a quantidade de carboidratos produzidos por determinada quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida, os autores ainda explicam que o maior acúmulo de sacarose em cana-de-açúcar pode ser alcançado pelo aumento nos índices de conversão de energia solar ou pelo aumento na partição de fotoassimilados para os colmos. Já a produção de biomassa é determinada pela interceptação de energia solar, ou seja, influenciada de forma direta pelo IAF, arquitetura e duração da área foliar (LAWLOR, 1995; LONG et al., 2006). Melhores desempenhos, quanto absorção de energia luminosa no dossel da cana-de-açúcar, ocorrem quando os colmos apresentam área foliar ótima, ou seja, IAF foliar variando entre 3,7 e 7,0 (MACHADO et al., 1982; MOORE e MARETZKI, 1996; TEJERA et al., 2007).

ROBERTSON et al. (1999), estudando a fisiologia e produtividade da cana-de-açúcar com déficit hídrico no início e no meio do ciclo da cultura, explica que a redução de 5% na radiação interceptada provocada pelo estresse hídrico reduz em torno de 26% a biomassa total, e opinam que, em áreas com intensa radiação, talvez possua maior influência sobre a produção de biomassa que as demais.

O poder calorífico exerce grande influência na eficiência de conversão de energia, pois ele define a quantidade de energia contida na biomassa. Conforme SILVA e SANTOS (2008), essa variável, juntamente com densidade e composição das plantas, é a principal propriedade para caracterização energética da biomassa. O poder calorífico

pode ser descrito de três formas: poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU). O poder calorífico superior é realizado em base seca, em que o calor associado a evaporação da água formada em reação com hidrogênio contido na biomassa, é contabilizado. Já o PCI leva em consideração à quantificação do hidrogênio que gera essa energia, em síntese, no PCS a água formada durante a combustão é condensada e o PCI a água não é condensada (DOAT, 1977). Já o poder calorífico útil leva em consideração o PCI e a umidade.

Para a conversão de 4,9 e 5,8%, a partir da radiação interceptada, na cana-de-açúcar, FERREIRA JUNIOR et al. (2015) encontraram o calor específico de combustão médio de 16.300 Joule por grama (J g^{-1}) na biomassa. OLIVEIRA (2014) encontrou valores de PCS variando de 15.371 a 17.150 J g^{-1} , em avaliação energética de biomassa de cana-de-açúcar, no sul brasileiro. De acordo com GONÇALVES (2010), esses valores podem receber decréscimo energético de 60% com 20% de umidade e até 92% com 50% de umidade. Conforme McKENDRY (2002), os principais critérios de seleção para biomassa são taxa de crescimento, facilidade de manejo e colheita e propriedades do material intrínseco, como umidade, cinzas, teor alcalino, pois essas últimas propriedades influenciam no rendimento operacional da conversão térmica.

A composição da biomassa é de suma importância, para a obtenção do máximo rendimento e aproveitamento das plantas nos processos indústrias, principalmente se for voltada para a produção de eletricidade e etanol. TEW e COBILL (2008) reportam que é preferível utilizar cultivares com elevada produção de biomassa, associado ao baixo teor de lignina e altos teores de celulose e hemicelulose na fibra quando o objetivo é a produção de etanol celulósico. Porém, se o objetivo for a cogeração de eletricidade, a lignina tem uma importante função, em razão do seu maior poder calorífico (LOUREIRO et al., 2011), justificando a utilização de cultivares ou clones de cana-de-açúcar com maior quantidade de biomassa lignocelulósica. Outro ponto importante para escolha da biomassa é o teor de cinzas presente na composição da biomassa, pois essa variável é importante para definir a viabilidade dos processos. A causa das cinzas são as incrustações de partículas inorgânicas nas superfícies dos equipamentos. Conforme JACOME (2014), as incrustações têm efeito negativo no processo e provocam: diminuição da eficiência térmica das superfícies de transferência de calor, aumento dos custos operacionais devido às paradas com fins de manutenção, degradação das superfícies por causa da corrosão, problemas de erosão, menor vida útil das caldeiras, entre outros.

2.4 Referências

ALLEN, L.H.; YOCUM, CS.; LEMON, E.R. Photosynthesis under field conditions. VII. Radiant energy exchanges within a corn canopy and implications in water use efficiency. **Agronomy Journal**, v. 36, p.253-259, 1964.

ALMEIDA, A. C. S.; et. al. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.

BARBOSA, G. V. D. S. **Contribuição do melhoramento genético da cana-de-açúcar para agroindústria canavieira de alagoas**. 2014. 113 f. Tese (Doutorado em produção vegetal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BARNES, A. C. **The sugar cane**. 2. ed. London: Leonar Hill Books, 1974. 572 p.

BISWAS, B.C. **Agroclimatology of the Sugar-Cane Crop**. Geneva Switzerland.: (Technical Bulletin),WMO, 1988, n. 703. 90p.

BLUNDEN, J. et al. State of the Climate in 2017. **Bulletin of the Amererican Meteorological Society**, v. 99, n. 8, 2018.

BONNETT, G.D.; et. al. Environmental stimuli promoting sucker initiation in sugarcane. **Field Crops Research**, v.92, p.219-230, 2005.

BOYSEN-JENSEN, P. Stoffproduktion der Pflanzen. 1932.

CASTRO, P. R. C. Utilização de reguladores vegetais no sistema de produção da cana-de-açúcar. In: Curso: Fisiologia vegetal aplicada à cana-de-açúcar. **STAB-Leste**, Maceió, p.7 –10, 2001.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Observatório agrícola. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Terceiro Levantamento. 2018. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em 06/01/2019.

DOAT, J. Le pouvoir valorifique des bois tropicaux. Bois et Forest des Tropiques, v.172, p. 33-55, 1977.

EPE/MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (a). **Resenha Energética Brasileira**. Exercício de 2016. 32f. Ed. JUN 2017. Brasília, 2017.

FERREIRA F. M, et al. (2007) Relações fenotípicas e genotípicas entre componentes de produção em cana-de-açúcar. **Bragantia**, 66: 527- 533.

FERREIRA JUNIOR, R. A. **Crescimento, eficiência no uso da radiação e energia de biomassa em cana-de-açúcar irrigada**. 2013. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. São Paulo.

FERREIRA JUNIOR, R. A. et al. Energy conversion efficiency in sugarcane under two row spacings in northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 741-747, 2015.

FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p 59-66, 1999.

GALLAGHER, J. N.; BISCOE, P. V. Radiation absorption, growth and yield of cereals. **Journal of Agricultural Science**. New York, v. 91, n. 1, p. 47-60, 1978.

GILBERT, R. A. et al. The effect of genotype, environment and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. **Field Crops Research**, v. 95, n. 2-3, p. 156-170, 2006.

GIRIO, F. M. et al. Hemicelluloses for fuel ethanol: A **review**. **Bioresource Technology** v. 101, p. 4775-4800, 2010.

GONÇALVES, J. E. Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. 2010.

HIPPS, L. E.; ASRAR, G.; KANEMASU, E. T. Assessing the interception of photosynthetically Active radiation in winter wheat*, **Agricultural and Meteorology**, 28 p. 253-259, 1983.

HIROSE, T. Development of the Monsi-Saeki Theory on Canopy Structure and Function. **Annals of Botany**. Senday, v. 95, n. 3, p. 483- 494, 2005.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field crops research**. v. 92, p. 185-202, 2005.

IRVINE, J.E.; BENDA, G.T.A. (1979) **Genetic potential and restraints in Saccharum as an energy source**. Symposium on Alternate Uses of Sugarcane for Development in Puerto Rico. San Juan, P.R. (26 Mar 1979).

JACOME, D. F. Caracterização físico-química das cinzas da palha de cana-de-açúcar através de análises térmicas simultâneas (STA). 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). São Paulo.

JENKINS, B.M. et al. Combustion properties of biomass. **Fuel processing technology**, v. 54, n. 1-3, p. 17-46, 1998.

KIM, M.; DAY, D. F. Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. **Journal of industrial microbiology & biotechnology**, v. 38, n. 7, p. 803-807, 2011.

KNOX, J. W. et al. A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. **Agricultural Systems**, v. 103, n. 2, p. 63-72, 2010.

KUNZ, J. H. et al. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.42, n.11, p.1511-1520, nov. 2007.

LAWLOR, D.W. Photosynthesis, productivity and environment. **Journal of Experimental Botany**, v.46, p.1449-1461, 1995.

LIMA, C. G. R. **Análise linear e espacial entre alguns atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar com o pH de um Argissolo Vermelho de Suzanópolis (SP)**. 2012. 101f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

LONG, S.P. et al. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? **Plant, Cell and Environment**, v.29, p.315-330, 2006.

LOOMIS, R. S.; CONNORS, D. J. **Crop ecology**: productivity and management in agricultural systems. Cambridge: Cambridge University, 1992. 550p.

LOUREIRO, M. E. et al. Sugarcane breeding and selection for more efficient biomass conversion in cellulosic ethanol. In: **Routes to cellulosic ethanol**. Springer, New York, NY, 2011. p. 199-239.

MACHADO, E. C. et al. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 44, n. 1, p. 229-238, 1985.

MACHADO, E.C. et al. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.17, p.1323-1320, 1982.

MATSUOKA, S. et. al. Bioenergia da Cana. In: **Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Álcool**. (Eds. Santos, F.; Borém, A. e Caldas, C.)2 ed.Viçosa: UFV, v.1. p 487-517, 2012.

MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F.; CALHEIROS, G. G. (1999) Hibridação em cana-de-açúcar. In: Borém A (ed) Hibridação Artificial de Plantas. Editora da UFV, Viçosa, pp 221-254.

McKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002a.

MING, R. et al. Sugarcane Improvement through Breeding and Biotechnology. In: JANICK, J. (ed). **Plant breeding reviews**. New York: John Wiley & Sons, Chap. 2, p. 15-118, 2006.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia no Mundo. Balanço Energético Nacional 2017 (ano base 2016)**. 42f. Ed. DEZ 2017. Brasília, 2017.

MONSI, M.; SAEKI, T. On the Factor Light in plant communities and its importance for matter production. **Annals of Botany**, London, v.95, p549-567, 2005.

MONSI, M.; SAEKI, T. The light factor in plant communities and its significance for drymatter production. **Japanese Journal of Botany**, Tokyo, v. 14, p. 22-52, 1953.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. Principles of environmental physics.,(Arnold: London). 1990.

MOORE, P.H.; MARETZKI, A. Sugarcane. In: ZAMSKI, E.; SCHAFFER, A.A. (Eds.) **Photoassimilate distribution in plants and crops**. New York: Marcel Dekker, 1996. p.643-669.

OGATA, B.H. **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias**. Dissertação. Universidade de São Paulo, ESALQ, 2014.

OLIVEIRA, SFDA. **Avaliação Energética Da Biomassa Do Bagaço De Cana De Açúcar Em Diferentes Indústrias Sucroenergéticas**. 2014. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado Profissional. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. São Paulo.

OTTMAN, M.J.; WELCH, L.F. Planting patterns and radiation interception, plant nutrient concentration, and yield in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 2, p. 167-174, 1989.

QURESHI, S. A.; MADRAMOOTOO, C. A.; DODDS, G. T. Evaluation of irrigation Scheme for sugarcane in Sindh, Pakistan, using SWP93. **Agricultural Water Management**, 2002, v.54, p.37–48.

RHODES, I. Relation ship between canopy structure and productivity in herbage grasses and its implications for plant breedings. **Herbage Abstracts**, v.43, p.129-133, 1973

ROBERTSON, M. J. et al. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**. Amsterdam, v. 64, p. 211-227, 1999.

ROSENBERG, Norman J. **Microclimate: the biological environment**. John Wiley & Sons, 1983.

SAEKI. T. Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. **Botanical Magazine**, 73:55- 63, 1960.

SHIBLES, R.M.; WEBER, C. R. Interception of solar radiation and dry matter production by various planting patterns. **Crop Science**. Madison, v. 6, n. 1, p. 55–59, 1966.

SILVA, A. P, M.; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, 2014.

SILVA, M. B.; SANTOS, M. A. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro**, p. 1-11, 2008.

SILVA, N. F. et. al. Distribuição de solutos em colunas de solo com vinhaça. **Irriga**, Botucatu Edição especial, p. 340-350, 2012.

SILVEIRA, L. C. I. **Melhoramento genético da cana-de-açúcar para obtenção de cana-energia**. 2014.84f. Tese (Doutorado em Agronomia/Produção Vegetal). Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2014.

SILVEIRA, L.C.I.; BRASILEIRO, B.P.; KIST, V, DAROS, E, PETERNELLI, L.A. (2015) Genetic diversity and coefficient of kinship among potential genitors for obtaining cultivars of energy cane. **Revista Ciência Agronômica**, 46: 358-368.

SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. Radiation use efficiency. **Advances Agronomy**, New York, v.65, p.215-265, 1999.

SINDAÇÚCAR. SINDICATO DA INDÚSTRIA DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL NO ESTADO DE ALAGOAS. Maceió. Disponível em: (<http://www.sindacucar-al.com.br/dadosestatisticos>). Acessado em 09 de junho de 2018.

SINGELS, A.; SMIT, M.A.; REDSHAW, K.A.; DONALDSON, R.A. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, v.92, p.249-260, 2005.

SINGH, P. N.; SHUKLA, S. K.; BHATNAGAR, V. K. Optimizing soil moisture regime to increase water use efficiency of sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid complex) in subtropical India. **Agricultural Water Management**, v. 90, n. 1–2, p. 95–100, 2007.

STEDUTO, P. et al. **Crop yield response to water**. Irrigation and Drainage Paper No. 66, FAO; Rome, 2012, 503p.

SUKHCHAIN D. S e SAINI G. S (1997) Inter-relationships among cane yield and commercial cane sugar and their component traits in autumn plant crop of sugarcane. **Euphytica**, 95: 109-114.

SUN, Y.; CHENG, J.Y. (2002) Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource Technology** 83:1-11

TAIZ, L.; ZEIGER, Eduardo. **Fisiologia vegetal**. Universitat Jaume I, 2006.

TEJERA, N.A.; et. al. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, v.102, p.64-72, 2007.

TEW, T. L.; COBILL, R. M. Genetic improvement of sugarcane (*Saccharum* spp.) as an energy crop. In: **Genetic improvement of bioenergy crops**. Springer, New York, NY, 2008. p. 273-294.

VILANI, M. T. et al. Estimativa da absorvância da radiação fotossinteticamente ativa de uma vegetação de transição floresta Amazônica-cerrado por três métodos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v. 15, n. 3, p. 289-298, 2007.

VIOLANTE, M. H. S. R. **Potencial de produção de cana-de-açúcar em áreas agrícolas marginais no Brasil**. 2012. 112f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia). Curso de Pós graduação em Economia, Escola de Economia de São Paulo, São Paulo, 2012.

WACLAWOVSKY, A. J. et al. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, v.8, p. 263-276, 2010.

YOCUM, CS.; ALLEN, L.H.; LEMON, E.R. Photosynthesis under Field conditions. VI. Solar radiation balance and photosynthesis efficiency. *Agronomy Journal*, **56**:249-253, 1964.

ZHU, X.G.; LONG, S.P.; ORT, D.R. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? **Current Opinion in Biotechnology**, v.19, p.153-159, 2008.

3. CAPÍTULO 1

3.1 COMPONENTES DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE CANA-ENERGIA EM CONDIÇÕES TROPICAIS

Resumo: O aumento do dióxido de carbono na atmosfera gera efeitos catastróficos para o planeta, então os países necessitam privilegiar fontes renováveis para melhor compor a matriz energética mundial, como a biomassa, que atendam a descarbonização da atmosfera. A radiação através da fotossíntese juntamente com água e dióxido de carbono é utilizada para produzir a biomassa. Para melhor entendimento da radiação solar interceptada pela planta é necessário conhecer o índice de área foliar e coeficiente de extinção da cultura, na literatura ainda não possui trabalhos para cana-energia. O objetivo do presente trabalho foi determinar os componentes de crescimento e produção de biomassa de cana-energia, em comparação com cana-de-açúcar. Foi conduzido um estudo experimental composto por 7 genótipos de cana-energia e um genótipo de cana-de-açúcar. O delineamento experimental foi blocos casualizados, com três repetições. A radiação fotossinteticamente ativa interceptada foi calculada levando-se em consideração o índice de área foliar, a radiação fotossinteticamente ativa incidente e o coeficiente de extinção da luz. Aos 147 dias após o transplântio os genótipos de cana-energia apresentaram, em média, 93% do fechamento do dossel, com índice de área foliar de 2,64, enquanto a RB92579 apresentou 89%, com índice de área foliar de 2,22. O rendimento máximo de biomassa seca dos genótipos de cana-energia variou de 34,3 a 51,9 t ha⁻¹ e a RB92579 foi de 27,8t ha⁻¹. O coeficiente de extinção de luz foi em média 0,88 para cana-energia e 0,75 para cana-de-açúcar. A eficiência no uso da radiação foi de 1,77 g MJ⁻¹ para RB92579 e 2,28 g MJ⁻¹, em média para os genótipos de cana-energia. A RB92579 apresentou valores mais elevados para as variáveis tecnológicas de sólidos solúveis, açúcares redutores totais, açúcares recuperáveis totais e pureza do caldo, mas para produção de biomassa os genótipos de cana-energia mostraram-se mais eficiente de que a RB92579.

Palavra Chave: variáveis de crescimento e produção, coeficiente de extinção de luz e eficiência no uso da radiação.

COMPONENTS OF BIOMASS PRODUCTION OF SUGARCANE IN TROPICAL CONDITIONS

Abstract: Increasing carbon dioxide in the atmosphere has catastrophic effects on the planet, so countries need to prioritize renewable sources to better compose the world's energy matrix, such as biomass, to meet the decarbonization of the atmosphere. Radiation through photosynthesis along with water and carbon dioxide is used to produce biomass. For a better understanding of the solar radiation intercepted by the plant it is necessary to know the leaf area index and crop extinction coefficient, in the literature there are no studies for energy cane. The objective of the present work was to determine the growth and biomass production components of sugarcane compared to sugarcane. An experimental study consisting of 7 energy cane genotypes and one sugar cane genotype was conducted. The experimental design was randomized blocks with three replications. The intercepted photosynthetically active radiation was calculated taking into consideration the leaf area index, the incident photosynthetically active radiation and the light extinction coefficient. At 147 days after transplanting, the sugarcane genotypes presented, on average, 93% of canopy closure, with leaf area index of 2.64, while RB92579 presented 89%, with leaf area index of 2.22. The maximum dry biomass yield of the sugarcane genotypes ranged from 34.3 to 51.9 t ha⁻¹ and the RB92579 was 27.8 t ha⁻¹. The light extinction coefficient averaged 0.88 for energy cane and 0.75 for sugar cane. Efficiency in the use of radiation was 1.77 g MJ⁻¹ for RB92579 and 2.28 g MJ⁻¹ on average for the sugarcane genotypes. The RB92579 presented higher values for the technological variables of soluble solids, total reducing sugars, total recoverable sugars and broth purity, but for biomass production the sugarcane genotypes were more efficient than RB92579.

Keywords: growth and production variables, extinction coefficient of light and efficiency in the use of radiation.

3.1.1 Introdução

A elevada capacidade de produção de biomassa faz da cana-de-açúcar uma das principais alternativas para diversificar a produção de energia, já que reduz a dependência de combustíveis fósseis, além de mitigar as emissões de gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera. O interesse em produzir cana-de-açúcar no mundo tem aumentado as pesquisas que visam melhor compreender a influência do ambiente sobre seu crescimento e desenvolvimento (McKENDRY, 2002).

A cana-de-açúcar se destaca na produção de biomassa pelas suas características fisiológicas de ser uma planta de mecanismo C4, responsável pela alta eficiência fotossintética, longo período vegetativo e alta taxa de acúmulo de biomassa (MING et al., 2006; TEW e COBILL, 2008). Pelo elevado acúmulo de biomassa, associado ao longo ciclo da cultura, a cana-de-açúcar, com melhoramento focado em produção de fibra, tem potencial de alterar a matriz energética global, principalmente onde se concentra a maior produção (MATSUOKA et al. 2012).

O potencial produtivo da cana-de-açúcar é conhecido por 381 toneladas de massa verde por hectare (TMVH) em condições ótimas (WACLAWOVSKY et al., 2010), dados comprovam o rendimento comercial de 260 t ha⁻¹ em 13 meses, na fazenda Agrovale na Bahia e 299 t ha⁻¹ foi registrado na fazenda Busato, Bom Jesus da Lapa, na Bahia, mas a produtividade média do Brasil não chega a 25% do rendimento potencial da cultura (72,5 TMVH, safra 2017/2018) CONAB, (2018).

O rendimento potencial da cultura é influenciado pelo manejo agrônômico como, o uso de variedades responsivas a diferentes ambientes de produção, manejo adequado do solo, uso de resíduos agroindustriais, manejo de irrigação e aplicação racional de fertilizantes e corretivos entre outros manejos (LEITE et al., 2011). O crescimento e desenvolvimento da cultura também dependem das condições ambientais de cultivo (TOPPA et al., 2010). Se todas as exigências ambientais e de manejo forem atendidas para a cultura o rendimento potencial da mesma pode ser influenciado basicamente pela radiação fotossinteticamente ativa.

Os principais parâmetros utilizados nos estudos de interceptação de radiação no dossel vegetativo envolvem índice de área foliar e coeficiente de extinção de luz (k) (SHIBLLES e WEBER, 1966; GALLAGHER e BISCOE, 1978; SILVA e COSTA, 2012), e em determinados casos, esses parâmetros definem a produção potencial da cultura (FAGAN et al., 2013). Neste sentido, o presente trabalho objetivou determinar os

componentes de crescimento e de produção de biomassa de cana-energia, em comparação com cana-de-açúcar.

3.1.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido na área comercial da empresa GranBio na Fazenda Roqueira, região de Teotônio Vilela-AL (09°55'35"S; 36°17'03"W; 124 m) numa área de aproximadamente 1,0 hectare (ha). O solo da área foi classificado como argissolo-amarelo distrófico abrupto coeso de textura franco argilo arenoso, e declividade inferior a 2%. A capacidade de água disponível (CAD) e a densidade do solo média, na camada de 0 a 60 cm de profundidade, são de 55,73 mm e 1,48 g cm⁻³, respectivamente.

De acordo com a média histórica de 1978 a 1991, o clima da região é caracterizado, pela classificação de THORNTHWAITE (1948), como megatérmico (A') subúmido seco (C1), com pequeno ou nenhum excesso de água (d), com concentração de 41,5% da evapotranspiração de referência (ET₀) no período de dezembro a março. Conforme a climatologia desse período, a chuva (P) anual é 1.076 mm, com concentração de 58% nos meses de abril a julho, caracterizando a má distribuição hídrica ao longo do ano. Nesse período ocorrem menores temperaturas e consequentemente a menor evapotranspiração de referência, enquanto nos demais meses ocorre o inverso (Figura 2) (Dados coletados na Usina Seresta, região de Teotônio Vilela, nas coordenadas Geodésicas (9°41'S; 36°20'W; 153m), cedidos pelo Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia, CECA, UFAL).

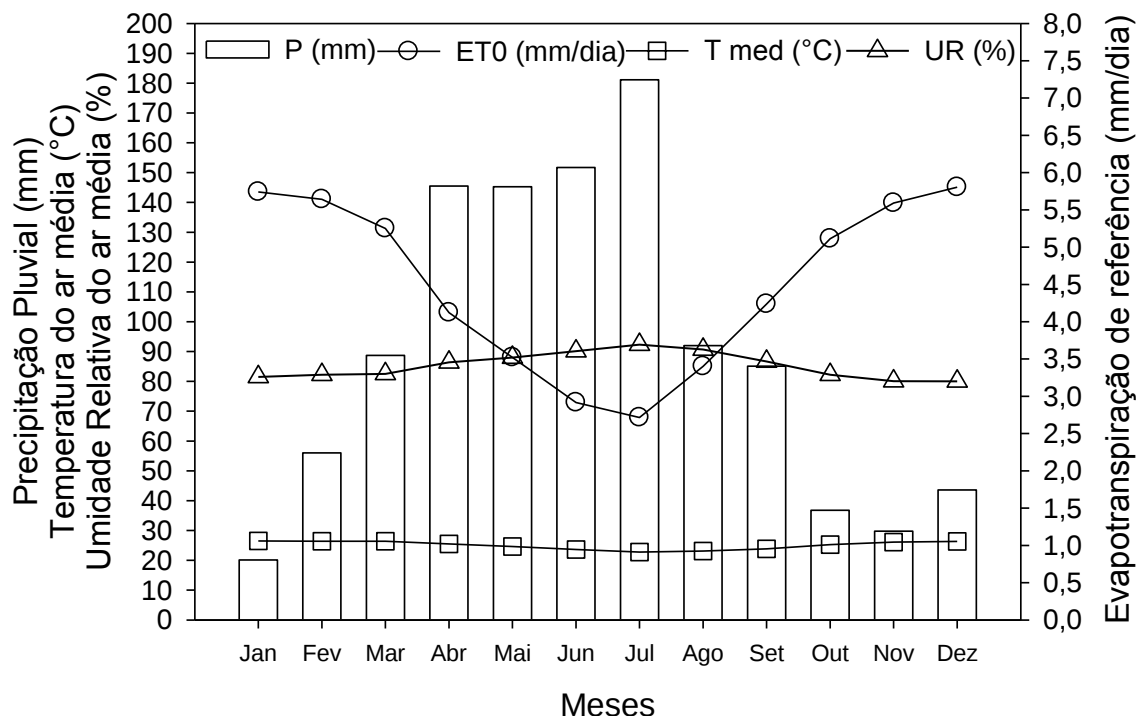
O plantio das gemas ocorreu 06/12/2015, em tubete com substrato, em casa de vegetação e aos 60 dias (04/02/2016) após o plantio foi realizado o transplante por meio de mudas pré-brotadas (MPB), na área do experimento. O espaçamento entre mudas foi de 0,70 m e entrelinhas foi combinado (0,90 x 1,50 m). No talhão onde instalou o experimento não foi necessário o uso de calagem, pois o mesmo já tinha sido corrigido a acidez do solo e realizado o fornecimento de cálcio, magnésio e enxofre, através da calagem com calcário mix (70% calcário dolomítico e 30% de gesso agrícola), conforme mostrou o resultado da análise química do solo (Tabela 1). O preparo de solo consistiu em duas gradagens pesadas, mais uma gradagem intermediária seguida de subsolagem. A adubação de fundação foi realizada no sulco de plantio com 50 kg ha⁻¹ de nitrogênio, mais 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 50 kg ha⁻¹ de K₂O. Para o controle das plantas daninhas foi aplicado 1.440 g ha⁻¹ do ingrediente ativo de Metribuzina mais

120 gha⁻¹ do ingrediente ativo de Mesotriona. Acultura foi irrigada por aspersão conforme a lâmina de projeto da fazenda da GranBio, através do sistema de irrigação deslocamento linear móvel, o projeto de irrigação da fazenda aplica 60 mm, no turno de rega de 15 dias, aplicando 120 mm mensais.

Tabela 1. Resultados da análise química e física do solo da área experimental, nas profundidades de 0 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m.

Determinações	Resultados (0- 0,20 m)	Resultados (0,20- 0,40 m)	Resultados (0,40- 0,60 m)
pH (em água)	6,40	6,60	5,70
P (mg DM ⁻³)	48,00	39,00	22,00
K (mg DM ⁻³)	17,00	24,00	15,00
Ca + Mg (meq/100mL)	3,30	3,00	1,40
Ca (meq/100mL)	2,20	1,50	1,00
Mg (meq/100mL)	1,10	0,50	0,40
Al (meq/100mL)	0,00	0,01	0,04
H + Al (meq/100mL)	0,70	2,10	2,60
S (Soma das Bases)	3,41	2,19	1,53
C.T.C. (Cap. Troc. de Cátions - pH 7,0)	4,11	4,29	4,13
% V (Ind. de Sat. de Bases)	83,00	51,10	37,10
% M (Ind. Sat. de Al)	0,00	0,50	2,50
Mat. Org. Total (g/Kg)	17,60	16,30	15,70
Granulometria (%)	Resultados (0- 0,20 m)	Resultados (0,20- 0,40 m)	Resultados (0,40- 0,60 m)
Areia Grossa (g/Kg)	334	367	316
Areia Fina (g/Kg)	288	327	297
Areia Total (g/Kg)	622	694	613
Silte (g/Kg)	254	203	222
Argila (g/Kg)	124	103	166
Classe Textural	Franco Arenosa	Franco Arenosa	Franco Arenosa
MÉTODO EMBRAPA; EXTRAÇÃO: Água (pH); Mehlich (P, K, Na, Fe, Cu, Zn, Mn); KCl 1N (Ca, Mg e Al); Acetato de Cálcio pH 7,0 (H + Al); Água			

Figura 2. Dados climatológicos da região de Teotônio Vilela-AL, no período de 1978 a 1991. Dados cedidos pelo Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia, CECA, UFAL, coletados na Usina Seresta, nas coordenadas Geodésicas (9°41'S;36°20'W;153m).



O campo experimental foi composto por 7 genótipos de cana-energia (VX12-1744, VX13-0222, VX13-0805, VX13-2325, VX13-3132, VX13-3450 e VX13-3714) e uma cultivar de cana-de-açúcar (RB92579). A pesquisa deu prioridade aos genótipos de cana-energia da sigla VX (Vertex), da empresa GranBio e a variedade de cana-de-açúcar mais cultivada do Nordeste, RB92579 (RIDESA, 2018). O delineamento experimental foi blocos casualizados, com três repetições. As parcelas foram constituídas de 6 linhas com 10 metros. Os genótipos utilizados de cana-energia pertencem a fase experimental da seleção de melhoramento genético da empresa, em que seis são clones em desenvolvimento e uma variedade de cana-energia já lançada. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa SISVAR submetendo-se os dados a análise de variância, a 5% de probabilidade e posteriormente foi realizada a comparação de média pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para as variáveis de produção em função dos graus dias acumulado foi realizado a regressão para obter a informação da melhor época para colheita e qual o melhor ajuste para a variável de cada genótipo. Os coeficientes das equações foram submetidos ao teste t, ($p \leq 0,05$).

As análises de crescimento foram realizadas mensalmente a partir de dez plantas marcadas nas duas linhas centrais de cada parcela, sorteadas logo após o transplântio.

As variáveis de crescimento analisadas foram: Altura de planta (AP), índice de área foliar (IAF), diâmetro do colmo (DC) e perfilhamento (PERF). A biomassa verde (BV) e biomassa seca (BS) foram analisadas bimestralmente até os 361 dias após o transplântio (DAT), quando ocorreu a colheita. Para determinação da BV e BS foram contados o número de perfilhos em 20 metros (2 linhas centrais de 10 metros), para determinar a quantidade dos perfilhos por hectare e posteriormente foram cortadas e pesadas três touceiras por parcela para determinar a BV média por perfilho. Para determinar a BS o material vegetal foi identificado e levado a estufa a 65 °C com ventilação forçada até que a massa de todas as partes da planta apresente valor constante (PEREIRA; MACHADO, 1987; BENINCASA, 1988; FERNANDES, 2003). A produção de biomassa verde e seca foi realizada multiplicando a densidade da biomassa (verde ou seca) pela quantidade de perfilho por hectare, conforme BOSCHIERO et. al, (2019).

O IAF foi medido por meio do equipamento LAI-2000, ao pôr do sol, para evitar radiação direta no equipamento. As leituras foram realizadas com a tampa de 180° em quatro repetições em cada espaçamento alternado (0,90 e 1,50 m) dentro da parcela avaliada, sempre nas fileiras centrais e nos três blocos avaliados, totalizando 16 medidas em cada tratamento. A metodologia do equipamento consiste numa imagem hemisférica em cima e abaixo do dossel calculando o coeficiente de transmissão do dossel, através de imagem de cinco ângulos simultâneos. O equipamento fornece as variáveis de índice de área, ângulo foliar e cobertura solo (LI-COR, 1992; ZHANG, CHEN e MILLER, 2005).

As variáveis indústrias foram: brix, fibra, pureza do caldo, umidade da biomassa, açúcares redutores totais (ART) e açúcares totais recuperados (ATR) foram determinadas a partir de 300 gramas da BV, após ser passada na forrageira de acordo com a metodologia descrita por FERNANDES (2003).

Todas as variáveis de crescimento e tecnológicas foram analisadas em função dos graus-dia acumulados (GDA). Os GDA foi determinado a partir da Equação 1. A temperatura-base inferior utilizada neste trabalho para massa integral foi 10 °C (INMAN-BAMBER, 1994; SINCLAIR et. al, 2004; SMIT e SINGELS, 2006, FERREIRA JÚNIOR et al., 2015).

$$GDA = \sum_{i=1}^n (T_{med,i} - T_b) \quad (1)$$

em que: T_m ($^{\circ}\text{C}$) é a temperatura do ar média do dia i ($^{\circ}\text{C}$), representada pela temperatura do ar máxima mais temperatura do ar mínima dividido por 2; e T_b ($^{\circ}\text{C}$) é a temperatura basal.

Essas variáveis de crescimento foram ajustadas a modelos para estimar o crescimento diário e a taxa de crescimento da cultura. O modelo logístico foi utilizado para descrever a BV, BS, CC e a AP (LYRA et al., 2008; LYRA et al., 2010a; BATISTA et al., 2013) Equação 2.

$$w = \frac{a_2}{1 + (a_2/a_1 - 1)\exp(-a_3 \sum \text{GDA})} \quad (2)$$

em que: a (cm) é a variável de crescimento (AP, BV, CC ou BS); a_1 e a_2 (cm) correspondem, a AP, CC, BV, ou BS inicial e final do ciclo da cultura, respectivamente; a_3 ($\text{m m}^{-1}\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) é a taxa máxima de crescimento relativo; e $\sum \text{GDA}$ representa o somatório de energia térmica disponível no período de crescimento;

O modelo log normal de três parâmetros foi ajustado à variável IAF em função de GDA (SOUZA et al., 2012; FERREIRA JUNIOR et al., 2012; FERREIRA JUNIOR et al., 2014) Equação 3 :

$$\text{IAF} = a_1 \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln(\sum \text{GDA}/a_2)}{a_3} \right)^2 \right] \quad (3)$$

em que: a_1 é a amplitude de y (IAF), a_2 é o grau de decaimento da variável y e a_3 é o valor de x (GDA) no qual y é máximo.

O diâmetro do colmo e o perfilhamento foram relacionados com GDA e ajustados em função do modelo sigmoidal de Boltzmann (FERREIRA JUNIOR et al., 2014) Equação 4.

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(\sum \text{GDA} - X_0)/dx}} + A_2 \quad (4)$$

em que, A_1 e A_2 correspondem, ao valor inicial e final do ciclo da cultura (y), GDA é a variável independente, X_0 é o ponto de inflexão, ou seja, valor da ordenada x (GDA) que corresponde ao valor médio de y (X_0 , $(A_1 + A_2)/2$), e o dx é o coeficiente de ajuste, ou seja, indica o grau de incremento de y em função do aumento de GDA.

As variáveis meteorológicas foram obtidas por uma estação agrometeorológica automática auxiliar, instalada na área do experimento, cedida pelo Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia (LIA), do CECA-UFAL. Foram medidas os seguintes elementos meteorológicos: temperatura e umidade relativa do ar, precipitação pluvial,

irradiância solar global (R_g , $W\ m^{-2}$) na faixa espectral de 305 a 2800 nm, velocidade do vento. Com exceção do pirômetro que armazenava média a cada 1 minuto, as demais medidas foram efetuadas a cada 10 segundos e armazenadas a cada 10 minutos, através de um sistema de aquisição automática de dados (*datalogger*). De posse de todas as variáveis necessárias foi calculada a evapotranspiração de referência (ET_0 , mm) pelo modelo proposto de Penman-Monteith parametrizado para uma cultura hipotética (ALLEN et al., 1998). A evapotranspiração da cultura (ET_c , mm) foi determinada pelo método do coeficiente da cultura único (K_c) proposto no boletim FAO 56 multiplicado pela evapotranspiração de referência. Os coeficientes da cultura foram ajustados previamente com as condições meteorológicas do local e da cultura (K_c inicial: 0,40; intermediária: 1,25. Final 0,75) (ALLEN et al., 1998).

O armazenamento de água no solo (ARM, mm) foi calculado diariamente utilizando o balanço hídrico sequencial do solo, de acordo com a metodologia de THORNTHWAITE e MATTER (1955) adaptado por LYRA et al. (2010b), conforme LYRA et al. (2014). As simulações do balanço hídrico iniciaram no dia do transplântio até o dia da colheita. Para o balanço hídrico a CAD foi calculada em função do crescimento radicular, o inicial foi igual a profundidade da cova onde ocorreu o transplântio (30 cm), em seguida o sistema radicular foi interpolado para todo o ciclo da cultura, em função da variação do coeficiente da cultura nas fases inicial e de crescimento como sugerido por ALLEN et al. (1998). A água facilmente disponível (AFD) foi calculada como $AFD = f\ CAD$, em que f é o fator de disponibilidade de água considerado igual a 0,60 (ALLEN et al., 1998).

A irradiância solar fotossintética ativa (RFA, $W\ m^{-2}$) foi estimada através da fração da irradiância solar global (R_g , $W\ m^{-2}$) conforme FERREIRA JUNIOR (2013). Para os valores diários de irradiação solar global (H_g , $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) e irradiação solar fotossintética ativa (HFA, $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) foi realizada a integração dos valores instantâneos de R_g e RFA. As medições de irradiância solar fotossintética transmitida (R_{f_T} , $W\ m^{-2}$) foram medidas em duas repetições para cada parcela, em sete pontos de crescimento, das 10:00 às 14:00 horas, em dias com céu claro, com o sensor linear quantum (LI-191SA). Estas medidas foram realizadas na diagonal da linha da cultura, a fim de ajustar o sensor linear na entrelinha (MONTEITH, 1993; MADDONNI, OTIGUI e CIRILO, 2001). Os dados do sensor linear foram calibrados em relação um sensor Quatum (Li-190SA, Li-COR). Para obtenção das densidades de fluxo de fótons fotossintéticos ($\mu mol\ s^{-1}\ m^{-2}$) e a conversão para irradiância fotossintética ($W\ m^{-2}$) foi

considerado que 1 W m^{-2} é igual a $4,6 \text{ } \mu\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (MANUAL DA LI-COR, 1991). Valor semelhante foi encontrado por McCREE, (1972).

O coeficiente de extinção de luz (k) foi estimado pela relação da fração da luz transmitida (fRf_T) com o IAF, por meio de equações exponenciais (JONES e KINIRY, 1986; FLENET et al., 1996). A fRf_T foi definida como a razão da Rf_T pela RFA. O IAF foi medido por meio do equipamento LAI-2000, após as medidas de Rf_T , ao pôr do sol, para evitar radiação direta no equipamento. As leituras foram realizadas em quatro repetições em cada espaçamento alternado (0,90 e 1,50 m) dentro da parcela avaliada, sempre nas fileiras centrais e nos dois blocos avaliados, totalizando 16 medidas em cada tratamento. Desta forma k foi estimado de acordo com a Equação (5):

$$k = \left(\frac{-\ln(fRf_T)}{IAF} \right) \quad (5)$$

em que, fRf_T é a fração de irradiância fotossintética transmitida.

A transmitância atmosférica ou índice de claridade (K_t) diária foi calculado pela relação entre a irradiação solar global (H_g) e a irradiação solar no topo da atmosfera (H_a), e o resultado foi classificado conforme (IQBAL, 1983), em que $K_t \geq 0,7$ considera céu claro, K_t entre 0,3 e 0,7 céu parcialmente nublado e quando $K_t \leq 0,3$ o dia considera céu nublado. A H_a foi calculado de acordo com a metodologia de ALLEN et al. (1998).

A percentagem da cobertura da superfície do solo foi estimada pela fração de irradiância fotossintética interceptada ($1 - \exp(-k \text{ IAF})$) pelo dossel da cultura, conforme o modelo de ADAMS e ARKIN (1977).

A eficiência do uso da radiação (EUR) foi determinada para irradiação fotossintética interceptada (Hf_Int), HFA e H_g , por meio da regressão linear, forçada a passar pela origem, pela relação entre a biomassa seca da parte aérea acumulada e as respectivas irradiação acumulada em cada data de amostragem (MONTEITH, 1977). As amostras de BV e BS foram realizadas em seis épocas de crescimento até a colheita. A irradiação fotossinteticamente interceptada no decorrer do ciclo pelo dossel em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ foi calculada baseada na lei de Beer de acordo com a metodologia de HIPPS, ASRAR e KANEMASU (1983) Equação (6):

$$Hf_{Int} = HfA(1 - \exp(-k \times IAF)) \quad (6)$$

em que, HFA é a irradiação fotossinteticamente incidente em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

3.1.3 Resultados e Discussão

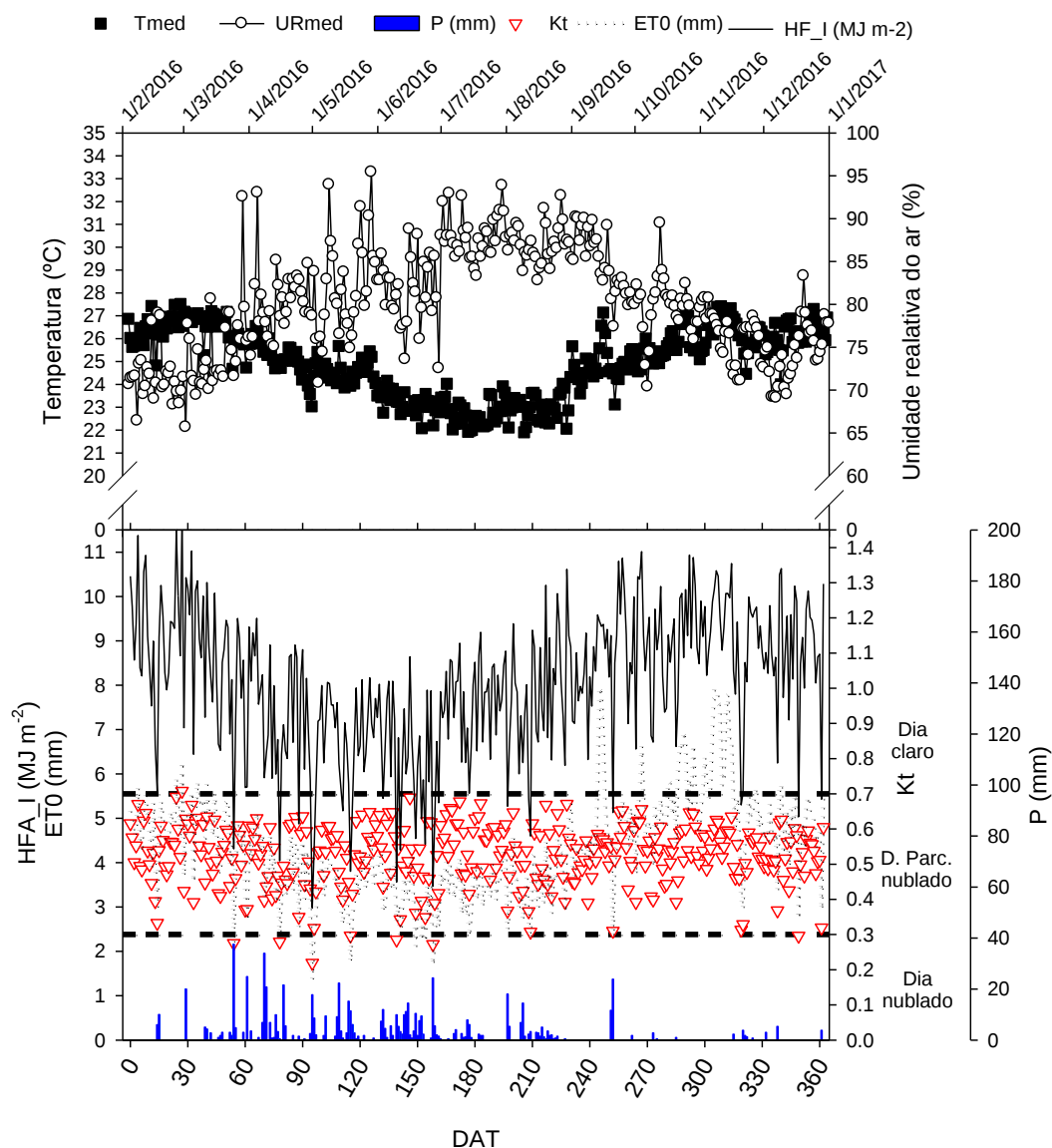
A temperatura média do ar (T_{med}) durante o ciclo da cultura variou de 22,82 a 27,54 °C, nos meses de agosto e março, na mesma ordem, enquanto a mínima e a máxima da temperatura do ar alcançou valores de 16,78 e 35,43 °C, nos meses de julho e outubro, respectivamente. A umidade relativa do ar média (UR_{med}) apresentou média durante o ciclo de 79,53%, com mínima e máxima de 71,64 e 88,05%, nos meses de fevereiro e julho (Figura 3). Os dados de cultivo foram semelhantes aos dados climatológicos (1971 a 1998), na região de Teotônio Vilela, conforme a Figura 2 janeiro, fevereiro e março são os meses de maior temperatura do ar e julho, agosto e setembro são os meses que apresentaram menor temperatura do ar média. Apesar da temperatura do ar exercer influência no metabolismo das plantas, a temperatura durante o ciclo não foi um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento do vegetal. De acordo com EBRAHIM et al. (1998) e GUERRA et al. (2014) apenas temperaturas abaixo de 15°C provocam redução no número e comprimento dos entrenós e consequentemente redução do acúmulo de biomassa.

O acúmulo máximo de irradiação fotossintética incidente mensal (HFA) (280,36 MJ m⁻²) ocorreu no mês dezembro e o mínimo (204,69 MJ m⁻²) em maio. A média diária foi de 8,05 MJ m⁻² dia⁻¹, com mínima de 2,98 MJ m⁻² dia⁻¹ e máxima de 11,77 MJ m⁻² dia⁻¹. A irradiação fotossintética incidente mínima ocorreu em maio no dia que houve 17,78 mm de precipitação pluvial (P), da mesma forma que os maiores valores de irradiação fotossintética incidente ocorreram nos dias em que não houve chuva. Porém, durante 10 dias houveram chuvas superiores a 20,00 mm e a HFA variou de 3,47 a 10,42 MJ m⁻² dia⁻¹, mostrando mais energia disponível para as plantas. No dia que houve a maior chuva (37,59 mm), houve o acúmulo de 4,39 MJ m⁻² dia⁻¹ de energia solar na faixa fotossintética. Essa chuva certamente ocorreu no período noturno e não contribuiu para diminuir a energia disponível para as plantas ao valor mínimo como ocorreu no dia que choveu 17,78 mm.

A total P no ciclo foi de 711,39 mm, 34% inferior a média climatológica. Houve 146 dias de chuva com média de 4,87 mm dia⁻¹, ou seja, choveu apenas 40% do ciclo total (362 dias). Aproximadamente 73% das chuvas ocorreram entre abril e agosto, com o mês de abril que apresentou 145,80 mm, enquanto novembro choveu apenas 4,57 mm. De uma forma geral, a HFA apresentou tendência inversamente proporcional a precipitação pluvial da região. O que substantia a hipótese de que as precipitações

ocorreram mais no período diurno. De acordo com a transmitância atmosférica (kt), durante todo o ciclo houve apenas 1 dia, com coeficiente maior que 0,7, caracterizando o dia com céu claro, 7 dias de nublados e 354 dias com céu parcialmente nublado. O dia claro ocorreu em março (Figura 3).

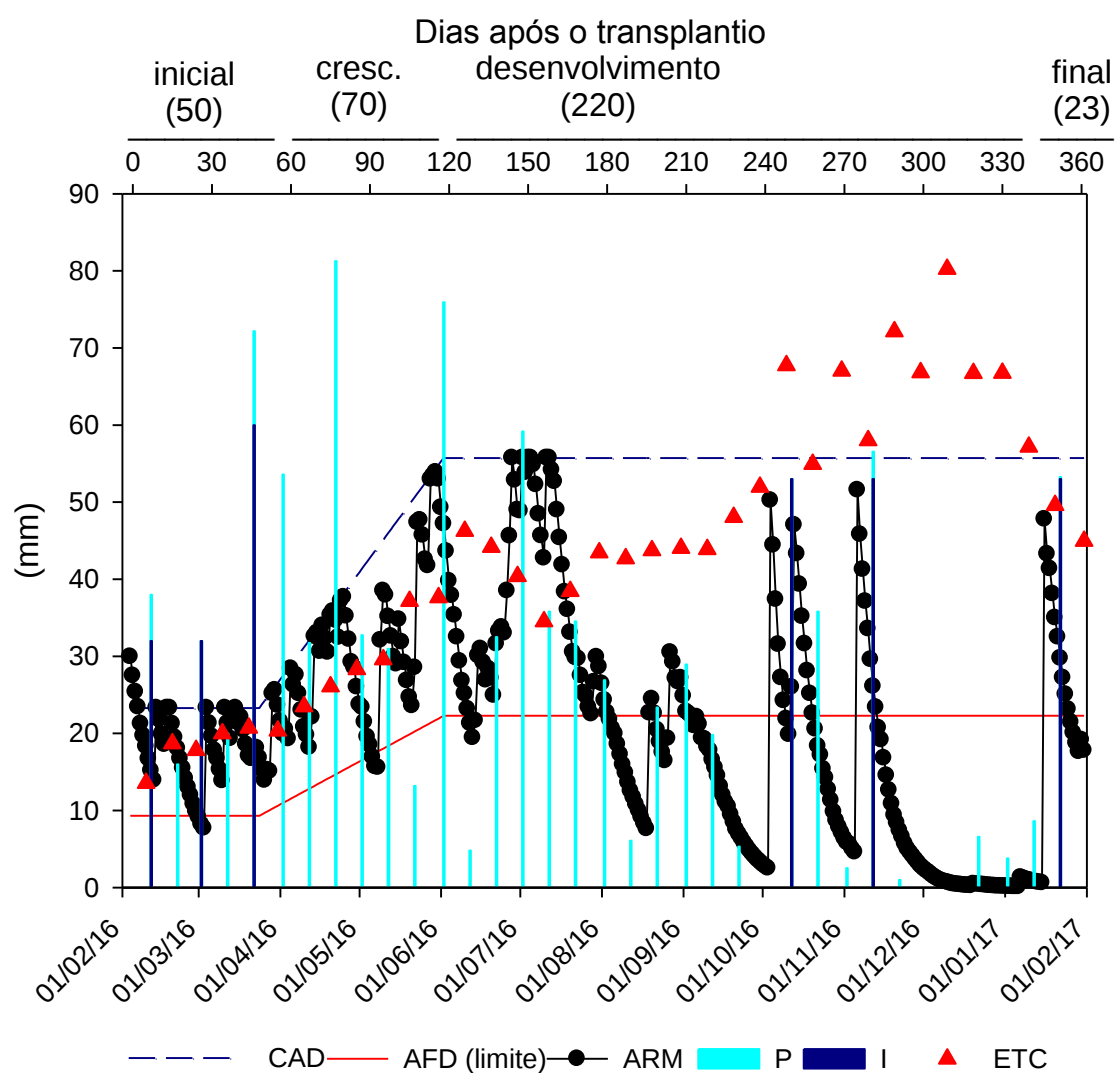
Figura 3. Elementos meteorológicos: temperatura média do ar (Tmed), umidade relativa média do ar (URmed) e precipitação pluvial (P), irradiação fotossintética incidente (HFA) e evapotranspiração de referência (ET0), durante o cultivo de cana-de-açúcar.



As plantas poderiam ter expressado seu rendimento potencial com mais energia absorvida para realizar fotossíntese e sem estresse hídrico, isso seria possível se a maioria do ciclo tivesse dias de céu claro e chuvas no período noturno ou fornecimento de água através da irrigação. A evapotranspiração da cultura total no ciclo foi de 1.567 mm, com pico de 80,2 mm, no primeiro decêndio de dezembro. O valor médio diário

durante o ciclo foi de 4,3 mm, com máximo de 9,6 mm e mínimo de 1,0 mm. Como a disponibilidade hídrica no ciclo foi de 1.000 mm, dividido em 289 mm de irrigação e 711 de chuva, ocorreu déficit hídrico de, aproximadamente, 800 mm durante o ciclo e excesso de 219 mm. Ocorreu excesso de água no solo devido a pancadas de chuva superior a CAD do solo. O déficit hídrico é notado a partir de agosto quando o armazenamento de água no solo fica inferior ao intervalo de água facilmente disponível, pois as chuvas que houve não foram suficientes para suprir a demanda hídrica da cultura, isso ocorreu na fase do desenvolvimento do vegetal (Figura 4).

Figura 4. Balanço hídrico sequencial do cultivo com capacidade de água disponível (CAD), intervalo de água facilmente disponível (AFD), armazenamento de água no solo (ARM), em escala diária e precipitação pluvial (P), irrigação (I) e evapotranspiração da cultura (ETC) por decêndio, durante o cultivo de cana-energia e cana-de-açúcar na região de Teotônio Vilela em Alagoas.

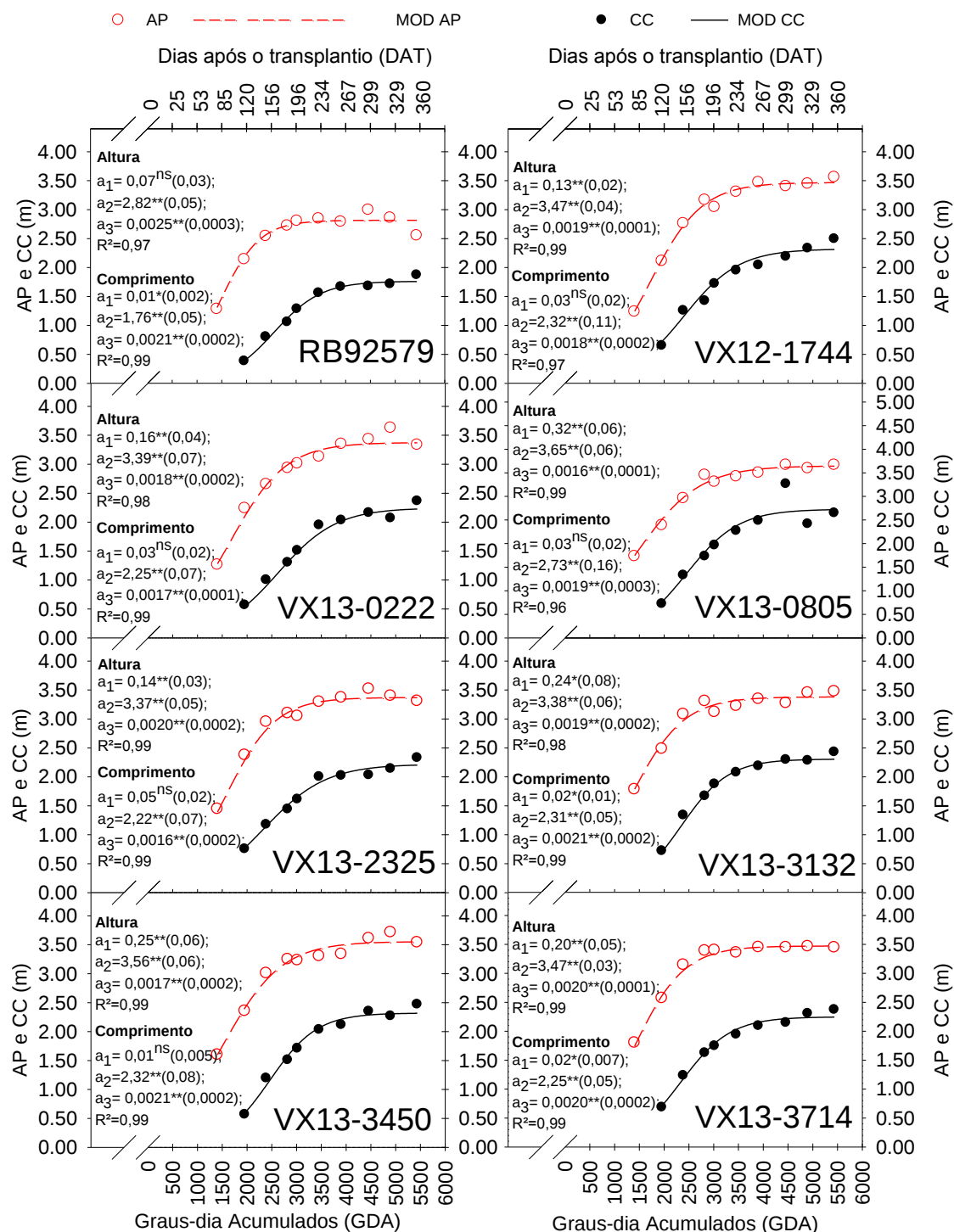


A altura de planta (AP) e o comprimento do colmo (CC) apresentaram ajustes elevados para coeficiente de determinação entre 96 e 99%, pelo modelo logístico. Os parâmetros relacionados com crescimento final e taxa relativa máxima de crescimento todos foram significativos ao nível de $p < 0,01$, pelo teste t, para todos os genótipos avaliados. Conforme o modelo, a RB92579 apresentou AP e CC máximo de 2,82 e 1,76 m, respectivamente. A altura de planta média entre os genótipos de cana-energia foi de 3,47 m, com mínima de 3,37 m (VX13-2325) e máxima de 3,65 m para o genótipo VX13-0805 (Figura 5). O CC entre os genótipos de cana-energia variou de 2,22 a 2,73 m, com a mesma relação da AP para os genótipos VX13-2325 e VX13-0805, com a média dos clones de cana-energia de 2,34 m, aproximadamente 25% superior da RB92579.

Na colheita do experimento houve o acúmulo de 5.436 graus-dia acumulado (GDA) e o ocorreu aos 361 DAT. De acordo com os dados simulados a variedade de cana-de-açúcar (RB92579) alcançou 91% (2,56 m) da AP máxima aos 2.391 GDA (154 DAP), enquanto que na média entre os genótipos de cana-energia foi de 83%, no mesmo período, com destaque para o material VX13-3714 que apresentava 88% da sua AP máxima, com 3,05 m. Todos os genótipos alcançaram a altura máxima aos 3.907 GDA (266 DAP). Aos 4460 GDA (301 DAT) tanto a RB92579, como os genótipos de cana-energia, apresentavam média de 98% do CC máximo de 1,76 m para RB92579 e 2,34 m para os genótipos de cana-energia, após esse período o incremento do comprimento do colmo foi muito baixo, em torno de 3 cm para RB92579 e 4 cm para os genótipos de cana-energia.

De acordo com análise de variância as variáveis: AP, CC, DC e PERF, na colheita, foram significativos ao nível de 1% de probabilidade de erro, para os genótipos avaliados, com os respectivos coeficientes de variação, 4,06%, 5,80%, 10,62% e 6,34%, esses valores conferem elevada precisão experimental (Tabela 2). Conforme o teste de Tukey ($p < 0,05$), a RB92579 apresentou a menor AP (2,56 m) e diferiu dos demais genótipos de cana-energia. Os clones de cana-energia não apresentaram diferença significativa entre si. O CC apresentou resultados similares à AP em que a RB92579 apresentou o menor valor (1,87 m) e diferiu de todos os genótipos de cana-energia e eles não apresentaram diferença pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) entre si (Tabela 3).

Figura 5. Altura de planta (AP) e comprimento de colmo (CC) para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulado (GDA) em condições tropicais, ajustados pelo modelo logístico com seus respectivos parâmetros.



Notas: ns, o parâmetro não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$; **, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e *, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$.

Tabela 2. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de genótipos de cana para as variáveis de crescimento, na colheita: Altura de plantas (AP), comprimento do colmo (CC), diâmetro do colmo (DC) e perfilhos por metro (PERF).

FV ¹	GL ²	AP	CC	DC	PERF
Genótipos	7	0,36**	0,15**	18,58**	98,21**
Blocos	2	0,03	0,19	1,15	6,51
Resíduo	14	0,02	0,02	3,50	1,87
CV (%)		4,06	5,80	10,62	6,34
Média geral		3,36	2,37	17,61	21,57

Notas:^{ns}Não significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; **Significativo a $p < 0,01$ pelo teste F; *Significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

De forma geral, observou-se que os genótipos alcançaram o pico da altura das plantas entre 2.391 GDA (154 DAT) a 2.824 GDA (188 DAT), já para comprimento do colmo foi no intervalo de 3.907 GDA (266 DAT) a 4.460 GDA (301 DAT). Conforme os dados ajustados pelo modelo logístico notam-se o alongamento máximo do palmito até os 188 DAT e, logo após esse período, a formação dos entrenós começa a intensificar até os 301 DAT, com observação de um período sempre maior de crescimento para os genótipos de cana-energia.

Tabela 3. Teste de média dos genótipos de cana para as variáveis de crescimento, na colheita: Altura de plantas (AP), comprimento do colmo (CC), diâmetro do colmo (DC) e perfilhos por metro (PERF/m).

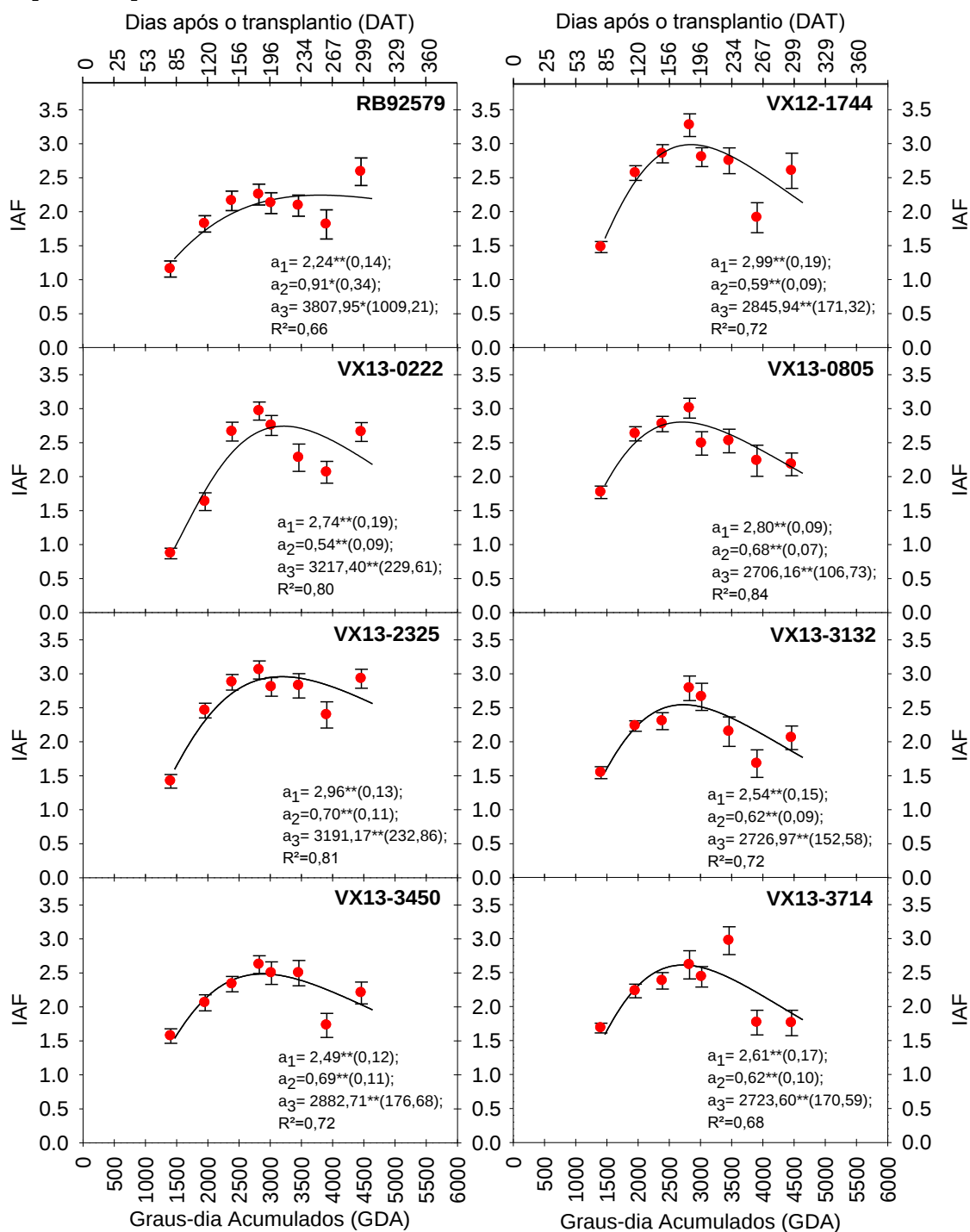
Tratamentos	AP (m)	CC (m)	DC (mm)	PERF/m
RB92579	2,56a	1,87a	22,50 b	12,48a
VX12-1744	3,56b	2,48b	15,34a	28,50e
VX13-0222	3,33b	2,36b	18,08ab	18,75bc
VX13-0805	3,67b	2,65b	15,27a	28,07e
VX13-2325	3,33b	2,33b	18,16ab	22,43cd
VX13-3132	3,48b	2,43b	17,66ab	25,15de
VX13-3450	3,54b	2,47b	18,89ab	15,67ab
VX13-3714	3,44b	2,37b	17,03a	21,52cd
Média	3,36	2,37	17,61	21,57

Notas: Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey considerando o nível nominal de significância de 5% de probabilidade.

Os valores de IAF correlacionados com GDA, para os genótipos avaliados apresentaram coeficiente de determinação com variação de 0,66 (RB92579) a 0,84 (VX13-0805) no ajuste do modelo log-normal. Todos os coeficientes foram significativos pelo teste t, ao nível de 95% de significância. De acordo com os dados observados a RB92579 apresentou o pico de 2,59 aos 4.460 GDA (301 DAT) e os genótipos VX12-1744 (3,27), VX13-0222 (2,96), VX13-0805 (3,01), VX13-2325

(3,06), VX13-3132 (2,78), VX13-3450 (2,62) apresentaram o IAF máximo aos 2.824 GDA (188 DAT) e o VX13-3714 apresentou 2,96 aos 3.458 GDA (236 DAT). A média do IAF máximo dos genótipos de cana-energia foi de 2,95 (Figura 6).

Figura 6. Relação entre índice de área foliar e os graus-dia acumulados (GDA) para os genótipos de cana em condições tropicais, simulado pelo modelo log normal com seus respectivos parâmetros.



Notas: ns, o parâmetro não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ **, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e *, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$.

Os parâmetros do modelo mostram que os genótipos de cana-energia apresentaram o pico do IAF aos 2.899 GDA, com mínimo de 2.706 GDA (VX13-0805) e máximo de 3.217 GDA (VX13-0222), enquanto a RB92579 foi aos 3.807 GDA. A amplitude do IAF foi de 2,24 para RB92579 e entre 2,49 (VX13-3450) a 2,99 (VX13-1744) para os genótipos de cana-energia. Os valores da amplitude do modelo corroboram com os dados observados dos materiais que apresentaram os menores e maiores IAF. Conforme os dados do modelo os genótipos de cana-energia apresentaram valores médio de máximo de IAF de 2,73. Foi observado que todos os genótipos apresentaram um ponto de medida aos 3.907 GDA (266 DAT) valores bem abaixo da curva, esse fato ocorreu devido o tombamento das plantas. O modelo demonstrou que os genótipos VX13-0805, VX13-3714, VX13-3132, VX12-1744 e VX13-3450 apresentaram precocidade em seu crescimento por alcançar o pico do IAF entre 2.706 a 2.882 GDA, enquanto os demais materiais variaram de 3.191 (VX13-2325) a 3.807 GDA (RB92579), apresentando crescimento mais tardio.

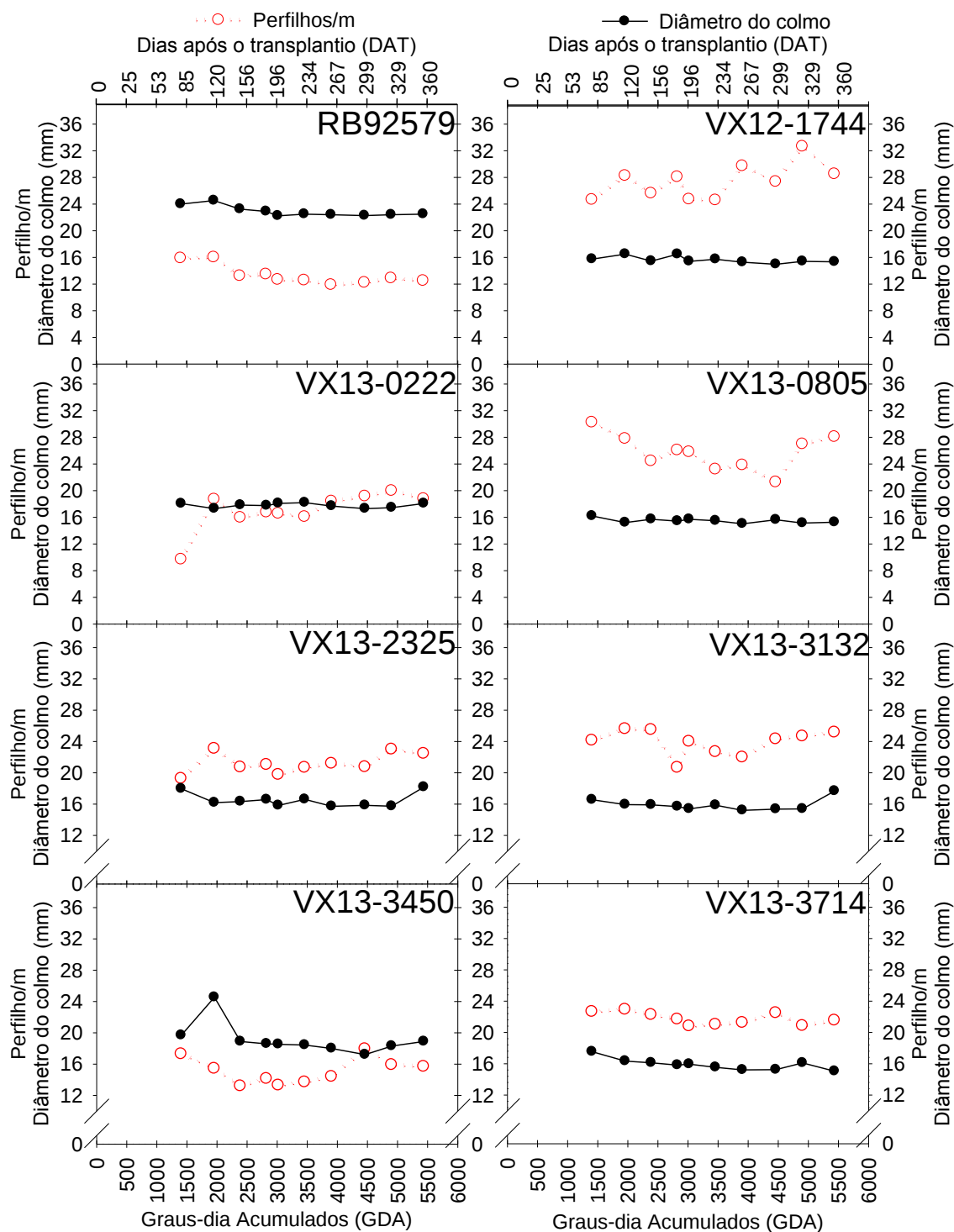
Os valores de perfilhos por metro e diâmetro do colmo em função dos GDA não apresentaram ajustes para o modelo sigmoidal de Boltzmann. A RB92579 apresentou perfilhos/m máximo de 16 e no final do ciclo estabilizou com 12, enquanto os genótipos de cana-energia variou de 18 (VX13-3450) a 33 (VX12-1744), com média 25 perfilhos/m, e estabilizou ao final do ciclo com média de 23. No final do cultivo os materiais de cana-energia variaram de 16 (VX13-3450) a 29 (VX12-1744) de colmos industrializáveis (Figura 7).

De acordo com teste de Tukey ($p < 0,05$) a RB92579 apresentou o menor perfilhamento por metro (12,48) e não diferiu do VX13-3450 (15,67) e esse não diferiu do VX13-0222 (18,75) que apresentou valores estatisticamente iguais aos VX13-3714 (21,52), VX13-2325 (22,43). O VX13-3714 foi estatisticamente igual aos VX13-2325 e VX13-3132 (25,15). O VX13-3132 foi estatisticamente igual aos VX13-0805 (28,07) e VX13-1744 (18,50) que diferiram de todos os outros. Para DC a RB92579 apresentou o maior valor (22,50 mm) e diferiram dos genótipos VX13-3714 (15,03 mm), VX13-0805 (15,27 mm) e VX12-1744 (15,34 mm). Os demais não apresentaram diferença estatística entre eles (Tabela 3).

As medidas de DC foram praticamente estáveis ao longo do ciclo para todos os genótipos e apresentaram comportamento inversamente proporcional ao número de perfilhos por metro. A RB92579 apresentou em média 23 mm, enquanto para os

genótipos de cana-energia os valores variaram de 15 mm (VX12-1744) a 25 mm (VX13-3714), com média de 17 mm.

Figura 7. Perfis por metro (PERF) e diâmetro do colmo (DC) para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulados (GDA) em condições tropicais.



O modelo não apresentou ajuste para as variáveis perfilhos por metro e diâmetro do colmo, pois o plantio foi de mudas pré-brotadas e a primeira avaliação ocorreu após 84 DAT, após o pegamento das mudas, nesse momento as variáveis apresentaram tendência praticamente estável ao longo do cultivo.

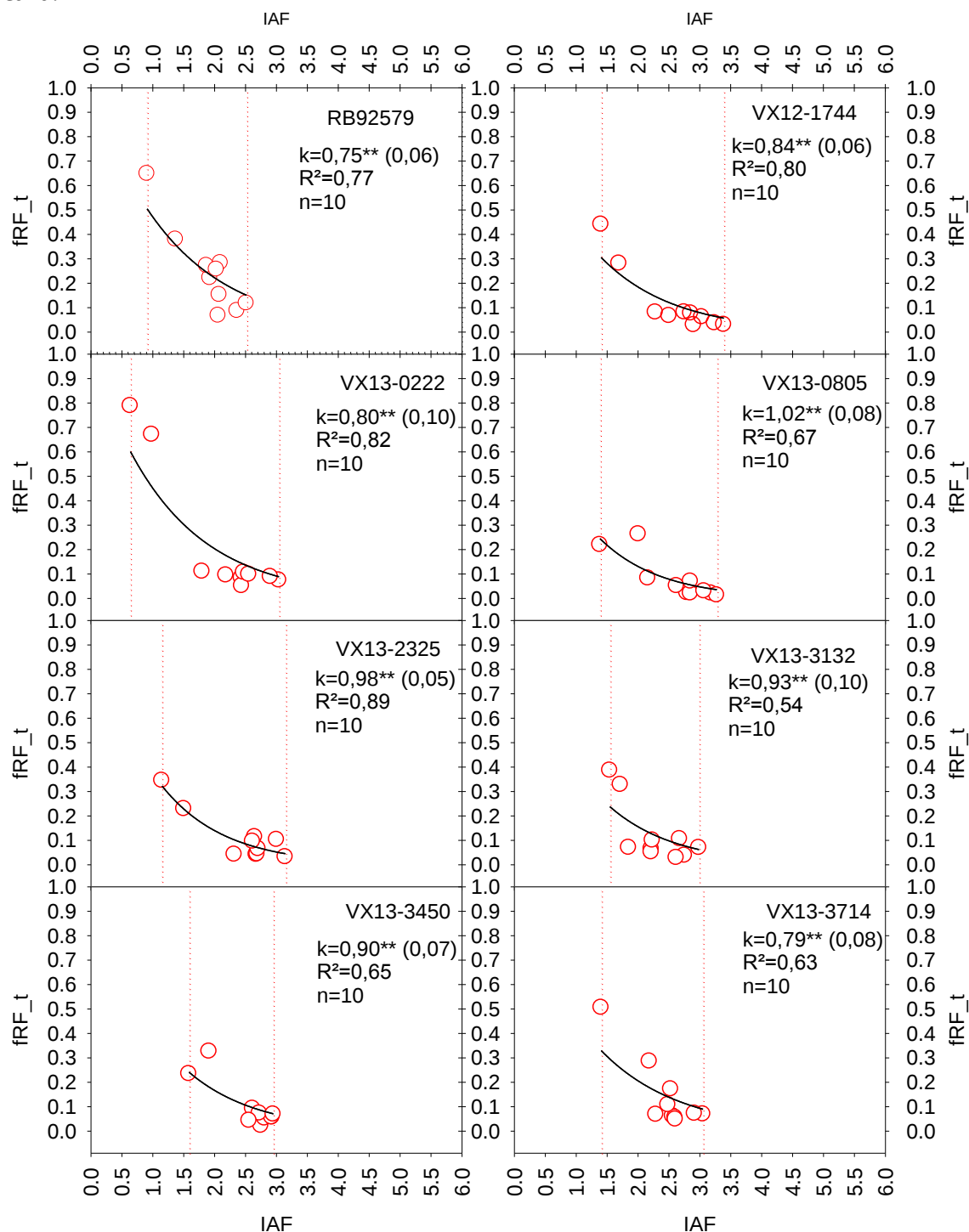
A fração de irradiância transmitida média variou de 0,24 (VX13-0805) a 0,62 (VX13-0222) entre os genótipos de cana-energia avaliados, com 83 DAT. O cultivar de cana-de-açúcar apresentou 48% de radiação transmitida, no mesmo período. OIAF nesta avaliação variou de 0,81 (VX13-0222) a 1,80 (VX13-3714), enquanto a RB92579 apresentou 1,14. Aos 147 DAT, os genótipos de cana-energia já apresentavam o fechamento do dossel em média de 93%, com variação de 90% (VX13-0222) a 95% (VX13-0805), com IAF de 2,64 enquanto a RB92579 com 89% de fechamento do dossel e IAF de 2,22. O IAF máximo da cultivar de cana-de-açúcar foi de 2,51 aos 303 DAT, enquanto o genótipo VX12-1744 apresentou IAF de 3,32 aos 186 DAT.

Os coeficientes de ajuste da regressão exponencial entre a fRF_T e o IAF representa o k médio para o cultivo dos genótipos avaliados. A variedade de cana-de-açúcar RB92579 apresentou o coeficiente de extinção de luz (k) de 0,75, praticamente igual aos genótipos VX13-3714 (0,79) e VX13-0222 (0,80). Para demais genótipos de cana-energia, os valores de k variaram de 0,79 (VX13-3714) a 1,02 (VX13-0805). Em todos os genótipos, os coeficientes de ajuste da regressão foram significativos pelo teste t , com $p < 0,01$. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,54 a 0,89 (Figura 8).

Os genótipos de cana-energia com toda a diversidade de arquitetura foliar apresentaram coeficiente de extinção em média 0,88, com coeficiente da regressão significativo pelo teste t , $p < 0,01$ e R^2 de 0,74, quando comparado com apenas a RB92579 que apresentou o k de 0,75, com $R^2 = 0,77$ (Figura 09).

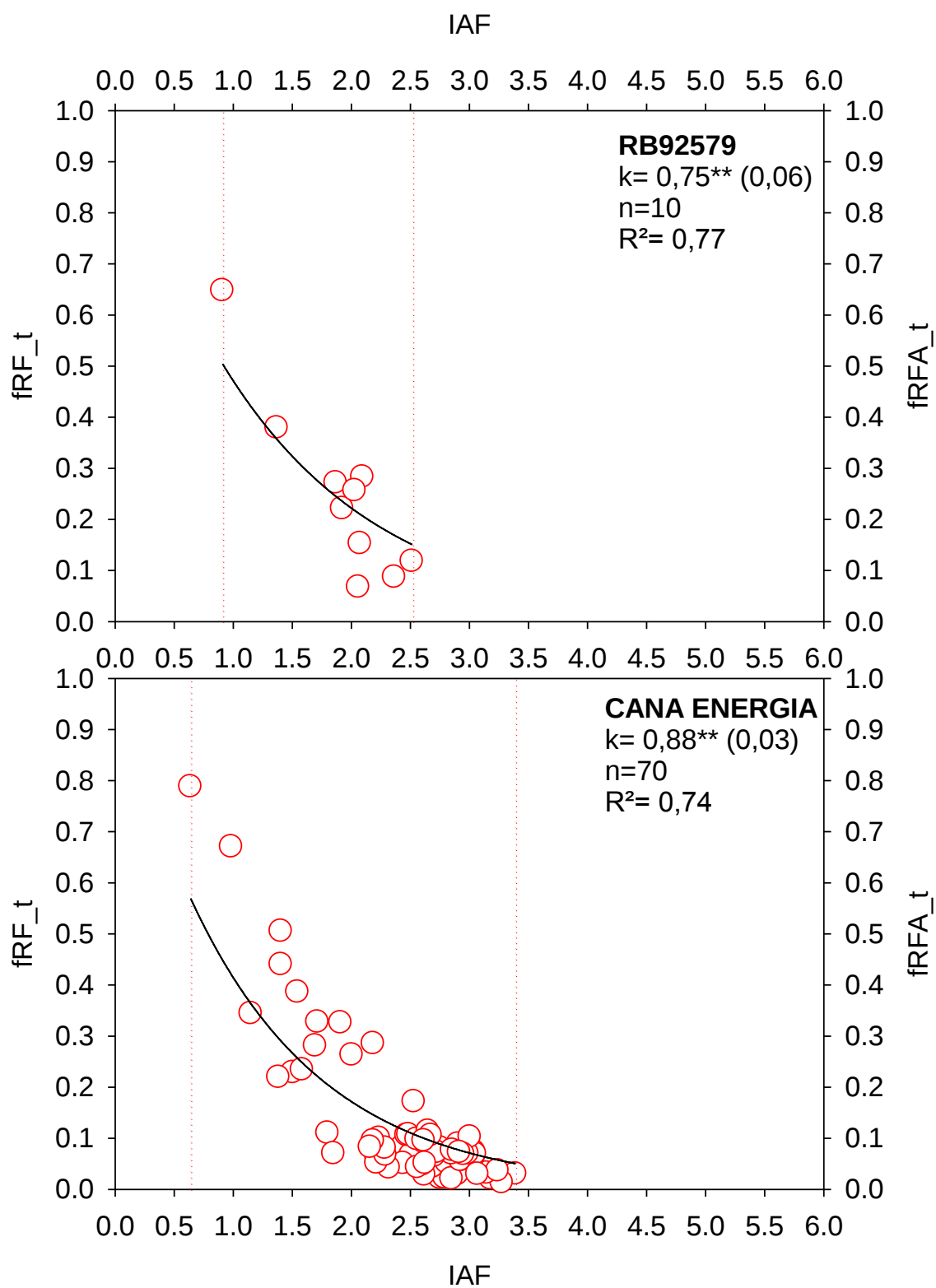
De forma geral, foi notado que a transmitância tem tendência inversamente proporcional ao k , quando o IAF não exerce influência sobre essa variável, pois quando arquitetura do dossel é vertical, as plantas competem menos por radiação e dependendo da densidade das plantas, o IAF pode ser muito alto. Isso provoca redução no k , mas não significa que a transmitância durante cultivo foi maior e sim que o arranjo espacial é mais eficiente em captar energia solar. Para os genótipos de cana-energia em relação a cana de açúcar, a transmitância foi inversamente proporcional ao k , os genótipos de cana-energia apresentou o maior k e a menor transmitância.

Figura 8. Coeficiente de extinção de luz (k) estimado pela relação entre a fração de irradiância transmitida (fRf_T) e o índice de área foliar (IAF), para os genótipos de cana.



Notas: ns, o parâmetro não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$; **, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e *, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$.

Figura 9. Coeficiente de extinção de luz (k) estimado pela relação entre a fração de irradiância transmitida (fRf_T) e o índice de área foliar (IAF), para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar.



Notas: ns, o parâmetro não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ **, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e *, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$.

MUCHOW et al. (1994) encontraram resultados de IAF próximo ao desse trabalho, com média de 2,5 aos 167 dias após o plantio. MONSI e SAEKI (2005) mostram em seus resultados que o k para as folhas horizontais idealmente distribuídos é 1,0, enquanto para as folhas com menor ângulo de inclinação na inserção da folha, diminui para 0,44. Os genótipos com a estrutura foliar mais ereta submetida a altas densidades de plantas possibilitam maior aproveitamento e menor competição da radiação incidente em cima do dossel. O k encontrado neste trabalho serve como ferramenta para ser utilizado em modelos mecanístico que utiliza a interceptação de luz, de variedades com dossel mais aberto, baseado no k e IAF.

FERREIRA JUNIOR et al. (2015) estudando a eficiência na conversão de energia, no nordeste do Brasil, com a variedade RB98710 encontrou valores de k até 0,56, aos 88 DAP, para o espaçamento combinado e 0,53 aos 204 DAP, para o espaçamento simples. O k médio do ciclo foi 0,48 para o espaçamento simples e 0,51 para o espaçamento combinado. ZHOU et al. (2003) encontraram valores de k variando de 0,42 aos 95 DAP a 0,70 aos 131 DAP, trabalhando com 4 variedades de cana-de-açúcar cultivada no espaçamento de 1,5 m, em Zimbabwe. Os mesmos autores relatam que após os 150 DAP a fração de radiação interceptada era superior a 90%.

A irradiação fotossintética interceptada pelos os genótipos variou de 1.921 a 2.270 MJ m⁻², para os clones VX13-0222 e VX13-0805, na mesma ordem. A média de energia fotossintética interceptada pelos clones de cana-energia foi de 2.103 MJ m⁻², enquanto a RB92579 foi de 1.939 MJ m⁻². Os genótipos mais produtivos de cana-energia foram aqueles que interceptaram mais energia luminosa. A quantidade de energia interceptada entre os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar foi bastante similar, porém, com acúmulo de biomassa diferente, isso reflete na eficiência do uso da radiação (EUR). O máximo acúmulo diário de radiação fotossintética interceptada ocorreu aos 267 DAT, no dia que apresentou 11,0 MJ m⁻² disponível. Os genótipos de cana-energia variou de 9,0 (VX13-0222) a 10,0 MJ m⁻² (VX13-1744), com IAF de 2,5 para os dois clones, esses valores representou 86 e 88%, respectivamente, da HFA. A cana-de-açúcar interceptou no máximo 8,9 MJ m⁻², com IAF de 2,23, representando 81% da radiação fotossintética disponível. Os genótipos de cana-energia apresentaram eficiência de radiação fotossintética interceptada em cima da irradiação global variando de 28 a 33%, com média de 31%. A variedade de cana-de-açúcar apresentou 28% da radiação global interceptada.

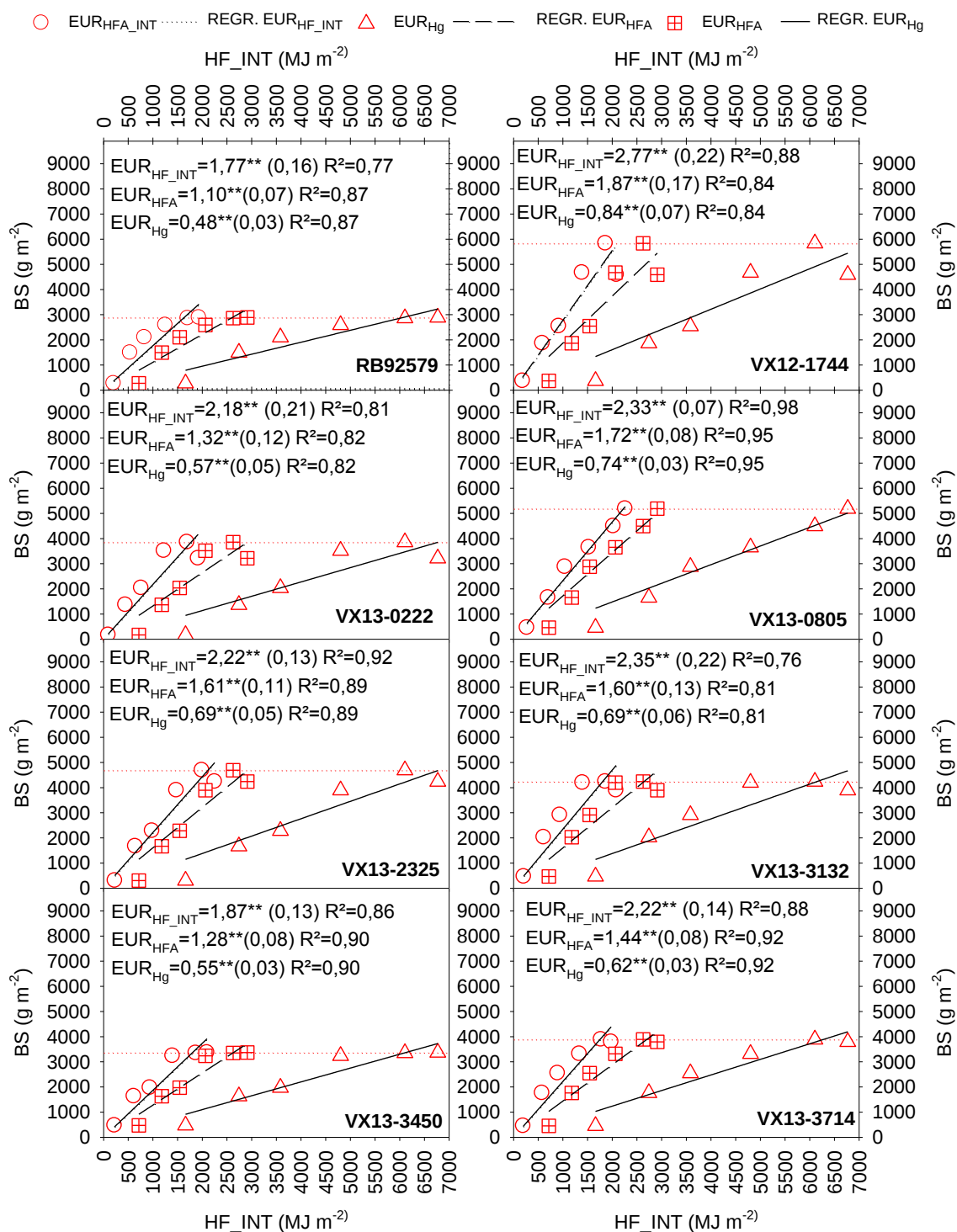
A eficiência no uso da radiação fotossintética interceptada (EUR_{HF_INT}) para os genótipos variou de 1,77 (RB92579) a 2,77 g MJ⁻¹ (VX12-1744). Os clones de cana-energia apresentaram em média 28% mais eficiente no uso da radiação (2,28 g MJ⁻¹) de que a RB92579. Quando comparado RB92579 com VX13-1744, o clone de cana-energia foi 56% mais eficiente. Os coeficientes de determinação apresentaram valores elevados para EUR_{HF_INT} , em função dos genótipos ($R^2 > 0,76$). De acordo com o teste t todos os coeficientes foram significativos, a 1% de probabilidade de erro (Figura 10).

A eficiência no uso da radiação considerado a radiação fotossintética incidente (EUR_{HFA}) variou de 1,10 a 1,87 g MJ⁻¹. Os genótipos de cana-energia apresentaram média de 1,55 g MJ⁻¹, com variação de 1,28 a 1,87 g MJ⁻¹, enquanto a RB92579 foi 1,10 g MJ⁻¹. Os coeficientes de determinação foram satisfatórios acima de 0,81. O VX12-1744 foi 70% mais eficiente de que a RB92579. A eficiência da radiação no uso da radiação global (EUR_{Hg}) foi a fração de aproximadamente 43% da HFA, pois, para essa região, a radiação fotossintética corresponde esse percentual da radiação global e como as plantas não exerce nenhuma influência sobre essa variável, então a relação da EUR_{Hg} e EUR_{HFA} é a mesma da irradiação global e a irradiação fotossintética.

A maior EUR dos genótipos de cana-energia em relação a cana-de-açúcar é consequência da distribuição do IAF, da menor transmitância e do maior k que foi apresentando pelos genótipos de cana-energia, isso foram os fatores determinante para maior EUR. Corroborando com os dados de biomassa seca dessa pesquisa, MUCHOW et al. (1994), estudando interceptação de radiação e o acúmulo de biomassa de cana-de-açúcar cultivada sob condições tropicais irrigadas, encontraram valores de produção máxima de biomassa seca de 72 t ha⁻¹ e 201 t ha⁻¹ para biomassa verde, para fração de radiação interceptada sobre a radiação incidente global, os autores encontraram valores bem acima (60%).

FERREIRA JUNIOR et al. (2015) encontraram valores entre 2,73 a 2,78 g MJ⁻¹, com acúmulo máximo de irradiação interceptada de 2.776 MJ m⁻², com rendimento de 75 a 77 t ha⁻¹ de matéria seca. Os autores encontraram a fração máxima de irradiação interceptada de 96%, interceptando em torno de 9,1 MJ m⁻², com IAF de 5,0. SILVA et al. (2014) encontraram valores de 2,67 g MJ⁻¹ para radiação fotossintética interceptada e 1,30 g MJ⁻¹ para radiação global, na região de Juazeiro da Bahia. MUCHOW et al. (1994), encontraram valor de 1,75 g MJ⁻¹, em condição tropical e irrigada para variedade Q96, utilizando valores de irradiação global.

Figura 10. Relação entre a matéria seca acumulada (BS) e a irradiação fotossintética interceptada (HF_INT), irradiação fotossintética ativa (HFA) e irradiação global (Hg) para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar.



Notas: ns, o parâmetro não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$; **, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e *, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$.

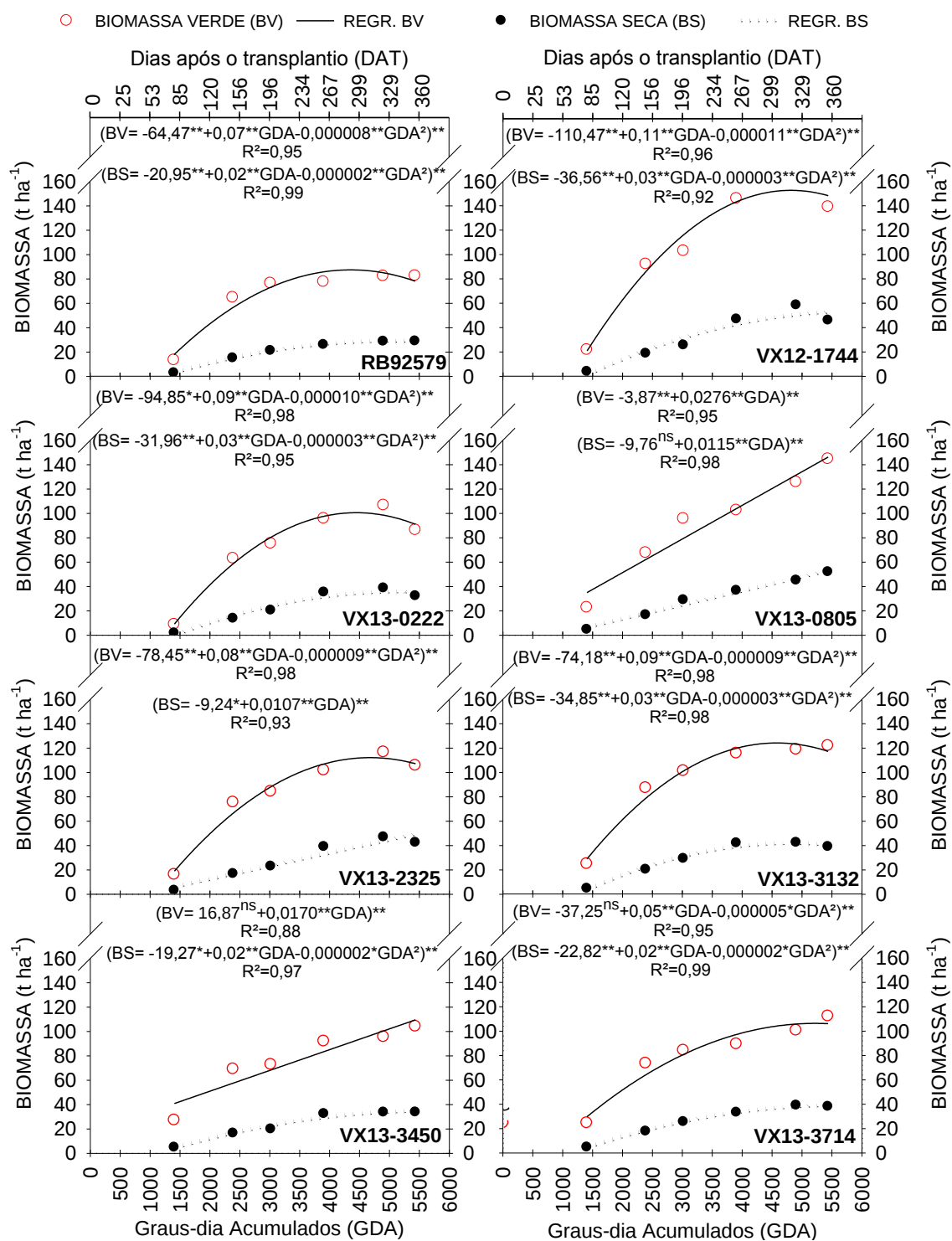
O modelo logístico apresentou elevado ajuste para biomassa verde (BV) e biomassa seca (BS), os coeficientes de determinação variaram entre 0,98 a 0,99 para as duas variáveis. Com exceção do parâmetro a_1 , os a_2 e a_3 foram significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro, pelo teste t. O parâmetro a_1 não foi significativo, pois o plantio ocorreu através de mudas pré-brotadas com isso as medidas de crescimento iniciou apenas aos 84 DAT após o pegamento das mudas. De acordo com o modelo, a RB92579 apresentou BV de 80,48 t ha⁻¹ e BS de 27,76 t ha⁻¹ (34% da BV), enquanto os genótipos de cana-energia apresentaram média de 113,24 t ha⁻¹ de BV e 41,72 t ha⁻¹ de BS (37% da BV). Os genótipos mais e menos produtivo de cana-energia foram VX12-1744 e VX13-0222, respectivamente. Para BV os genótipos de cana-energia variaram de 93,17 t ha⁻¹ (VX13-0222) a 147,85 t ha⁻¹ (VX12-1744), enquanto para BS a variação foi de 34,34 t ha⁻¹ (VX13-0222) a 51,93 t ha⁻¹ (VX12-1744) (Figura 11).

O genótipo mais produtivo de cana-energia (VX12-1744) produziu aproximadamente 83% a mais do que a RB92579 de BV e cerca de 90% a mais de BS. A relação entre o parâmetro de BS e BV final do modelo mostrou que a RB92579 apresentou a relação de 34%, enquanto que os genótipos de cana-energia variaram de 35% (VX13-3450) a 42% (VX13-2325), com média de 37%. Com isso, é possível afirmar que a RB92579 apresentava o acúmulo de aproximadamente 66% de água e os genótipos de cana-energia 63%.

Conforme o acúmulo de biomassa todos os materiais genéticos apresentaram o acúmulo de BV e BS entre 3.907 GDA (266 DAT) a 4.903 GDA (328 DAT). O crescimento máximo relativo de BV foi maior para a RB92579 (3,1 kg kg⁻¹ °C⁻¹), enquanto que os genótipos de cana-energia variaram de 1,5 kg kg⁻¹ °C⁻¹ (VX13-0805) a 2,9 kg kg⁻¹ °C⁻¹ (VX13-0222), já para BS o crescimento máximo relativo foi VX13-0222 (2,4 kg kg⁻¹ °C⁻¹) e a menor foi a VX13-3450 (1,5 kg kg⁻¹ °C⁻¹), a RB92579 foi de 2,3 kg kg⁻¹ °C⁻¹.

Pesquisa realizada por BOSCHIERO et al. (2019) com genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar, no nordeste brasileiro, comprovaram que no primeiro ciclo de cana-planta, a produção de biomassa seca dos genótipos de cana-energia foi em média 75% maior quando comparado com a RB92579. Os clones produziram 43 t ha⁻¹ e a RB92579 em torno de 24,6 t ha⁻¹. Valores aproximados foram encontrados por WOODARD e PRINE (1993), trabalhando com clones de cana-energia irrigada na Flórida nos Estados Unidos, obtiveram entre 46 a 49 t ha⁻¹.

Figura 11. Biomassa verde (BV) e biomassa seca (BS) para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulado (GDA) em condições tropicais, simulado pelo modelo logístico com seus respectivos parâmetros.



Notas: ns, o parâmetro não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ **, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e *, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$.

De acordo com os dados finais de produção dos genótipos, as variáveis BV, BS, fibra, brix, umidade, ART (kg t⁻¹ e t ha⁻¹), ATR (kg t⁻¹ e t ha⁻¹) e pureza do caldo foram

significativas pela análise de variância ao nível de 1% de probabilidade de erro. Os valores dos coeficientes de variação variaram de 3,27% (umidade) a 22,46% (ATR) **Tabela 4**.

A BV para os dados observados na colheita apresentou média de 111,96 t ha⁻¹, o material genético mais produtivo foi VX13-0805 (144,59 t ha⁻¹) e não diferiram do VX12-1744, VX13-3132, VX13-2325, VX13-3450 e VX13-3714, pelo teste de Tukey (p<0,05). A RB92579 foi o menos produtivo (82,47 t ha⁻¹) e não diferiu do VX13-0222 (86,22 t ha⁻¹), com exceção do VX13-0805 e VX12-1744, esses materiais não diferiram dos demais. Para biomassa seca a média foi 38,96 t ha⁻¹, os genótipos RB92579, VX13-0222 e VX13-3450 foram os menos produtivos e diferiram estatisticamente do VX13-0805 que foi mais produtivo, os demais genótipos não apresentaram diferenças significativas entre eles, pelo teste de Tukey (p<0,05) **Tabela 5**.

De acordo com teste de média (Tukey), a fibra mostrou diferença significativa (p<0,05), a RB92579 apresentou 18,43%, mas não diferiu da VX13-3132 (20,99%), VX13-3450 (22,12%) e VX12-1744 (22,80%). O genótipo mais fibroso apresentou 28,68% de fibra (VX13-2325) e não diferiu do VX13-3714, VX13-0805, VX13-0222. Para o brix, a RB92579 apresentou o maior valor (16,53) e diferiu de todos os outros. O genótipo VX13-3714 apresentou o menor valor (8,21), mas não diferiu dos VX13-3450, VX13-0805, VX13-0222 e VX12-1744 (**Tabela 5**).

Tabela 4. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de genótipos de cana para as variáveis de produção, na colheita: biomassa verde (BV), biomassa seca (BS), fibra, brix cana, umidade (UMID), ART (kg t⁻¹), ATR (kg t⁻¹), ART (t ha⁻¹), ATR (t ha⁻¹) e pureza.

FV ¹	GL ²	BV	BS	FIBRA	BRIX	UMID
Genótipos	7	1510,85**	173,04**	37,77**	18,05**	21,93* *
Blocos	2	409,20	36,62	1,09	0,45	0,64
Resíduo	14	317,96	39,25	3,15	0,80	4,53
CV (%)		15,93	16,08	7,37	8,16	3,27
Média geral		11,96	38,96	24,06	10,94	65,00
FV ¹	GL ²	ART (kg t ⁻¹)	ATR (kg t ⁻¹)	ART (t ha ⁻¹)	ATR (t ha ⁻¹)	PZ
Genótipos	7	2066,66**	1681,21**	14,94**	11,67**	203,0 3**
Blocos	2	18,06	16,08	3,27	2,40	80,00
Resíduo	14	72,02	48,77	4,47	3,17	24,21
CV (%)		9,79	9,93	22,27	22,46	6,84
Média geral		86,67	72,53	9,49	7,93	71,98

Notas:^{ns}Não significativo a p<0,05 pelo teste F; **Significativo a p<0,01 pelo teste F; *Significativo a p<0,05 pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

Tabela 5. Teste de média dos genótipos de cana para as variáveis de produção, na colheita: biomassa verde (BV), biomassa seca (BS), fibra, brix cana, umidade, (kg t^{-1}), ATR (kg t^{-1}), ART (t ha^{-1}), ATR (t ha^{-1}) e pureza.

Tratamentos	BV (t ha^{-1})	BS (t ha^{-1})	FIBRA (%)	BRUX (°)	UMIDADE (%)
RB92579	82,47a	28,88a	18,43a	16,53c	65,03ab
VX12-1744	138,96b	45,89ab	22,80abcd	10,21ab	66,98b
VX13-0222	86,22a	32,14a	27,32de	10,10ab	62,59ab
VX13-0805	144,59b	51,88b	26,47cde	9,54ab	63,98ab
VX13-2325	105,53ab	42,38ab	28,68e	11,17b	59,97a
VX13-3132	121,74ab	38,94ab	20,99ab	11,16b	67,85b
VX13-3450	104,09ab	33,68a	22,12abc	10,58ab	67,31b
VX13-3714	102,10ab	37,91ab	25,53bcde	8,21a	66,25b
Média	111,96	38,96	24,06	10,94	65,00
Tratamentos	ART (kg t^{-1})	ATR (kg t^{-1})	ART (t ha^{-1})	ATR (t ha^{-1})	PUREZA (%)
RB92579	145,29c	125,84c	12,04b	10,42b	86,34c
VX12-1744	83,53b	70,06b	11,62ab	9,74ab	74,25bc
VX13-0222	80,66b	65,93b	7,00ab	5,72ab	76,73bc
VX13-0805	74,57ab	60,92ab	10,84ab	8,87ab	65,48ab
VX13-2325	83,38b	67,39b	9,01ab	7,28ab	68,49ab
VX13-3132	89,99b	76,42b	10,90ab	9,26ab	73,53bc
VX13-3450	83,37b	70,31b	8,61ab	7,28ab	72,53abc
VX13-3714	52,60a	43,38a	5,91a	4,87a	58,46a
Média	86,67	72,53	9,49	7,93	72,98

Notas: Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey considerando o nível nominal de significância de 5% de probabilidade.

BOSCHIERO et al. (2019) trabalhando com genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar, em Alagoas, encontraram valores de fibra para RB92579 de 10,5% na colheita e os genótipos de cana-energia variaram de 17,8 a 28,5%, em média 70% mais fibra de que a cana-de-açúcar. De acordo com KIM e DAY (2011), valores de fibra para cana-energia chega a ser duas vezes mais de que cana-de-açúcar, e essa fibra consiste em 43% de celulose, 24% de hemicelulose e 22% de lignina.

A umidade média dos genótipos foi 65%, o VX13-2325 apresentou 59,97% de umidade e foi o menor valor, mas diferiu estatisticamente pelo teste de Tukey, ($p < 0,05$) do VX13-3714, VX12-1744, VX13-3450 e do VX13-3132. Os demais não diferiram entre si. Os genótipos apresentaram média de 72,98% de pureza. A variedade RB92579 foi que apresentou o maior valor (86,34%), mas não diferiu estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) dos genótipos VX12-1744, VX13-0222, VX13-3132 e VX13-3450 (Tabela 5).

A RB92579 apresentou os maiores valores para ART (145,29 kg t⁻¹) e ATR (125,84 kg t⁻¹) e diferiu estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05) de todos os genótipos de cana-energia. O VX13-3714 apresentou os menores valores para as duas variáveis, mas não diferiu do VX13-0805, porem este não diferiu dos demais. A RB92579 acumulou a maior quantidade de ART (12,04 t ha⁻¹) e ATR (10,42 t ha⁻¹), mas diferiu apenas do VX13-3714, mas esse não diferiu dos demais genótipos de cana-energia (Tabela 5).

De acordo com as variáveis de produção dos genótipos em função dos graus-dia acumulados, a RB92579 apresentou, para teor de fibra, significância pelo teste F (p<0,05) para equação linear da regressão, com coeficiente de determinação de 63% e coeficiente de variação de 17,30%. Os genótipos de cana-energia, conforme a derivada da equação apresentou ponto de acúmulo máximo entre 24% (VX12-1744, VX13-3132 e VX13-3450) a 30% (VX13-2325 e VX13-3714) de fibra, com média de 27%. Todos os genótipos de cana-energia apresentaram ajustes quadráticos para essa variável, com coeficiente de determinação acima de 84%. O acúmulo máximo de fibra ocorreu entre 4.135 GDA aos 280 DAT (VX13-3132) e 6.393 GDA (VX13-2325), com média de 5.048 GDA aos 337 DAT. Os coeficientes de variação para fibra variaram de 5,54% (VX13-2325) a 10,86% (VX13-3714), e foi classificado por elevada precisão experimental (Tabela 06 e Figura 12).

Tabela 6. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para fibra ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	RB92579	VX12-1744	VX13-0222	VX13-0805
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	4,83**	67,97**	100,99**	53,44**
Bloco	2	1,49	0,16	3,93	10,40
Resíduo	10	2,05	1,62	1,70	2,26
<i>Regressão Linear</i>	1	15,28*	277,93**	399,06**	221,27**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	0,34ns	29,00**	32,51**	27,88**
<i>Desvio de regressão</i>	3	2,85	10,96	24,47	6,01
CV (%)		8,28	6,32	5,68	6,37
Média geral		17,30	20,13	22,99	23,60
FV1	GL2	VX13-2325	VX13-3132	VX13-3450	VX13-3714
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	119,27**	59,57**	66,84**	121,06**
Bloco	2	2,18	5,95	2,10	3,60
Resíduo	10	1,71	2,42	1,39	7,10
<i>Regressão Linear</i>	1	516,69**	146,48**	223,53**	370,39**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	20,34**	106,46**	56,95**	169,52**
<i>Desvio de regressão</i>	3	19,77	14,96	17,91	21,80
CV (%)		5,54	7,36	5,73	10,86
Média geral		23,60	21,13	20,52	24,54

Notas:^{ns}Não significativo a p<0,05 pelo teste F; **Significativo a p<0,01 pelo teste F; *Significativo a p<0,05 pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

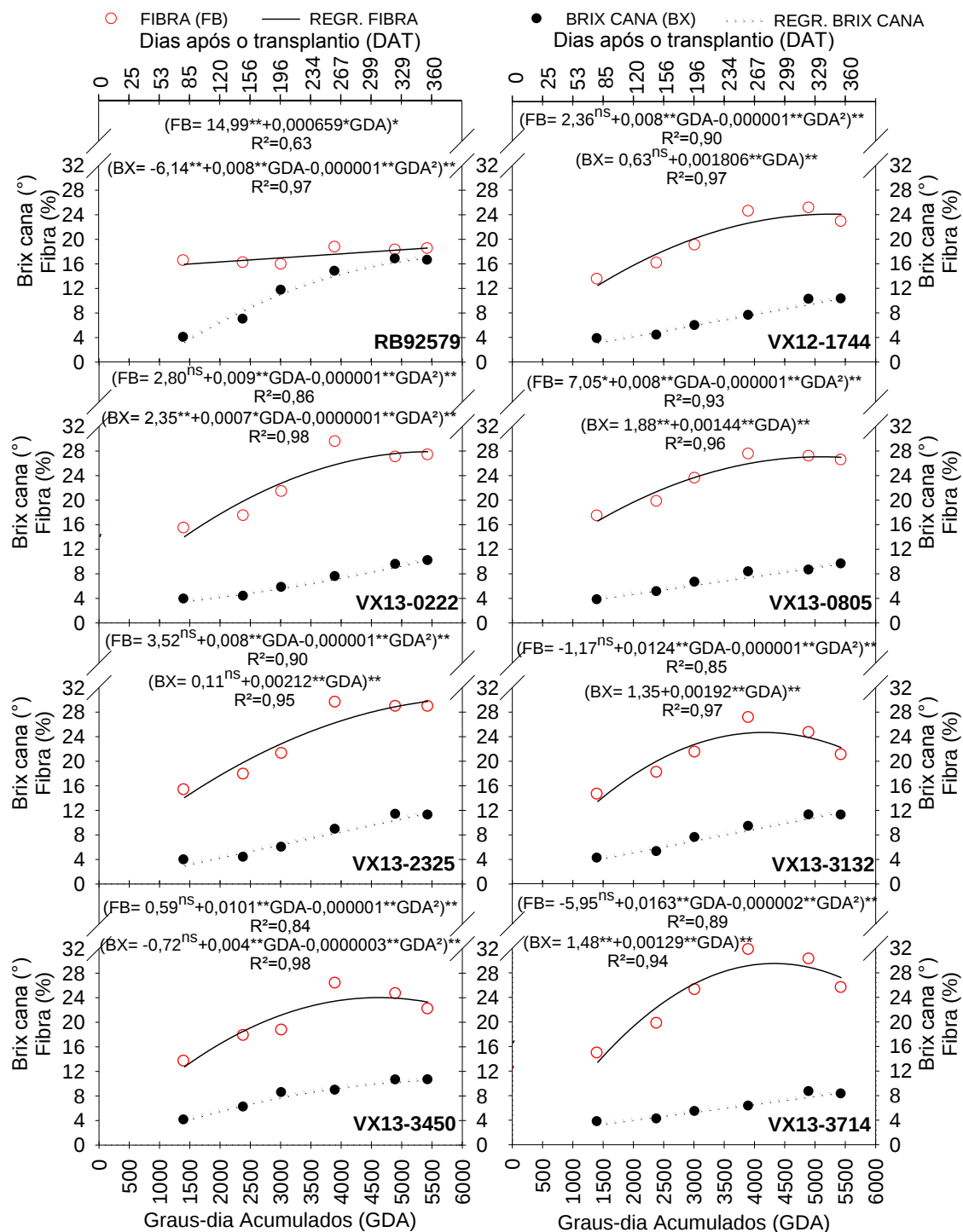
Os genótipos RB92579, VX13-0222 e VX13-3450, para os sólidos solúveis (brix), foram significativos para regressão quadrática de acordo com análise de variância ao nível de 1% de probabilidade de erro, com coeficiente de variação de 2,16%, 3,47% e 4,46%, respectivamente. Entretanto os demais genótipos apresentaram ajustes lineares ao longo do ciclo. A RB92579 apresentou brix máximo de 17 aos 6.204 GDA, através da derivada da equação. Enquanto os genótipos VX13-0222 e VX13-3450 apresentaram acúmulo máximo de 5 e 11, na mesma ordem aos 2.282 GDA e 6.098 GDA, respectivamente. As equações quadráticas apresentaram coeficientes de determinação acima de 0,97 e as equações lineares acima de 0,95 (Tabela 07 e Figura 12).

Tabela 7. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para brix ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	RB92579	VX12-1744	VX13-0222	VX13-0805
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	84,39**	23,73**	20,85**	15,23**
Bloco	2	0,57	0,50	0,36	1,70
Resíduo	10	0,06	0,31	0,06	0,67
<i>Regressão Linear</i>	1	392,80**	114,69**	101,58**	73,15**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	17,69**	0,86ns	1,04**	1,21ns
<i>Desvio de regressão</i>	3	3,81	1,03	0,54	0,59
CV (%)		2,16	7,99	3,47	11,74
Média geral		11,76	6,97	6,82	6,95
FV1	GL2	VX13-2325	VX13-3132	VX13-3450	VX13-3714
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	33,36**	26,82**	19,96**	12,52**
Bloco	2	0,64	0,10	0,0086	0,01
Resíduo	10	0,41	0,23	0,13	0,14
<i>Regressão Linear</i>	1	158,52**	129,64**	92,92**	59,19**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	0,66ns	0,63ns	4,52**	0,36ns
<i>Desvio de regressão</i>	3	7,63	1,27	0,79	1,01
CV (%)		8,45	5,91	4,46	6,15
Média geral		7,56	8,09	8,11	6,04

Notas:^{ns}Não significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; **Significativo a $p < 0,01$ pelo teste F; *Significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

Figura 12. Fibra e brix para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulados (GDA) em condições tropicais, em função de regressão linear ou quadrática conforme a estatística.



Notas: ns, dentro do parêntese, o coeficiente não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese, a equação não é significativa pelo teste F, $p < 0,05$; **, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$; *, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$.

Os genótipos apresentaram ajustes quadráticos significativos pela análise de variância ($p < 0,05$), para umidade da biomassa e pureza do caldo. Os coeficientes de variação da análise de variância variou de 1,91% (VX13-3450) a 4,06% (VX13-3714) para umidade e para pureza variou de 4,53% (RB92579) a 12,97% (VX13-2325), o experimento foi classificado com elevada precisão experimental para as variáveis de umidade e pureza (Tabelas 8 e 9). As equações quadráticas apresentaram R^2 acima de 0,72 para umidade e acima de 0,91 para pureza do caldo. Todos os coeficientes das equações foram significativos, pelo teste t ($p < 0,05$) (Figura 13). De acordo com a derivada das equações os genótipos de cana-energia apresentaram pureza do caldo máxima entre 52% (VX13-3714) aos 5.257 GDA a 87% (VX12-1744) aos 8.865 GDA, com média de 71% (6.015 GDA). Enquanto que a RB92579 (91%) apresentou o ponto máximo de pureza do caldo aos 4.582 GDA. Para umidade mínima da biomassa os genótipos de cana-energia variaram de 52% (VX13-2325) aos (9.012 GDA) a 66% (VX13-3450) aos 4.940 GDA, com média de 62% (6.176 GDA). A RB92579 apresentou umidade mínima de 62% aos 7.269 GDA (Figura 13).

Tabela 8. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para umidade ao longo do ciclo.

CV ¹	GL ²	RB92579	VX12-1744	VX13-0222	VX13-0805
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	120,79**	164,14**	203,09**	123,55**
Bloco	2	0,29	0,11	6,27	6,46
Resíduo	10	2,05	2,80	1,84	3,15
Regressão Linear	1	563,45**	749,60**	903,13**	548,63**
Regressão Quadrática	1	13,12*	19,86*	21,93**	12,93**
Desvio de regressão	3	9,12	17,08	30,14	9,48
CV (%)		2,02	2,30	1,93	2,55
Média geral		70,93	72,90	70,20	69,45
CV1	GL2	VX13-2325	VX13-3132	VX13-3450	VX13-3714
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	272,50**	148,68**	148,15**	192,74**
Bloco	2	1,32	7,50	2,34	3,37
Resíduo	10	2,20	2,45	1,86	7,95
Regressão Linear	1	1.247,90**	551,53**	604,41**	725,70**
Regressão Quadrática	1	13,67*	123,47**	93,63**	154,27**
Desvio de regressão	3	33,64	22,80	14,24	27,91
CV (%)		2,16	2,21	1,91	4,06
Média geral		68,83	70,78	71,37	69,42

Notas:^{ns}Não significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; **Significativo a $p < 0,01$ pelo teste F; *Significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

Tabela 9. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para pureza do caldo ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	RB92579	VX12-1744	VX13-0222	VX13-0805
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	3.126,91**	2.020,85**	2.126,18**	1.687,92**
Bloco	2	7,96	17,34	3,93	22,22
Resíduo	10	8,77	8,51	15,52	23,84
<i>Regressão Linear</i>	1	11.871,05**	9.333,87**	9.524,12**	5.633,16**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	3.220,82**	108,19**	198,61**	1.255,74**
<i>Desvio de regressão</i>	3	180,89	220,74	302,72	516,89
CV (%)		4,53	7,14	8,83	10,92
Média geral		65,33	40,89	44,60	43,76
FV1	GL2	VX13-2325	VX13-3132	VX13-3450	VX13-3714
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	2.077,56	2.024,07**	1.746,19**	1.519,84**
Bloco	2	53,95	6,01	20,93	26,55
Resíduo	10	32,72	19,13	10,47	18,55
<i>Regressão Linear</i>	1	9.081,58**	7.273,62**	6.233,66**	4.955,48**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	360,97**	1.356,72**	1.628,19**	518,28**
<i>Desvio de regressão</i>	3	314,09	496,68	289,69	708,49
CV (%)		12,97	8,66	6,18	12,12
Média geral		44,10	50,52	52,39	35,54

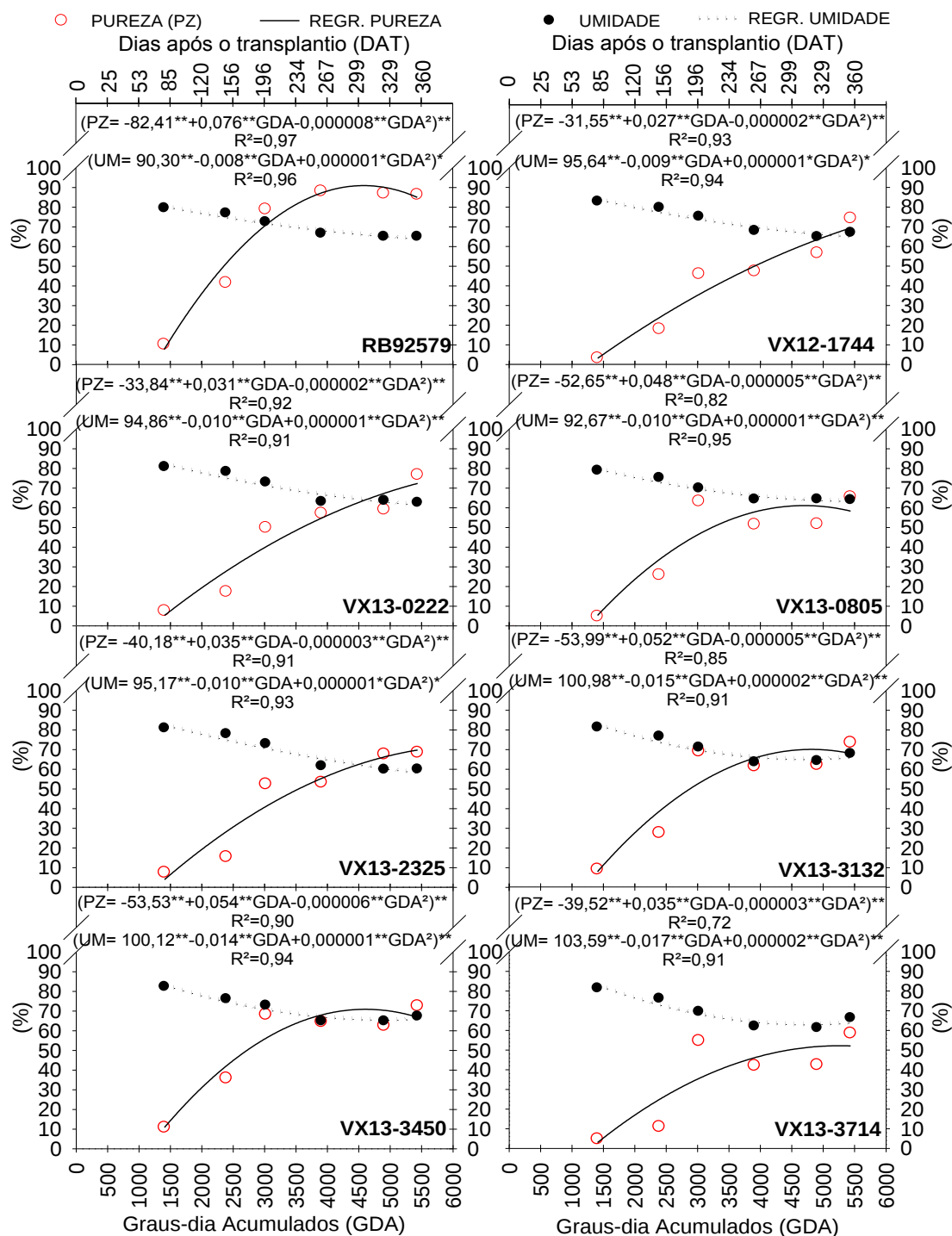
Notas:^{ns}Não significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; **Significativo a $p < 0,01$ pelo teste F; *Significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

A derivada da equação para pureza do caldo da biomassa não foi válido para os materiais VX12-1744, VX13-0222, VX13-2325, pois a estimativa de máxima produção superestimou o ciclo da cultura com acúmulo de graus-dia acumulado acima do realizado. O mesmo ocorreu para a umidade da biomassa, os genótipos RB92579, VX12-1744, VX13-0222, VX13-0805 e VX13-2325 não apresentaram estimativas dentro dos valores medidos no ciclo. No período muito seco os genótipos ficaram desidratados e depois se reidrataram isso o modelo polinomial não conseguiu explicar.

Os materiais genéticos RB92579, VX13-0805, VX13-3132 e VX13-3450, para ART e ATR em kg t^{-1} , apresentaram ajustes quadráticos pela análise de variância ($p < 0,05$), com coeficientes de variação abaixo de 14,99%. Os R^2 das equações foram acima de 92%, os demais genótipos apresentaram tendência linear para as duas variáveis. Quando comparado às mesmas variáveis em t ha^{-1} apenas os genótipos RB92579 e VX13-3132 apresentaram tendência quadrática significativa, pelo teste F ($p < 0,05$), com coeficientes de variação abaixo de 24,23% e os R^2 das equações foram acima de 97%. Os demais genótipos apresentaram tendência linear, para acúmulo de açúcares, com aumento dos graus-dia acumulado (Tabela 10, 11, 12 e 13). Todos os coeficientes das equações foram significativos pelo teste t ($p < 0,05$), para ART e ATR,

tanto para quilograma de açúcares por tonelada de cana, quanto para tonelada de açúcares por hectare (Figura 14 e 15).

Figura 13. Pureza e umidade para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulados (GDA) em condições tropicais, em função de regressão linear ou quadrática conforme a estatística.



Notas: ns, dentro do parêntese, o coeficiente não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese, a equação não é significativa pelo teste F, $p < 0,05$; **, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$; *, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$.

Tabela 10. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para açúcares redutores totais (ART, kg t⁻¹) ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	RB92579	VX12-1744	VX13-0222	VX13-0805
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	9.356,14**	2.261,57**	1.982,38**	1.593,74**
Bloco	2	48,12	30,36	8,60	51,49
Resíduo	10	8,96	12,97	14,96	18,54
<i>Regressão Linear</i>	1	40.699,33**	11.138,34**	9.638,79**	7.253,78**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	3.998,37**	23,73ns	4,29ns	430,86**
<i>Desvio de regressão</i>	3	2.082,97	48,60	89,61	94,69
CV (%)		2,94	7,26	7,97	8,45
Média geral		101,68	49,61	48,51	50,98
FV1	GL2	VX13-2325	VX13-3132	VX13-3450	VX13-3714
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	2.974,93**	2.451,25**	2.154,62**	825,14**
Bloco	2	145,05	26,59	7,97	13,60
Resíduo	10	61,35	34,65	24,25	27,35
<i>Regressão Linear</i>	1	14.272,70**	11.311,69**	8.971,81**	3.770,89**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	38,88ns	376,15**	1.065,84**	26,10ns
<i>Desvio de regressão</i>	3	187,70	189,47	10,11	109,58
CV (%)		14,99	9,54	8,15	14,51
Média geral		52,24	61,69	60,44	36,05

Notas:^{ns}Não significativo a p<0,05 pelo teste F; **Significativo a p<0,01 pelo teste F; ; *Significativo a p<0,05 pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

Tabela 11. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para açúcares totais recuperáveis (ATR, kg t⁻¹) ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	RB92579	VX12-1744	VX13-0222	VX13-0805
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	7.061,73**	1.531,64**	1.273,84**	1.025,29**
Bloco	2	40,36	21,36	5,01	40,93
Resíduo	10	8,15	7,94	10,85	14,65
<i>Regressão Linear</i>	1	30.624,18**	7.546,23**	6.194,65**	4.645,58**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	3.097,94**	21,73ns	4,73ns	286,45**
<i>Desvio de regressão</i>	3	528,84	30,07	56,61	64,81
CV (%)		3,24	6,81	8,29	9,18
Média geral		88,11	41,36	39,73	41,68
FV1	GL2	VX13-2325	VX13-3132	VX13-3450	VX13-3714
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	1.876,70**	1.684,14**	1.471,78**	519,98**
Bloco	2	110,30	10,15	11,36	3,75
Resíduo	10	40,54	25,48	15,07	15,80
<i>Regressão Linear</i>	1	9.023,68**	7.826,21**	6.044,31**	2.374,44**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	28,06ns	194,86*	712,99**	6,32ns
<i>Desvio de regressão</i>	3	110,59	133,21	200,53	73,05
CV (%)		14,98	9,80	7,65	13,62
Média geral		45,50	51,49	50,71	29,19

Notas:^{ns}Não significativo a p<0,05 pelo teste F; **Significativo a p<0,01 pelo teste F; ; *Significativo a p<0,05 pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

Tabela 12. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para açúcares redutores totais (ART, t ha⁻¹) ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	RB92579	VX12-1744	VX13-0222	VX13-0805
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	75,83**	77,00**	27,27**	46,10**
Bloco	2	1,08	2,67	1,78	3,16
Resíduo	10	2,69	0,30	0,71	3,61
<i>Regressão Linear</i>	1	340,79**	368,87**	130,77**	225,62**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	25,68*	0,03ns	0,83ns	0,003ns
<i>Desvio de regressão</i>	3	4,23	0,30	1,59	3,61
CV (%)		20,99	8,35	20,36	24,23
Média geral		7,81	6,54	4,13	5,55
FV1	GL2	VX13-2325	VX13-3132	VX13-3450	VX13-3714
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	48,89**	52,64**	29,83**	14,09**
Bloco	2	3,72	0,78	1,38	0,18
Resíduo	10	30,75	0,36	1,13	0,36
<i>Regressão Linear</i>	1	231,93**	250,96**	141,63**	68,44**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	0,22ns	6,65**	4,34ns	0,0097ns
<i>Desvio de regressão</i>	3	1,33	5,59	1,07	0,67
CV (%)		23,47	9,12	20,46	18,28
Média geral		5,24	6,59	5,19	3,27

Notas:^{ns}Não significativo a p<0,05 pelo teste F; **Significativo a p<0,01 pelo teste F; *Significativo a p<0,05 pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

Tabela 13. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de graus-dia acumulado dos genótipos de cana para açúcares totais recuperáveis (ATR, tha⁻¹) ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	RB92579	VX12-1744	VX13-0222	VX13-0805
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	56,99**	52,32**	17,84**	30,10**
Bloco	2	0,86	1,91	1,28	3,93
Resíduo	10	2,06	0,19	0,50	1,79
<i>Regressão Linear</i>	1	255,47**	252,43**	85,89**	146,51**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	19,63*	0,04ns	0,52ns	0,002ns
<i>Desvio de regressão</i>	3	3,29	3,05	0,93	1,33
CV (%)		21,17	8,12	20,92	29,62
Média geral		6,77	5,44	3,37	4,51
FV1	GL2	VX13-2325	VX13-3132	VX13-3450	VX13-3714
Quadrados Médios					
Graus-dia	5	31,07**	36,59**	20,52**	9,19**
Bloco	2	2,51	0,74	1,34	0,19
Resíduo	10	1,77	0,29	0,74	0,23
<i>Regressão Linear</i>	1	148,20**	175,67**	97,40**	44,32**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	0,19 ns	3,66**	2,77ns	0,00089ns
<i>Desvio de regressão</i>	3	2,32	1,21	0,81	0,52
CV (%)		31,37	9,86	19,80	17,99
Média geral		4,24	5,50	4,35	2,64

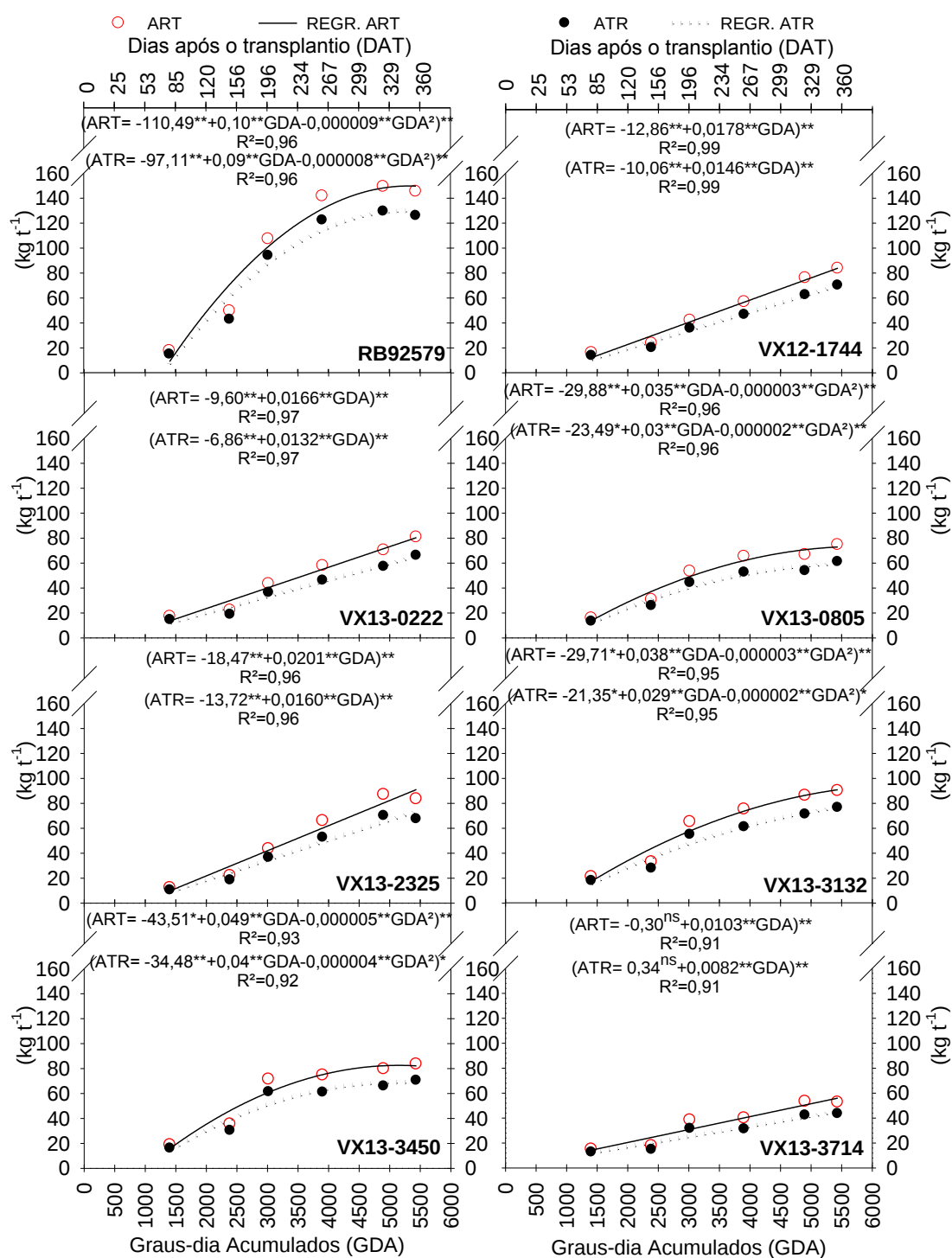
Notas:^{ns}Não significativo a p<0,05 pelo teste F; **Significativo a p<0,01 pelo teste F; *Significativo a p<0,05 pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

De acordo com a curva da regressão, a RB92579 apresentou o acúmulo máximo de 150 e 130 kg t⁻¹ de ART (5.320 GDA aos 354 DAT) e ATR (5.296 GDA aos 352 DAT), respectivamente. Os genótipos de cana-energia variaram de 73 kg t⁻¹ (5.850 GDA) a 95 kg t⁻¹ (6.649 GDA) de ART, com média de 84 kg t⁻¹ (5.883 GDA) de ART. Para ATR, os genótipos de cana-energia variaram de 60 kg t⁻¹ (5.812 GDA) a 82 kg t⁻¹ (7.145 GDA), com média de 70 kg t⁻¹ (6.037 GDA). Enquanto para tonelada de açúcares por hectares, a derivada da equação mostrou que a RB92579 apresentou 12 e 11 t ha⁻¹, para ART (5.583 GDA) e ATR (5.563 GDA), na mesma ordem. O clone VX13-3132 apresentou o acúmulo máximo de 12 e 11 t ha⁻¹, para ART (7.034 GDA) e ATR (7.494 GDA), respectivamente. De acordo com as derivadas das equações todos os genótipos com ajustes quadráticos atingiram o máximo de acúmulo de açúcares no final do ciclo.

Corroborando com essa pesquisa [BOSCHIERO et al. \(2019\)](#) trabalhando com genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar, no nordeste brasileiro, encontraram maiores valores de sacarose para a RB92579 (142 kg t⁻¹), a média de teor de sacarose para os genótipos de cana-energia foi de 66 kg t⁻¹.

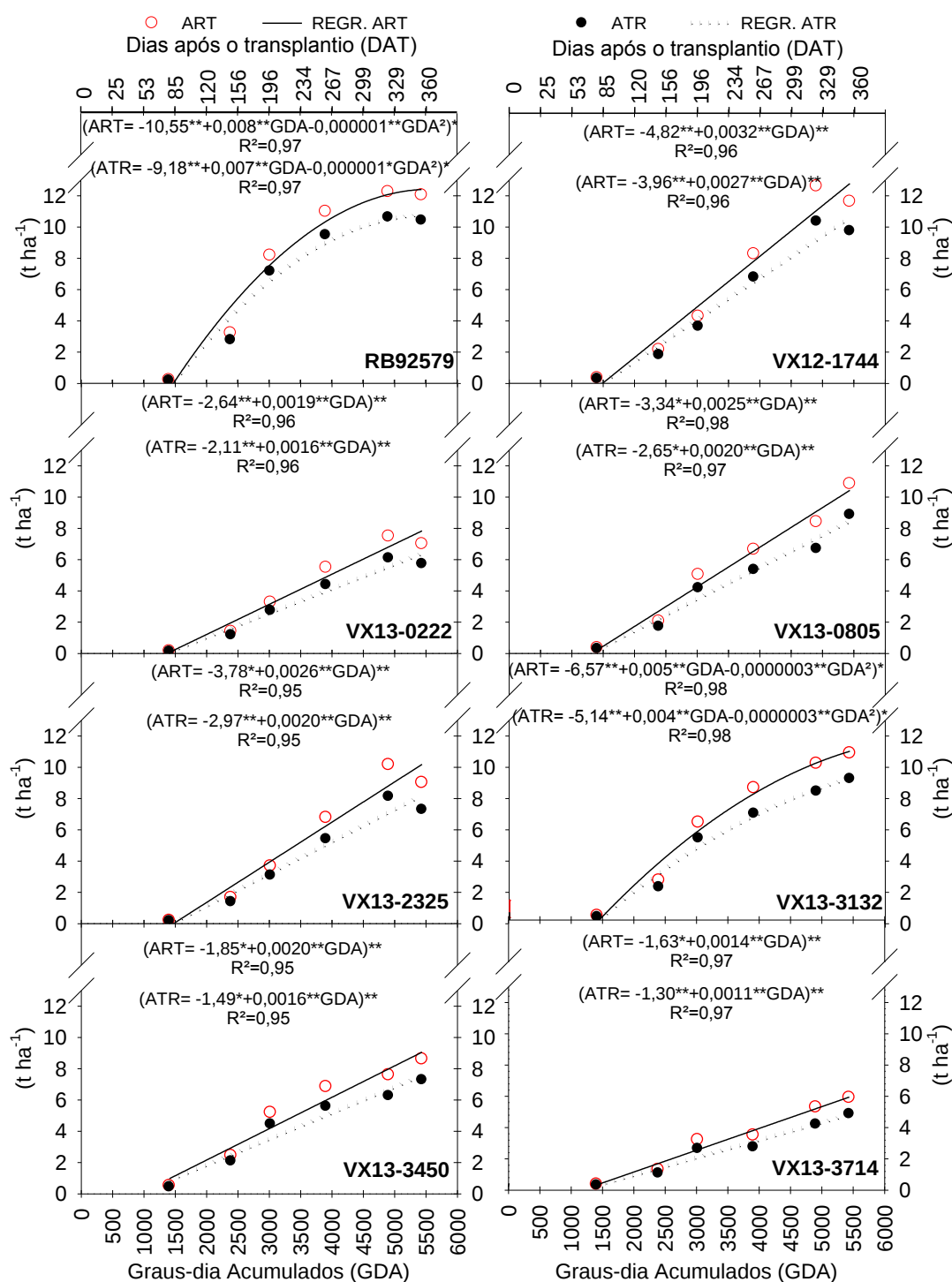
A RB92579 apresentou os melhores valores para sólidos solúveis, pureza do caldo, açúcares redutores totais e açúcares totais recuperáveis, porém de acordo com os dados medidos, o genótipo VX12-1744 apresentou praticamente o mesmo valor de açúcares por hectare da RB92579, com o dobro de BS.

Figura 14. Açúcares redutores totais (ART) e açúcares totais recuperáveis (ATR) em kg t⁻¹ para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulados (GDA) em condições tropicais, em função de regressão linear ou quadrática conforme a estatística.



Notas: ns, dentro do parêntese, o coeficiente não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese, a equação não é significativa pelo teste F, $p < 0,05$; **, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$; *, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$.

Figura 15. Açúcares redutores totais (ART) e açúcares totais recuperáveis (ATR) em $t\ ha^{-1}$ para os genótipos de cana, em função dos graus-dia acumulados (GDA) em condições tropicais, em função de regressão linear ou quadrática conforme a estatística.



Notas: ns, dentro do parêntese, o coeficiente não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese, a equação não é significativa pelo teste F, $p < 0,05$; **, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$; *, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$.

3.1.4 Conclusões

Os genótipos de cana-energia apresentaram os maiores valores de índice de área foliar, altura de planta, comprimento do colmo, número de perfilhos e cobertura do solo mais rápido, entretanto o diâmetro do colmo foi menor, em relação a cultivar de cana-de-açúcar. O modelo logístico mostrou performance satisfatória para estimativa de altura de planta, comprimento de colmo, produção de biomassa verde e produção de biomassa seca para os genótipos avaliados.

A variedade RB92579 apresentou maior transmitância de radiação solar, menor coeficiente de extinção de luz e foi menos eficiente no uso da radiação, em comparação com os genótipos de cana-energia. O rendimento máximo de biomassa verde e seca do genótipo VX12-1744 foi aproximadamente o dobro da RB92579, enquanto o genótipo menos produtivo (VX13-3132) produziu mais de que a RB92579.

A fibra dos genótipos de cana-energia foi superior a RB92579 e a umidade dos materiais são similares. Os genótipos de cana-energia apresentaram os menores valores de sólidos solúveis, pureza do caldo, açúcares redutores totais em kg t^{-1} e açúcares recuperáveis totais em kg t^{-1} quando comparado com a RB92579. Entretanto o material VX12-1744 apresentou aproximadamente o mesmo valor da RB92579, quando comparado, açúcares por hectares. Em síntese, os genótipos de cana-energia apresentaram crescimento, desenvolvimento e produção de biomassa superior a cana-de-açúcar e pode ser utilizado como ótima cultura para produção de biomassa visando teor de matéria seca por hectare.

3.1.5 Referências

- ADAMS, J. E.; ARKIN, G. F. A light interception method for measuring row crop ground cover. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, n.1, p.789-792, 1977.
- ALLEN, R. G.; *et al.* Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO.1998. 300p.(FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BATISTA, E. L. DA S. *et al.* Modelagem do crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no período de formação da cultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, UAEEA/UFCG, v.17, n.10, p.1080–1087, 2013.
- BENINCASA, M. M. P. Análise de crescimento de plantas: noções básicas. Funep, 1988.

BOSCHIERO, B. N. et al. Biomass Production and Nutrient Removal of Energy Cane Genotypes in Northeastern Brazil. **Crop Science**, v. 59, n. 1, p. 379-391, 2019.

CANILHA, L. et al. *Rev. Anal.* **2010**, 44, 48.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Observatório agrícola. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Terceiro Levantamento. 2018. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em 06/01/2019.

EBRAHIM, M. K. et al. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. **Journal of Plant Physiology**, v. 153, n. 5-6, p. 593-602, 1998.

FAGAN, E. B. et al. Lei de Beer e sua relação com a ecofisiologia de plantas. **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**. ISSN, v. 2178, p. 7662, 2013.

FERNANDES, A. C. Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar. 2ndced. Soc. Téc. Açucateiros Bras. Piracicaba, São Paulo, Brasil, 2003.

FERNANDES, Antonio Carlos. Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar. **STAB: Piracicaba, SP, Brasil**, 2011.

FERREIRA JUNIOR, R. A. et al. Cana-de-açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.798-804, 2014.

FERREIRA JUNIOR, R. A. et al. Crescimento e fotossíntese de cana-de-açúcar em função de variáveis biométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.1229-1236, 2012.

FERREIRA JUNIOR, R. A. et al. Energy conversion efficiency in sugarcane under two row spacings in northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 741-747, 2015.

FERREIRA JUNIOR, R. A. **Crescimento, eficiência no uso da radiação e energia de biomassa em cana-de-açúcar irrigada**. 2013. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. São Paulo. 2013.

FLENET, Francis et al. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 2, p. 185-190, 1996.

GALLERGHER, J. N.; BISCOE, P. V. Radiation absorption, growth and yield of cereals. **Journal of Agricultural Science**. New York, v. 91, n. 1, p. 47-60, 1978.

GUERRA, Anderson et al. Efeitos da temperatura do ar na fotossíntese da cana-de-açúcar na fase inicial do desenvolvimento. **Agrarian**, v. 7, n. 24, p. 211-217, 2014.

HIPPS, L. E.; ASRAR, G.; KANEMASU, E. T. Assessing the interception of photosynthetically Active radiation in winter wheat*, **Agricultural and Meteorology**, 28 p. 253-259, 1983.

INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, v. 36, n. 1, p. 41-51, 1994.

INSTRUMENTS, LICOR. Radiation measurement instruments: radiometers, PAR sensors, dataloggers, spectroradiometers, photometers. **Lincoln, 24p.(catálogo)**, 1991.

IQBAL, Muhammad. An introduction to solar radiation. Elsevier, 1983.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R.; DYKE, P. T. **CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development**. Texas AandM University Press, 1986.

KIM, M., e DAY, D. F. 2011. Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. J. Ind. **Microbiol. Biotechnol.** 38:803–807. doi:10.1007/s10295-010-0812-8

LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. A. Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar após aplicação de reguladores vegetais em meio de safra. **Semina: Ciências Agrárias**, v.32, p.129-138, 2011.

LI-COR. LAI-2000 plantcanopyanalyzer: Instruction manual (Nebraska-Li-Cor). 1992. 166 p.

LYRA, G. B. et al. Balanço sequencial de água no solo para o manejo da irrigação de baixa frequência e alta intensidade na cana-de-açúcar. **STAB**, v. 28, 2010b.

LYRA, G. B. et al. Crescimento e produtividade do milho, submetido a doses de nitrogênio nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Ceres**, v. 61, n. 4, 2014.

LYRA, G. B. et al. Modelo de crescimento logístico e exponencial para o milho BR 106, em três épocas de plantio. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.7, p.211-230, 2008.

LYRA, G. B. et al. Modelo de crescimento logístico e exponencial para o milho BR 106, em três épocas de plantio. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 7, n. 03, 2010.

MADDONNI, G. A.; OTEGUI, M. E.; CIRILO, A. G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. **Field Crops Research**, v. 71, n. 3, p. 183-193, 2001.

MATSUOKA, S. et al. I. Bioenergia da Cana. In: **Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Álcool**. (Eds. Santos, F.; Borém, A. e Caldas, C.)2 ed.Viçosa: UFV, v.1. p 487-517, 2012.

McCREE, K. J. The actionspectrum, absorbanceand quantum yieldofphotosynthesis in cropplants. **Agricultural and Meteorology**, 9, p. 191-219, 1972.

McKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002a.

MING, R. et al. Sugarcane Improvement through Breeding and Biotechnology. In: JANICK, J. (ed). **Plant breeding reviews**. New York: John Wiley & Sons, Chap. 2, p. 15-118, 2006.

MONSI, M.; SAEKI, T. On the Factor Light in plant communities and its importance for matter production. **Annals of Botany**, London, v.95, p549–567, 2005.

MONTEITH J. L. **Using tube solarimeters to measure radiation interception by crop canopies and to analyse stand growth**. Pub. Delta-T Devies, document code TSL – AW-4-1, 1993, 11p.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v.281, p.277-294, 1977.

MUCHOW, R. C. et al. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 45, n. 1, p. 37-49, 1994.

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. IAC, 33p., (boletim técnico, 114), 1987.

RIDESA. Censo varietal Brasil, Safra 2016/2017, região Nordeste. Rede Interuniversitária Desenvolvimento Setor Sucroenergético. Disponível em <https://www.ridesa.com.br/censo-varietal>, 2018)

SHIBLES, R.M.; WEBER, C. R. Interception of solar radiation and dry matter production by various planting patterns. **Crop Science**. Madison, v. 6, n. 1, p. 55–59, 1966.

SILVA, A. L. C.; COSTA, W. A. J. M. de. Growth and radiation use efficiency of sugarcane under irrigated and rain-fed conditions in Sri Lanka. **Sugar Tech**, v.14, p.247-254, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s12355-012-0148-y>

SILVA, T. G. F. et al. Índices morfofisiológicos e uso de radiação solar por um cultivo de cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro. **Embrapa Semiárido-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2014.

SINCLAIR, T. R. et al. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v. 88, n. 2-3, p. 171-178, 2004.

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v. 98, n. 2-3, p. 91-97, 2006.

SOUZA, R. C. et al. Growth of the crabgrass species *Digitaria ciliaris* and *Digitaria nuda*. **Planta Daninha**, v.30, p.317-325, 2012.

TEW, T. L.; COBILL, R. M. Genetic improvement of sugarcane (*Saccharum* spp.) as an energy crop. In: **Genetic improvement of bioenergy crops**. Springer, New York, NY, 2008. p. 273-294.

THORNTHWAITE, C. W. **An approach toward a rational classification of climate.** LWW, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p. **Publications in climatology**, v. 8, n. 1.

TOPPA, E. V. B., et al. Aspectos da fisiologia de produção da cana-de-açúcar (*SaccharumOfficinarum* L.). **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, v. 3, n. 3, set - dez. 2010.

WACLAWOVSKY, A. J. et al. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, v.8, p. 263-276, 2010.

WOODARD, K.R., e PRINE, G. M. 1993. Dry matter accumulation of elephantgrass, energycane, and elephantmillet in a subtropical climate. **Crop Sci.** 33:818–824. doi:10.2135/cropsci1993.001118 3X003300040038x

ZHANG, Y.; CHEN, J. M.; MILLER, J. R. Determining digital hemisphericalphotographexposure for leafarea index estimation. **Agriculturaland Forest Meteorology**, v. 133, n. 1-4, p. 166-181, 2005.

ZHOU, M. M. et al. Physiological parameters for modelling differences in canopy development between sugarcane cultivars. In: **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association**. 2003. p. 610-621.

4. CAPÍTULO 2

4.1 CONVERSÃO ENERGÉTICA SOLAR EM ENERGIA DA BIOMASSA PARA CANA-ENERGIA EM CONDIÇÃO TROPICAL

Resumo: Como estratégia para atender a demanda mundial de descarbonização da atmosfera e suprir a demanda de energia no mundo, os programas de melhoramento genético em cana-de-açúcar estão selecionando cultivares com maior potencial produtivo para fins energéticos. O objetivo do presente estudo é avaliar o potencial energético e o teor de cinzas da cana-energia, em condições tropicais, no Nordeste brasileiro. O campo experimental foi composto por 7 genótipos de cana-energia (VX12-1744, VX13-0222, VX13-0805, VX13-2325, VX13-3132, VX13-3450 e VX13-3714) e uma cultivar de cana-de-açúcar (RB92579). O delineamento experimental foi blocos casualizados, com três repetições. O poder calorífico superior, o teor de combustibilidade e o teor de cinzas foi determinado bimestralmente para cada material estudado, para matéria seca total, nas três repetições. A eficiência de conversão de energia foi calculada pela relação entre a energia presente na biomassa ao longo do ciclo e a irradiação fotossintética interceptada, irradiação fotossintética ativa e irradiação global no dossel. O poder calorífico para os genótipos de cana-energia na colheita foi em média 18.716 J g^{-1} e de 18.318 J g^{-1} para RB92579. De acordo com a análise de variância para o poder calorífico superior os genótipos mostraram diferença significativa entre eles apenas aos 201 e aos 362 dias após o transplântio. O coeficiente de variação para poder calorífico superior variou de 0,49 a 2,29%, caracterizando a análise com elevada precisão experimental. A variedade RB92579 produziu 535 GJ ha^{-1} de energia e o genótipo mais produtivo de cana-energia (VX12-1744) produziu 1.069 GJ ha^{-1} , a média dos genótipos de cana-energia foi de 830 GJ ha^{-1} . A RB92579 apresentou o menor teor de cinzas na colheita (2,4%) e o maior teor de combustibilidade (97,6%), de que os genótipos de cana-energia. Os genótipos de cana-energia apresentaram eficiência na conversão de energia fotossintética interceptada em média de 4,16%, com variação de 4,01% (VX13-0222) a 6,05% (VX12-1744).

Palavras-chave: poder calorífico superior, cinzas e combustibilidade.

SOLAR ENERGY CONVERSION IN BIOMASS ENERGY FOR ENERGY CANE TROPICAL CONDITION

Abstract: As a strategy to meet the global demand for decarbonization of the atmosphere and to supply the world's energy demand, sugarcane genetic improvement programs are selecting cultivars with higher productive potential for energy purposes. The aim of this study is to evaluate the energy potential and ash content of sugarcane under tropical conditions in Northeastern Brazil. The experimental field was composed of 7 sugarcane genotypes (VX12-1744, VX13-0222, VX13-0805, VX13-2325, VX13-3132, VX13-3450 and VX13-3714) and a sugarcane cultivar (RB92579). The experimental design was randomized blocks with three replications. The higher calorific value, the combustibility content and the ash content were determined bimonthly for each material studied for total dry matter in the three replicates. The energy conversion efficiency was calculated by the relation between the energy present in the biomass throughout the cycle and the intercepted photosynthetic irradiation, active photosynthetic irradiation and global canopy irradiation. The calorific value for sugar cane genotypes at harvest averaged $18,716 \text{ J g}^{-1}$ and $18,318 \text{ J g}^{-1}$ for RB92579. According to the analysis of variance for the calorific value superior the genotypes showed significant difference between them only at the 201 and the 362 days after the transplantio. The coefficient of variation for higher calorific value varies from 0.49 to 2.29%, characterizing the analysis with high experimental accuracy. The RB92579 variety produced 535 GJ ha^{-1} of energy and the most productive cane-energy genotype (VX12-1744) yielded $1,069 \text{ GJ ha}^{-1}$, the average cane-energy genotype was 830 GJ ha^{-1} . The RB92579 presented the lowest ash content at harvest (2.4%) and the highest combustibility (97.6%), of which sugar cane genotypes. The cane-energy genotypes showed an efficiency in the conversion of intercepted photosynthetic energy of 4.16%, with variation of 4.01% (VX13-0222) to 6.05% (VX12-1744).

Keywords: higher calorific value, ashes and combustibility.

4.1.1 Introdução

O uso em excesso dos insumos energéticos de origem fóssil, como petróleo e carvão mineral, nos últimos anos, provocou um desequilíbrio das condições climáticas do planeta, principalmente devido os gases causadores do efeito estufa (GEE), a alta liberação a qual tem elevado o aumento da temperatura global. Neste sentido, surge à necessidade de estudos em fontes de energia renovável na construção de um futuro energético mais sustentável (BERNDES et al., 2003).

A cana-de-açúcar vem obtendo destaque como uma das melhores opções de fonte de energia renovável, sobretudo devido aos seus resíduos serem utilizado como combustível para a cogeração de eletricidade e calor, e produção de etanol de segunda geração, sem contar com outros derivados (insumo orgânico líquido e sólido, gás carbono, levedura e outros). Como estratégia para atender a demanda mundial de descarbonização da atmosfera e suprir a demanda de energia no mundo os programas de melhoramento genético em cana-de-açúcar está selecionando cultivares com maior potencial produtivo para fins energéticos, denominada de cana-energia (TEW e COBILL, 2008; SOMERVILLE et al., 2010; DIAS et al., 2011; SORDI e MANECHINI, 2013; MATSUOKA et. al., 2014; LONG et. al., 2015; OLIVER e KHANNA, 2017).

O Brasil é o maior produtor dessa matéria-prima (671 milhões de toneladas produzidos em 2009), seguidos por Índia e China, com 285 e 116 milhões de t produzidos em 2009, respectivamente. O rendimento brasileiro, safra 2017/2018, foi de 72,5 t ha⁻¹ (STEDUTO et al., 2012; CONAB, 2018). Quando comparado com o potencial de 381 t ha⁻¹ da cultura, observa-se que o Brasil ainda tem muito a evoluir com genótipos de *Sacharumspp.* adaptado ao país que ofereça eleva capacidade em produzir biomassa com boas características energéticas. Em 2016, a oferta de energia na matriz energética brasileira através de derivados da cana-de-açúcar representou 40% da energia renovável e 17,5% da oferta interna entre fontes renováveis e não renováveis. No cenário nacional de energia elétrica o bagaço de cana gerou 35,2 TWh, dos quais 21,1 TWh foram excedentes para o mercado e 14,1 TWh para o consumo próprio na produção de açúcar e etanol (EPE/MME, 2017).

Os países tropicais apresentam condições favoráveis para o cultivo de plantas C4, como a cana-energia (SURENDRA et al., 2018). O crescimento e desenvolvimento dessa cultura dependem da interação de vários fatores meteorológicos, que incluem

principalmente a disponibilidade hídrica, radiação solar, temperatura e umidade do ar (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005). Porém a ecofisiologia da cana-energia ainda é pouco estudada nos países tropicais e subtropicais que produzem essa bioenergia, portanto pesquisas adicionais para a maior conhecimento desse vegetal é altamente necessário (BOSCHIERO et. al., 2019). Neste sentido, é imprescindível o conhecimento das características energéticas da biomassa para máximo rendimento e aproveitamento das plantas nos processos industriais. Para JENKINS et al. (1998), a fibra da cana-de-açúcar é a parte sólida da planta formada por celulose, hemicelulose, ligninas, pentosanas, pectinas e outros componentes. De acordo com OGATA (2013), a variabilidade genética para os constituintes sólidos da fibra são bastantes variadas: celulose 26,5% a 54,2%, hemicelulose 16,7% a 26% e lignina 17,7% a 27,1%, para 207 clones de cana-energia com elevado teores de fibra.

O poder calorífico juntamente com densidade e composição das plantas são as principais propriedades para caracterização energética da biomassa (SILVA e SANTOS, 2008). Outro ponto importante para escolha da biomassa é o teor de cinzas presente na composição da biomassa, pois essa variável é importante para definir a viabilidade dos processos. Sendo assim, objetivou-se com este estudo avaliar o potencial energético e o teor de cinzas da cana-energia, em condições tropicais, no Nordeste brasileiro.

4.1.2 Material e Métodos

O material e métodos que descrevem local do experimento, características pedológicas, química e física-hídrica do solo, climatologia da região, dados da instalação e manejo agrônômico da montagem do experimento, tratamentos, repetições e estatística, variáveis meteorológicas, evapotranspiração de referência e da cultura, armazenamento de água no solo, radiação global, incidente, interceptada e transmitida, coeficiente de extinção de luz, modelo logístico e graus-dia acumulado estão todos descritos no capítulo 1, nas páginas 36 a 42.

O poder calorífico foi determinado bimestralmente para cada material estudado, para matéria seca total, nas três repetições. Para determinação do poder calorífico superior (PCS) foi utilizada a bomba calorimétrica instalada no Laboratório da EMBRAPA. Nas determinações foram seguidas as normas NBR 8633 da associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1984). Esta norma prescreve o método de

determinação do poder calorífico superior a um volume constante, em calorimétrico adiabático, isotérmico ou estático.

O teor de combustibilidade (CB) e de cinza (CZ) foi determinada para todos os genótipos bimestralmente, nas três repetições. A combustibilidade da biomassa foi expressa a partir da degradação térmica da mesma e significa o quanto do material avaliado possui composição química favorável a produção de energia. Para determinar o teor de cinzas as amostras dos genótipos foram passadas na forrageira, seca em estufa a 105 °C, triturada no moinho de Willey. Em seguida foi pesada uma alíquota de 2,5 gramas, e incinerada em cadinhos de porcelana de 600 °C por quatro horas em mufla. As amostras foram resfriadas a temperatura ambiente em dessecadores e pesadas novamente. O teor de cinzas foi determinado pela porcentagem do material que foi incinerado e o teor de combustibilidade foi calculado subtraindo a porcentagem de cinza de 100 (OLIVEIRA et. al, 2014).

A eficiência de conversão de energia (ECE) foi calculada pela relação entre a energia presente na biomassa ao longo do ciclo (PCS, MJ g⁻¹ x BS, g m⁻²) e a irradiação fotossintética interceptada (HF_Int, MJ m⁻²), irradiação fotossintética ativa (HFA, MJ m⁻²) e irradiação global (Hg, MJ m⁻²) no dossel, conforme FERREIRA JUNIOR et. al (2015). Para a determinação do ponto máximo de energia presente na biomassa ao longo do ciclo (BS, GJ ha⁻¹) foi realizada a regressão pelo modelo logístico em função dos graus-dia acumulados (GDA) Equação 9.

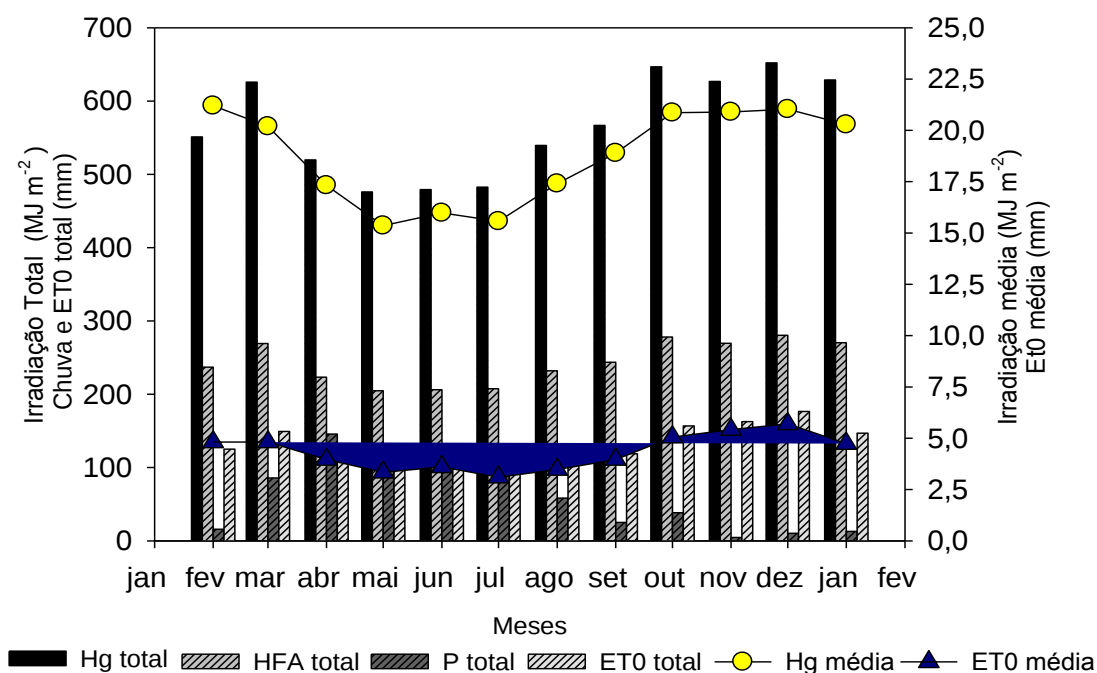
4.1.3 Resultados e Discussão

A irradiação global média variou de 15,36 MJ m⁻² a 21,20 MJ m⁻², nos meses de maio e fevereiro, respectivamente. A irradiação global média do cultivo foi de 18,75 MJ m⁻². O maior acumulo de irradiação global ocorreu no mês de dezembro (652,01 MJ m⁻²) e o menor acumulo em maio (476,02 MJ m⁻²). O total de irradiação global foi de 6.795 MJ m⁻², enquanto que a irradiação fotossintética ativa foi de 2.921 MJ m⁻², com média mensal de 243,50 MJ m⁻² (Figura 16).

A evapotranspiração de referencia (ET₀) mensal variou de 96,20 mm (julho) a 176,62 mm (dezembro), com média de 130,92 mm. Os valores de ET₀ médio diario foi de 4,33 mm, com variação de 3,10 a 5,70 mm. A ET₀ acumulada durante o ciclo foi de 1.571 mm. Nesse periodo houve 146 dias com precipitação pluvial, em média 4,87 mm, porem 216 dias não houveram chuvas. A precipitação total foi de 711 mm.

A irrigação durante o cultivo foi de 290 mm, totalizando aproximadamente 1.000 mm com a água da chuva. Entretanto o total da evapotranspiração da cultura (ETc) foi de 1.567 mm. De acordo com o balanço hídrico houveram 800 mm de déficit hídrico mais acentuado nos meses de setembro (95 mm), outubro (102 mm), novembro (135 mm), dezembro (201 mm) e janeiro (103 mm), somando 636 mm nos 5 meses. A ETc média mensal variou de 1,72 mm no mês do transplante (fevereiro) a 6,90 mm em dezembro. O total de ETc mensal variou de 50,1 mm a 213,7 mm. Os meses de agosto a janeiro houve a maior demanda hídrica da planta e a maior disponibilidade de irradiação para o cultivo, mas foi quando ocorreu déficit hídrico no solo. Os meses de fevereiro a julho foi a estação chuvosa da região e ocorreu excesso de água na zona radicular da planta, nesse período choveu aproximadamente 80% da precipitação pluvial total do ciclo (Figura 17).

Figura 16. Elementos meteorológicos: irradiação global (Hg) e fotossintética (HFA), precipitação pluvial (P), evapotranspiração de referência (ET0), por mês, durante o cultivo de cana na região de Teotônio Vilela em Alagoas.

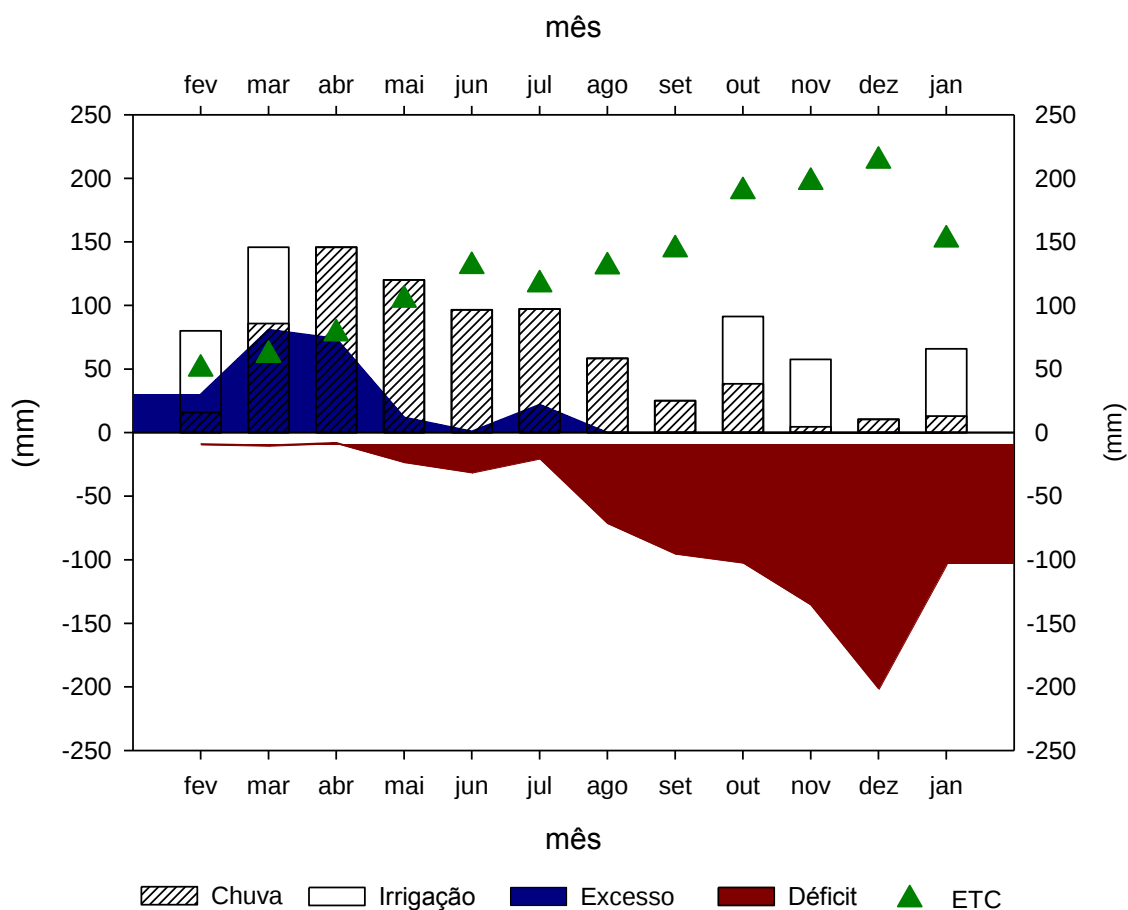


A temperatura média do ar (Tmed) durante o ciclo da cultura variou de 22,82 a 27,54 °C, nos meses de agosto e março, na mesma ordem, enquanto a mínima e a máxima da temperatura do ar alcançou valores de 16,78 e 35,43 °C, nos meses de julho e outubro, respectivamente. A umidade relativa do ar média (URmed) apresentou média

durante o ciclo de 79,53%, com mínima e máxima de 71,64 e 88,05%, nos meses de fevereiro e julho. Apesar da temperatura do ar exercer influência no metabolismo das plantas, a temperatura durante o ciclo não foi um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento do vegetal (EBRAHIM et al. 1998 e GUERRA et al. 2014).

A irradiação fotossintética interceptada pelos genótipos variaram de 1.921 MJ m⁻² (VX13-0222) a 2.271 MJ m⁻² (VX13-0805), com média de 2.771 MJ m⁻² para os genótipos de cana-energia e 1.939 MJ m⁻² para a RB92579. FERREIRA JUNIOR et al. (2015) encontraram valores acumulo máximo de irradiação interceptada de 2.776 MJ m⁻², na região de Rio Largo, Alagoas.

Figura 17. Balanço hídrico do cultivo com deficit hídrico, excesso hídrico, precipitação pluvial (P), irrigação (I) e evapotranspiração da cultura (ETC) mensal, durante o cultivo de cana na região de Teotônio Vilela em Alagoas.



O poder calorífico superior (PCS) para os genótipos de cana-energia variou de 18.039 J g⁻¹ (VX13-2325 aos 328 DAT) a 19.387 J g⁻¹ (VX13-3450 aos 266 DAT), com

média de 18.628 J g⁻¹. A cana-de-açúcar apresentou média de 18.518 e variou de 17.991 (328 DAT) a 19.422 (266 DAT). De acordo com a análise de variância para genótipos apenas aos 201 e aos 362 DAT os materiais genéticos mostraram diferença significativa entre eles. O coeficiente de variação da análise variaram de 0,49 (201 DAT) a 2,29% (266 DAT), caracterizando a análise estatística com elevada precisão experimental (Tabela 14). Conforme o teste de Tukey (p<0,05), aos 201 DAT, o genótipo VX13-3132 apresentou o maior PCS (18.912 J g⁻¹) e diferiu dos genótipos VX13-3714 e RB92579 que apresentaram os menos valores, 18.622 e 18.631 J g⁻¹, respectivamente. Os demais clones não diferiu entre si. Aos 362 DAT, o clone VX13-0805 apresentou o maior PCS (19.006 J g⁻¹) e diferiu da RB92579 que apresentou o menor PCS (18.318 J g⁻¹). Os demais não diferiram entre si (Tabela 15).

Tabela 14. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de genótipos de cana-energia e cana-se-açúcar para poder calorífico superior (PCS), ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	PCS (145)	PCS (201)	PCS (266)	PCS (329)	PCS (362)
Genótipos	7	18.724,8ns	34.973,04*	40.7803,6ns	56.231,9ns	147.967,09*
Blocos	2	203.792,20	5.996,92	282.700,29	89.381,54	6.108,50
Resíduo	14	13.581,23	8.508,13	189.741,10	65.583,3	50.537,21
CV (%)		0,64	0,49	2,29	1,41	1,20
Média geral		18.324	18.759	19.002	18.182	18.806

Notas:^{ns}Não significativo a p<0,05 pelo teste F; **Significativo a p<0,01 pelo teste F; *Significativo a p<0,05 pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

Tabela 15. Teste de média dos genótipos de cana para poder calorífico superior ao longo do ciclo.

Tratamentos	PCS (145) J g ⁻¹	PCS (201) J g ⁻¹	PCS (266) J g ⁻¹	PCS (329) J g ⁻¹	PCS (362) J g ⁻¹	Média
RB92579	18.227a	18.631a	19.422a	17.991a	18.318a	18.518
VX12-1744	18.429a	18.831ab	18.386a	18.322a	18.953ab	18.584
VX13-0222	18.311a	18.808ab	18.790a	18.044a	18.892ab	18.569
VX13-0805	18.225a	18.811ab	19.114a	18.275a	19.006 b	18.867
VX13-2325	18.393a	18.654ab	19.021a	18.038a	18.922ab	18.606
VX13-3132	18.405a	18.912 b	19.252a	18.225a	18.801ab	18.719
VX13-3450	18.320a	18.800ab	19.387a	18.335a	18.672ab	18.703
VX13-3714	18.279a	18.622a	18.646a	18.220a	18.887ab	18.531
Média	18.324	18.759	19.002	18.182	18.806	18.614

Notas: Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey considerando o nível nominal de significância de 5% de probabilidade.

Os genótipos de forma geral apresentaram maior média de PCS aos 266 DAT. Porém, as regressão em função dos dias após o transplante, apenas os genótipos RB92579, VX13-0805, VX13-3132 e VX13-3450 houveram diferença significativa

para função quadrática, pelo teste F, ao nível de 1% de probabilidade de erro, com coeficiente de determinação (R^2) variando de 0,31 a 0,52. Os demais genótipos não apresentaram ajustes aos longo do ciclo, isso significa que os dias após o transplântio não altera o PCS. Para os genótipos que apresentaram ajustes significativo, o melhor ponto para análise é aos 249, 280, 255 e 258 DAT, para os genótipos RB92579, VX13-0805, VX13-3132 e VX13-3450, na mesma ordem. De acordo com análise de variância, os coeficientes de variação variaram de 0,59% (VX13-0805) a 1,74% (VX-132325), demonstrando elevado precisão experimental (Tabela 16 e Figura 18).

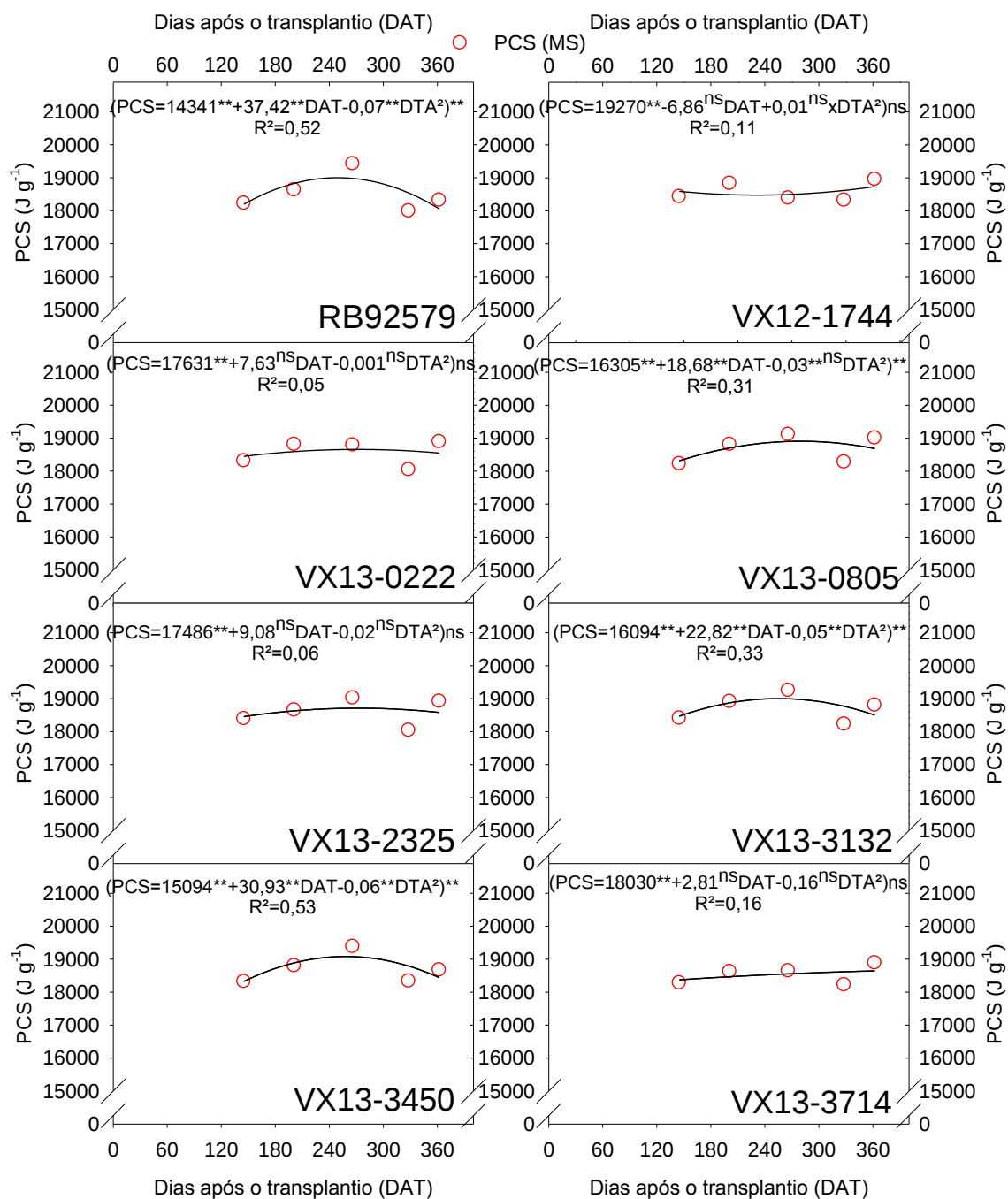
Tabela 16. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de dias após o plantio dos genótipos de cana para poder calorífico superior ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	RB92579	VX12-1744	VX13-0222	VX13-0805
Quadrados Médios					
DAT	5	924.856,71**	246.955,83**	414.592,20*	511.288,34**
Bloco	2	25.226,51	13.444,39	257.892,70	30.117,66
Resíduo	10	55.887,16	21.023,94	66.451,18	11.976,77
<i>Regressão Linear</i>	1	56.645,38ns	44.100,90ns	17.639,06ns	258.807,20**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	1.865.237**	72.603,38ns	66.333,63ns	370.952,66**
<i>Desvio de regressão</i>	3	888.771,81	435.559,52	787.198,05	707.696,76
CV (%)		1,28	0,78	1,39	0,59
Média geral		18.518	18.584	18.569	18.687
FV1	GL2	VX13-2325	VX13-3132	VX13-3450	VX13-3714
Quadrados Médios					
DAT	5	481.288,65*	502.796,03**	569.570,81**	230.685,13ns
Bloco	2	376.358,81	38.990,90	7.556,35	381.153,57
Resíduo	10	105.145,59	39.985,72	19.928,57	117.284,98
<i>Regressão Linear</i>	1	27.968,29ns	468,35ns	17.951,61ns	143.528,98ns
<i>Regressão Quadrática</i>	1	93.151,82ns	661.564,46**	1.189.516,23**	3.211,59ns
<i>Desvio de regressão</i>	3	902.017,25	674.575,65	535.407,70	387.999,96
CV (%)		1,74	1,07	0,75	1,85
Média geral		18.606	18.719	18.703	18.531

Notas:^{ns}Não significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; **Significativo a $p < 0,01$ pelo teste F; *Significativo a $p < 0,01$ pelo teste F;¹Fonte de variação;²Graus de liberdade.

Valores aproximados de PCS foi encontrado por FERREIRA JUNIOR et al. (2015) trabalhando com a variedade RB98710, encontraram calor específico de combustão de 15.600 a 16.300 J g⁻¹. JENKINS et al. (1998), encontraram valores de 19.590 J g⁻¹ para bagaço de cana-de-açúcar, em comparação uma forrageira cultivada nos Estados Unidos (switchgrass) de 18.060 J g⁻¹, palha de arroz de 15.090, casca de arroz de 15.840 J g⁻¹, palha de trigo de 17.940 J g⁻¹, parte vegetativa de alfafa de 18.670 J g⁻¹ e madeira de salgueiro de 19.590 J g⁻¹. McKENDRY (2002a) concluiu que o conteúdo energético da biomassa, em base seca e isenta de cinzas é semelhante para todas as espécies de plantas, situado na faixa 17.000 a 21.000 J g⁻¹.

Figura 18. Poder calorífico superior (PCS) ao longo do ciclo para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar.



Notas: ns, dentro do parêntese, o coeficiente não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese, a equação não é significativa pelo teste F, $p < 0,05$; **, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$; *, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$.

A variedade RB92579 apresentou média de 2,9% de cinza (CZ) na biomassa, durante o ciclo variou de 2,3 (266 DAT) a 3,5% (145 DAT), os clones de cana-energia variaram de 3,0 (VX13-3132 aos 266 DAT) a 5,4% (VX13-3714 aos 145 DAP), com média de 4,2%. De forma geral os genótipos apresentam maior teor de cinzas no início do ciclo, aos 145 DAT. De acordo com a análise de variância ($p < 0,05$), para as variáveis em função dos dias após o transplante, apenas os genótipos VX13-0805, VX13-3450 e VX13-3714 não foram significativos para a ANAVA ($p < 0,05$). O CV ficou entre 6,01% (VX13-0222) a 14,78% (VX13-3132). Os demais genótipos apresentaram tendência linear decrescente (Tabela 17 e Figura 19). A combustibilidade (CB) no decorrer do ciclo variou de 96,5 a 97,7%, com média de 97,1% para a variedade RB92579 e para os clones de cana-energia variaram de 94,6 a 97,0%, com média de 95,8%. De forma geral os clones de cana-energia apresentaram teor de cinzas maior de que a RB92579 e para o teor de combustibilidade a RB92579 é 1,3% mais combustível de que os clones de cana-energia. Os genótipos que apresentaram diferença significativa, de acordo com teste F ($p < 0,05$) para cinzas foram os mesmos que apresentou para combustibilidade, porém com tendência linear positiva ao longo do ciclo. Os coeficientes de determinação para combustibilidade e cinzas variaram de 0,38 a 0,66. Para os genótipos que apresentaram ajustes significativos, todos os coeficientes da equação apresentaram diferença significativa, pelo teste t, com $p < 0,01$. O CV da análise de variância ficou abaixo de 0,66% (Tabela 17 e Figura 19).

Para os genótipos, o teor de cinzas e combustibilidade apresentaram diferença significativa para todas as épocas analisadas, pelo teste F, com exceção aos 362 DAT que não apresentou pela análise de variância, mas para o teste de Tukey ($p < 0,05$), os genótipos diferiram entre si. O CV variou de 8,93 (266 DAT) a 18,40% (362 DAT). Para combustibilidade CV variou de 0,32 a 0,68 (Tabela 18). Aos 145 DAT a RB92579 apresentou o menor valor de cinzas e maior de combustibilidade (3,5 e 96,5%) e diferiu pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), do VX13-3714. Aos 201 DAT, RB92579 apresentou o menor valor 3,4% de CZ e o maior para CB (96,6%) e não diferiu dos genótipos VX13-0222, VX13-0805, VX13-3132. Aos 266 DAT, os genótipos VX13-3450 e VX13-3714 apresentaram os maiores valores de CZ e o menor de CB e diferiram dos genótipos VX13-3132 e RB92579. Aos 328 e 362 DAT, RB92579 apresentou o menor valor de CZ e maior de CB e diferiu do VX13-3714 (Tabela 19 e 20).

Tabela 17. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de dias após o plantio dos genótipos de cana para cinzas e combustibilidade ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	RB92579	VX12-1744	VX13-0222	VX13-0805
Quadrados Médios					
DAT	5	0,9392**	2,0456**	1,2224**	1,0856**
Bloco	2	0,1566	0,4025	0,1041	0,5724
Resíduo	10	0,0428	0,1325	0,0660	0,3787
<i>Regressão Linear</i>	1	1,9421**	5,3699**	1,8464**	0,8696**
<i>Regressão Quadrática</i>	1	0,1175ns	0,0005ns	0,0652ns	0,3911ns
<i>Desvio de regressão</i>	3	0,8486	1,4060	1,4890	1,5409
CV (%)		7,03 (0,21)	8,79 (0,38)	6,01 (0,27)	14,72 (0,64)
Média geral		2,9 (97,1)	4,1 (95,9)	4,3 (95,7)	4,2 (95,8)
FV1	GL2	VX13-2325	VX13-3132	VX13-3450	VX13-3714
Quadrados Médios					
DAT	5	2,1299**	0,7462ns	0,8466ns	0,8948ns
Bloco	2	0,4850	1,7471	1,3442	0,1990
Resíduo	10	0,3085	0,2751	0,2484	0,3999
<i>Regressão Linear</i>	1	5,6528**	1,8412ns	0,6809ns	1,1025ns
<i>Regressão Quadrática</i>	1	0,6661ns	0,3590ns	0,1389ns	0,5849ns
<i>Desvio de regressão</i>	3	2,2008	0,3923	5,165	0,9459
CV (%)		13,20 (0,58)	14,78 (0,54)	11,05 (0,52)	13,10 (0,66)
Média geral		4,2 (95,8)	3,5 (96,5)	4,5 (95,5)	4,8 (95,2)

Notas:^{ns}Não significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; **Significativo a $p < 0,01$ pelo teste F; *Significativo a $p < 0,01$ pelo teste F;¹Fonte de variação;²Graus de liberdade. Valores de CV e média dentro de parênteses é combustibilidade e fora é cinzas.

Tabela 18. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de genótipos de cana para cinzas (CZ) e Combustibilidade (CB), ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	CZeCB (145)	CZeCB (201)	CZeCB (266)	CZeCB (328)	CZeCB (362)
Genótipos	7	1,124**	1,295**	1,058**	1,628*	1,029 ^{ns}
Blocos	2	0,899	0,275	0,646	0,665	0,720
Resíduo	14	0,190	0,200	0,096	0,426	0,404
CV (%)		9,36 (0,46)	9,81 (0,47)	8,93 (0,32)	15,33 (0,68)	18,40 (0,66)
Média geral		4,7 (95,3)	4,6 (95,4)	3,6 (96,4)	4,3 (95,7)	3,5 (96,5)

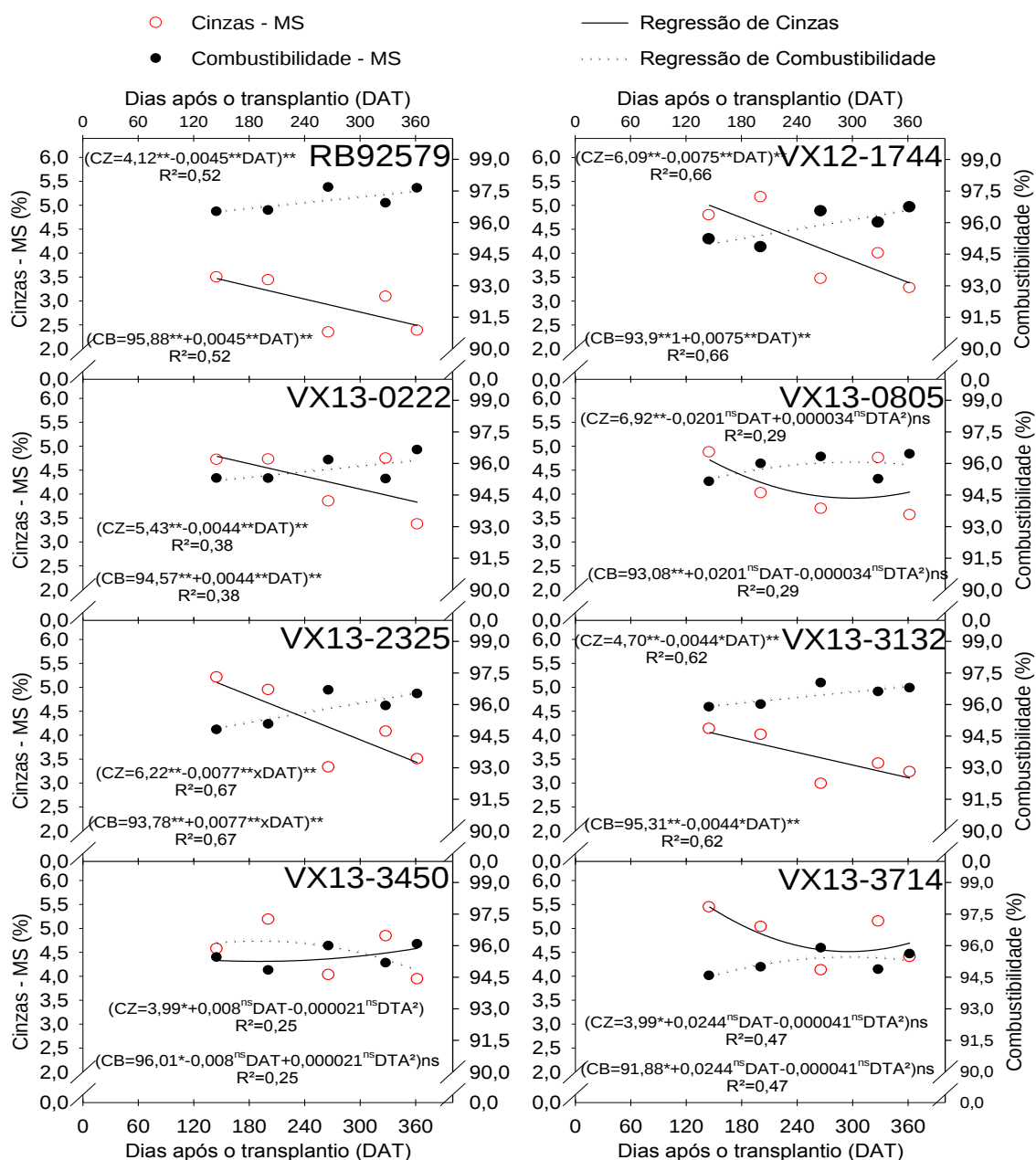
Notas:^{ns}Não significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; **Significativo a $p < 0,01$ pelo teste F; *Significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; ¹Fonte de variação;²Graus de liberdade. Valores de CV e média dentro de parênteses é combustibilidade e fora é cinzas.

Tabela 19. Efeito dos genótipos de cana para cinzas (CZ), ao longo do ciclo.

Tratamentos	CZ (%) (145)	CZ (%) (201)	CZ (%) (266)	CZ (%) (328)	CZ (%) (362)	Média
RB92579	3,5 a	3,4 a	2,3 a	3,1 a	2,4 a	2,9
VX12-1744	4,8bc	5,2b	3,5 bc	4,0ab	3,3 ab	4,1
VX13-0222	4,7 abc	4,7 ab	3,8 bc	4,7ab	3,4 ab	4,3
VX13-0805	4,9 bc	4,0 ab	3,7 bc	4,7ab	3,6ab	4,2
VX13-2325	5,2bc	4,9 b	3,3bc	4,1 ab	3,5ab	4,2
VX13-3132	4,1 ab	4,1 ab	3,0 ab	3,4ab	3,2ab	3,5
VX13-3450	4,6 abc	5,2b	4,0c	4,8ab	3,9ab	4,5
VX13-3714	5,4c	5,0 b	4,1 c	5,1 b	4,4b	4,8
Média	4,7	4,6	3,5	4,3	3,5	4,1

Notas: Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey considerando o nível nominal de significância de 5% de probabilidade.

Figura 19. Cinzas e combustibilidade ao longo do ciclo para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar.



Notas: ns, dentro do parêntese, o coeficiente não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese, a equação não é significativa pelo teste F, $p < 0,05$; **, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$; *, dentro do parêntese, o coeficiente da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ e fora do parêntese a equação é significativa pelo teste F, $p < 0,01$.

Tabela 20. Efeito dos genótipos de cana para combustibilidade (CB), ao longo do ciclo.

Tratamentos	CB (%) (145)	CB (%) (201)	CB (%) (266)	CB (%) (328)	CB (%) (362)	Média
RB92579	96,5 a	96,6 a	97,7 a	96,9 a	97,6 a	97,1
VX12-1744	95,2bc	94,8 b	96,5bc	96,0ab	96,7ab	95,9
VX13-0222	95,3 abc	95,3ab	96,2 bc	95,3ab	96,6 ab	95,7
VX13-0805	95,1bc	96,0 ab	96,3 bc	95,3ab	96,4ab	95,8
VX13-2325	94,8bc	95,1 b	96,7bc	95,9ab	96,5ab	95,8
VX13-3132	95,9 ab	95,9 ab	97,0ab	96,6ab	96,8ab	96,5
VX13-3450	95,4abc	94,8 b	96,0c	95,2ab	96,1ab	95,5
VX13-3714	94,6 c	95,5 b	95,9c	94,9 b	95,6 b	95,2
Média	95,3	95,4	96,5	95,7	96,5	95,9

Notas: Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey considerando o nível nominal de significância de 5% de probabilidade.

SINGH et al. (2015) corroborando com essa pesquisa estudando composição mineral de culturas com potencial para bioenergia, três locais distintos na Flórida, encontraram valores com interação entre as espécies e o local, observaram que a cana-de-açúcar apresentou menor teor de cinzas, e justificou que poderia ser devido a diluição mineral por hidratos de carbono solúveis relativamente elevados nos tecidos, em média encontraram 2,8% para cana-de-açúcar e 4,2% para outras espécies, incluindo cana-energia.

IRVINE e BENDA (1979) determinaram a composição do bagaço da fibra de cana-de-açúcar, no estudo encontraram o valor de 2,0% de cinzas e 98,0% de combustibilidade, com base no peso seco. OLIVEIRA (2014) encontrou valores superiores a esses autores trabalhando com amostra de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar em duas unidades industriais em Mato Grosso do Sul, os valores do teor de cinzas variaram de 1,4% a 4,0%, indicando que nas unidades o bagaço possuía o potencial de geração de calor de 96,0% a 98,6%. JENKINS et al. (1998) encontraram valores de 2,4% de cinza no bagaço de cana-de-açúcar, em comparação uma forrageira cultivada nos Estados Unidos (switchgrass) de 9,0%, palha de arroz de 18,7%, casca de arroz de 20,3%, palha de trigo de 7,0%, parte vegetativa de alfafa de 5,7% e madeira de salgueiro de 1,7%. A cultura analisada pelos autores possui de 79,7% (palha de trigo) a 98,3% (madeira de salgueiro) de combustibilidade, o bagaço da cana-de-açúcar apresentou 97,6% de conversão de calor. BIZZO et al. (2014) corroborando com esse trabalho encontraram em sua pesquisa com bagaço de cana-de-açúcar, valor de cinza variando de 2,9 a 7,5% e em sua revisão apresentam valores de 2,0%, 2,4%, 3,6%, 4,0%, 5,0% e 7,4%. De acordo com JACOME (2014) os valores de cinzas são muito variados e pode esta associado com as técnicas de colheita da biomassa, limpeza ou lavagem ou a composição da própria biomassa, o autor ressalta que as causas devem ser

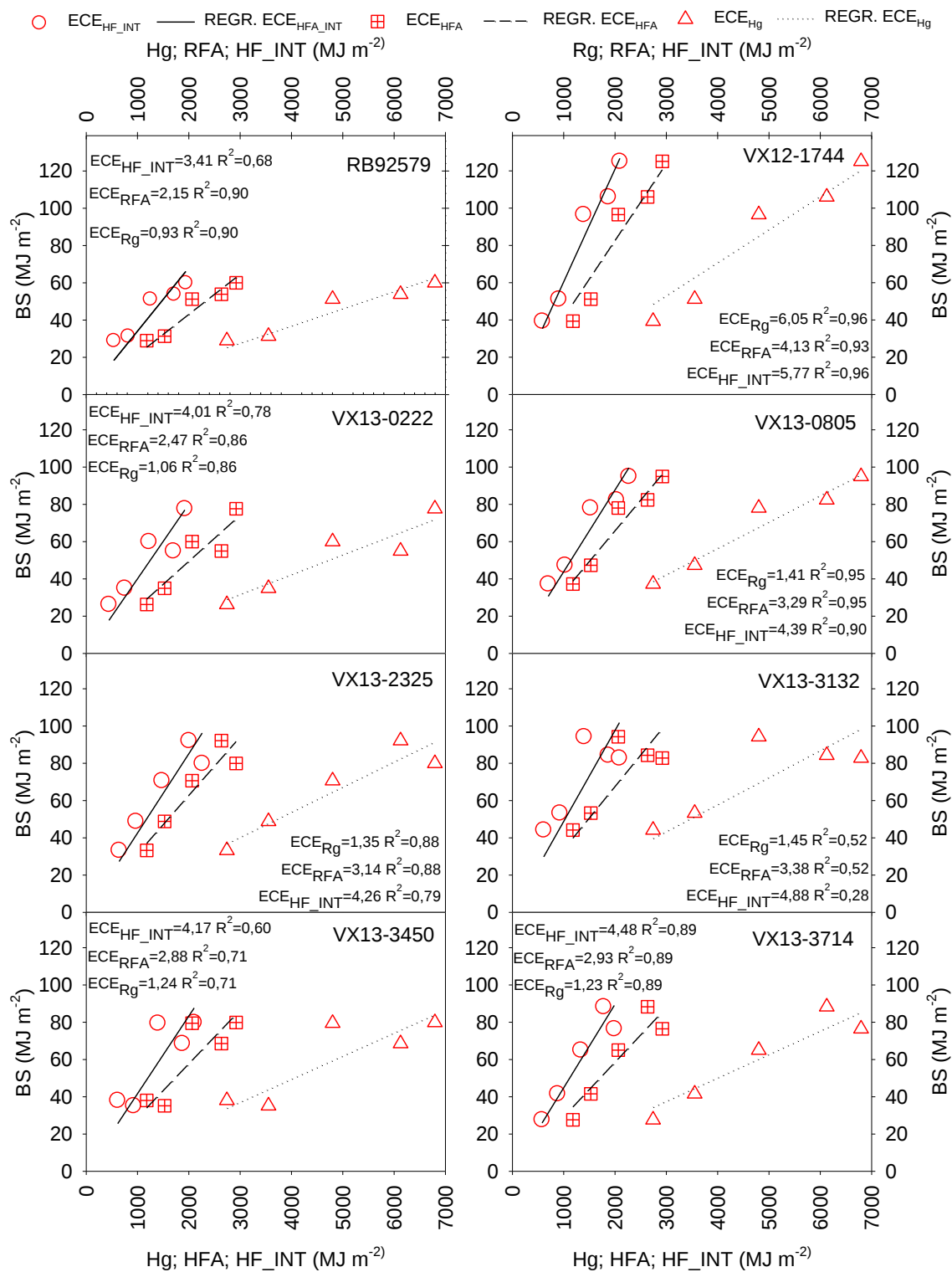
investigadas pois o teor de cinzas estão diretamente ligado aos problemas de incrustações nas caldeira. Conforme **McKENDRY (2002b)** concentração de cinzas acima de 50 g kg^{-1} é geralmente inacetável para os processos termoquímicos como gaseificação. Em outras pesquisas os resíduos de cinzas estão sendo estudado como aditivo em cimentos e em construção civil (**PAULA et al., 2008; NUNES et al., 2010; LIMA et al., 2011; MARTINS FILHO et. al, 2017**).

A eficiência de conversão de energia em biomassa realizada pela irradiação interceptada (HF_{INT}), para os genótipos de cana-energia variou de 4,01% (VX13-0222) a 6,05% (VX12-1744), com média de 4,16%. Os clones de cana-energia apresentaram 32% mais eficiente em converter a energia fotossintética interceptada em energia da biomassa, do que a RB92579 (3,41%), quando comparado com o genótipo mais eficiente de cana-energia, a variedade de cana-de-açúcar foi superada em aproximadamente 77% (**Figura 20**).

Quando a eficiência de conversão de energia é realizada pela irradiação fotossintética ativa (ECE_{HFA}) a RB92579 apresentou 2,15% de eficiência, enquanto os genótipos de cana-energia variaram de 2,47% (VX13-3450) a 4,13% (VX12-1744), com média de 3,17. Em média os genótipos de cana-energia foram 48% mais eficiente e quando comparado com VX12-1744 foi 92% mais de que a RB92579. A diferença foi ainda maior, pois a ECE_{HF_INT} , leva em consideração os parâmetros de coeficiente de extinção de luz e IAF, como os genótipos de cana-energia pela sua arquitetura e sua massa foliar são mais eficientes em captar a irradiação, eles interceptam mais radiação e a diferença da ECE torna-se menor quando comparado com a irradiação fotossintética interceptada. A eficiência na conversão de energia pela irradiação global foi 43% da ECE_{HFA} , pois na região do estudo a relação entre HFA e a Hg é de 43%.

De acordo com **TEW e COBILL (2008)** a máxima eficiência líquida teórica do processo fotossintético de conversão de energia solar em biomassa em plantas C4 é estimada de 6 a 7%. O autor ainda faz analogia as plantas C3 e afirma devido a fotorrespiração em C3, o valor de referencia para estas plantas é de aproximadamente 3%. A vantagem relativa das plantas C4 sobre as C3 depende da altitude e quanto mais tropical o ambiente maior será a vantagem. Corroborando com os resultados desse trabalho, **FERREIRA JUNIOR et al. (2015)**, encontraram valores variando de 4,4 a 4,5% para dois espaçamentos com a variedade RB98710, utilizando poder calorífico superior e a irradiação fotossintética interceptada. Quando comparado com a irradiação global os valores varia de 2,4 a 2,5%.

Figura 20. Eficiência na conversão de energia solar em biomassa (ECE) para irradiação fotossintética interceptada (HF_INT), irradiação fotossintética ativa (HFA) e irradiação global (Hg), para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar.



Notas: ns, o parâmetro não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ **, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e *, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$.

Para energia por hectare, conforme a análise de variância ($p < 0,05$) apenas as épocas 329 e 362 DAT foram significativas. As demais épocas os genótipos não foram significativos. Os CV variaram de 12,50 (329 DAT) a 18,66% (266 DAT) [Tabela 21](#). Aos 145, 201 e 266 DAT, os genótipos não apresentaram diferença pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), as médias no decorrer das épocas foram crescentes, 308,51; 452,26 e 689,67 GJ ha⁻¹. Aos 329 DAT a RB92579 apresentou o menor valor (514,29 GJ ha⁻¹) e diferiu pelo teste Tukey ($p < 0,05$) do VX12-1744 (1.069,21 GJ ha⁻¹), esse foi estatisticamente igual ao VX13-0805 (821,35 GJ ha⁻¹) e VX13-2325 (843,40 GJ ha⁻¹). No momento da colheita a RB92579 apresentou o menor valor (530,20 GJ ha⁻¹), mas não diferiu do VX13-3450 (628,92 GJ ha⁻¹), esses dois diferiram do VX13-0805 (985,33 GJ ha⁻¹) que apresentou o maior valor, os demais materiais não apresentaram diferença estatística entre eles ([Tabela 22](#)).

Tabela 21. Quadrados médios pela análise da variância dos efeitos de genótipos de cana-energia para energia por hectare (GJ ha⁻¹), ao longo do ciclo.

FV ¹	GL ²	GJ ha ⁻¹ (145)	GJ ha ⁻¹ (201)	GJ ha ⁻¹ (266)	GJ ha ⁻¹ (329)	GJ ha ⁻¹ (362)
Genótipos	7	4.445,76ns	14.810,84ns	38.589,85ns	83.369,71**	66.432,15**
Blocos	2	18.043,67	30.099,48	6.956,73	5.582,99	13.330,26
Resíduo	14	2.476,86	10.144,07	16.554,75	8.907,96	13.854,37
CV (%)		16,13	22,27	18,66	12,50	16,04
Média geral		308,51	452,26	689,67	755,08	733,86

Notas: ^{ns}Não significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; ^{**}Significativo a $p < 0,01$ pelo teste F; ^{*}Significativo a $p < 0,05$ pelo teste F; ¹Fonte de variação; ²Graus de liberdade.

Tabela 22. Teste de média dos genótipos de cana para energia por hectare ao longo do ciclo.

Tratamentos	GJ ha ⁻¹ (145)	GJ ha ⁻¹ ¹ (201)	GJ ha ⁻¹ ¹ (266)	GJ ha ⁻¹ ¹ (329)	GJ ha ⁻¹ ¹ (362)	Média
RB92579	272,22a	392,04a	503,75a	514,29a	530,20a	442,50
VX12-1744	343,72a	479,21a	859,07a	1.069,21c	869,11ab	724,06
VX13-0222	250,50a	382,20a	663,03a	697,02ab	606,93a	519,94
VX13-0805	301,48a	541,44a	698,90a	821,35bc	985,33b	669,70
VX13-2325	307,15a	426,55a	741,43a	843,40bc	801,56ab	624,02
VX13-3132	372,67a	550,51a	807,95a	772,38ab	732,20ab	647,14
VX13-3450	298,88a	370,94a	626,93a	614,10ab	628,92a	507,95
VX13-3714	321,48a	474,62a	616,31a	708,89ab	716,68ab	567,60
Média	308,51	452,26	689,67	755,08	733,86	587,86

Notas: Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey considerando o nível nominal de significância de 5% de probabilidade.

De acordo com o modelo logístico a energia final da variedade RB92579 foi 535,01 GJ ha⁻¹, enquanto os genótipos de cana-energia produziram em média 55% a

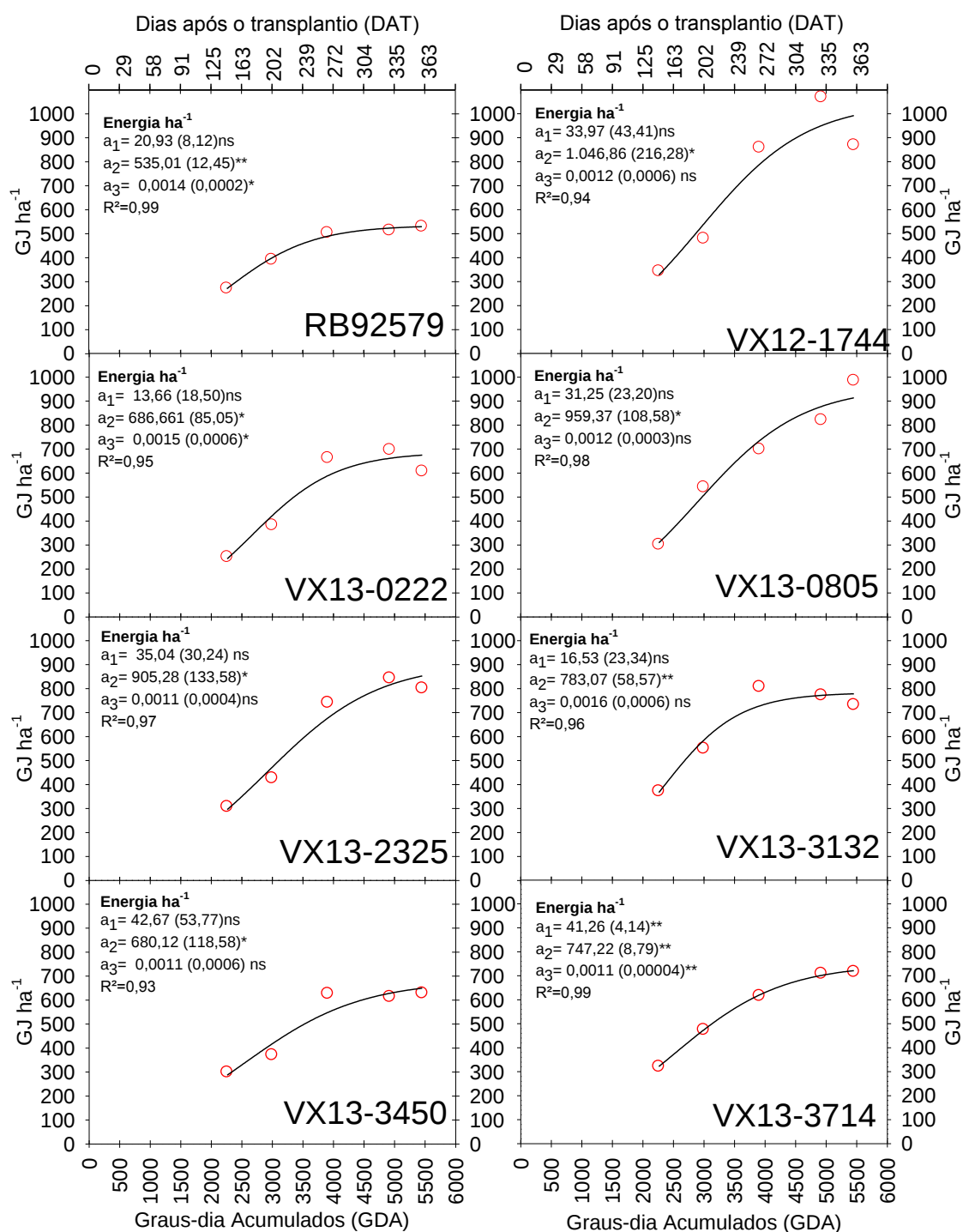
mais (829,8 GJ ha⁻¹). Os clones de cana-energia variaram de 680,12 GJ ha⁻¹(VX13-3450) a 1.046,9 GJ ha⁻¹ (VX12-1744), esse último produziu aproximadamente o dobro de energia por hectare comparado com RB92579 (Figura 21). Os parâmetros de energia final (a1), energia inicial (a2) e taxa máxima de crescimento relativo (a3) foram significativos pelo teste t ($p < 0,05$). Os coeficientes de determinação apresentaram valores acima de 0,84.

Os ajustes das equações são mais bem interpretados em função dos graus-dia acumulados porque o crescimento e o desenvolvimento dos genótipos são influenciados pelas variáveis climatológicas, principalmente por chuva e temperatura do ar, por isso os dias ao longo do ciclo sem quantificar as variáveis meteorológicas ficam de difícil interpretação dos resultados, pois não expressam significado biológico dos vegetais.

Em síntese os genótipos de cana-energia apresentaram maior poder calorífico superior, maior quantidade de cinzas, consequentemente menor combustibilidade, maior eficiência na conversão de energia fotossintética solar em biomassa e maior quantidade de energia gerada por hectare.

TEW e COBILL et al. (2008) citam valores de energia na biomassa por hectare para cultura da cana-de-açúcar variando de 220,9 GJ ha⁻¹ a 626,3 GJ ha⁻¹, na Tailândia e nos Estados Unidos, respectivamente. A taxa mais eficiente no balanço de entrada e saída foi o Brasil com taxa de 3,4. No Marrocos onde foi conduzida a pesquisa o valor foi de 359,0 GJ ha⁻¹. Esses valores ficaram próximo ao dessa pesquisa quando comparado com cana-de-açúcar, para cana-energia não foi encontrado dados na literatura para fazer a comparação.

Figura 21. Acúmulo de biomassa em forma de energia (BS, GJ ha⁻¹), em função dos graus-dia acumulado, para os genótipos de cana-energia e cana-de-açúcar.



Notas: ns, o parâmetro não é significativo pelo teste t, $p < 0,05$ **, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,01$ e *, o parâmetro da equação é significativo pelo teste t, $p < 0,05$.

4.1.4 Conclusões

O poder calorífico para os genótipos de cana-energia na colheita foi superior a RB92579. Os genótipos VX13-3132 e VX13-0805 apresentaram valores mínimos e máximos de poder calorífico superior, respectivamente. O genótipo VX12-1744 produziu aproximadamente o dobro de energia por hectare quando comparado com a variedade de cana-de-açúcar. A RB92579 apresentou o menor teor de cinzas na colheita e o maior teor de combustibilidade, de que os genótipos de cana-energia.

Os genótipos de cana-energia apresentaram o maior potencial de conversão energética solar em energia da biomassa. Conclui-se, a cana-energia apresentou como alternativa para geração de energia ou produção de etanol de segunda geração devido sua elevada eficiência em produzir biomassa e suas características energéticas.

5.1.5 Referências

ABNT. **Carvão Vegetal**: Determinação do poder calorífico – método de determinação. NBR 8633. Rio de Janeiro. 13p.

BERNDES, G.; HOOGWIJK, M.; VAN DEN BROEK, R. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 25, p. 1-28, 2003.

BIZZO, W. A. et al. The generation of residual biomass during the production of bio-ethanol from sugarcane, its characterization and its use in energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 589-603, 2014.

BOSCHIERO, B. N. et al. Biomass Production and Nutrient Removal of Energy Cane Genotypes in Northeastern Brazil. **Crop Science**, v. 59, n. 1, p. 379-391, 2019.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Observatório agrícola. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Terceiro Levantamento. 2018. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em 06/01/2019.

DIAS, M. O. S. et al. Second generation ethanol in Brazil: can it compete with electricity production?. **Bioresource technology**, v. 102, n. 19, p. 8964-8971, 2011.

EBRAHIM, M. K. et al. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. **Journal of Plant Physiology**, v. 153, n. 5-6, p. 593-602, 1998.

EPE/MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (a). **Resenha Energética Brasileira**. Exercício de 2016. 32f. Ed. JUN 2017. Brasília, 2017.

FERREIRA JÚNIOR, R. A. et al. Energy conversion efficiency in sugarcane under two row spacings in northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 741-747, 2015.

GUERRA, Anderson et al. Efeitos da temperatura do ar na fotossíntese da cana-de-açúcar na fase inicial do desenvolvimento. **Agrarian**, v. 7, n. 24, p. 211-217, 2014.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field crops research**. v. 92, p. 185-202, 2005.

IRVINE, J.E.; BENDA, G.T.A. (1979) **Genetic potential and restraints in Saccharum as an energy source**. Symposium on Alternate Uses of Sugarcane for Development in Puerto Rico. San Juan, P.R. (26 Mar 1979).

JACOME, D. F. **Caracterização físico-química das cinzas da palha de cana-de-açúcar através de análises térmicas simultâneas (STA)**. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). São Paulo, 2014.

JENKINS, B.M. et al. Combustion properties of biomass. **Fuel processing technology**, v. 54, n. 1-3, p. 17-46, 1998.

LIMA, S. A. et al. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, p. 201-212, 2011.

LONG, S. P. et al. Feedstocks for biofuels and bioenergy. **Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps**, p. 302-347, 2015.

MARTINS FILHO, S. T.; HUMBERTO M., Carlos. Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na produção de blocos de concreto para pavimentação. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 10, n. 4, 2017.

MATSUOKA, S. et al. Energy cane: its concept, development, characteristics, and prospects. **Advances in Botany**, v. 2014, 2014.

McKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002a.

McKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 47-54, 2002b.

NUNES, I. H. S. et al. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. **Revista Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 39-48, 2010.

OGATA, B.H. **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias**. Dissertação. Universidade de São Paulo, ESALQ, 2014.

OLIVEIRA, S.F.D.A. **Avaliação Energética Da Biomassa Do Bagaço De Cana De Açúcar Em Diferentes Indústrias Sucroenergéticas**. 2014. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado Profissional. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. São Paulo.

OLIVER, A.; KHANNA, M. Demand for biomass to meet renewable energy targets in the United States: Implications for land use. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 9, p. 1476-1488, 2017.

PAULA, M.O. Potencial da cinza do bagaço de cana-de açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, 2006.

SINGH, Maninder P. et al. Mineral composition and removal of six perennial grasses grown for bioenergy. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 466-474, 2015.

SOMERVILLE, C. et al. Feedstocks for lignocellulosic biofuels. **science**, v. 329, n. 5993, p. 790-792, 2010.

SOR SORDI, R. A.; MANECHINI, C. Utilization of trash: a view from the agronomic and industrial perspective. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 5, p. 2-2, 2013.

STEDUTO, P. et al. **Crop yield response to water**. Irrigation and Drainage Paper No. 66, FAO; Rome, 2012, 503p.

SURENDRA, K. C. et al. High yielding tropical energy crops for bioenergy production: Effects of plant components, harvest years and locations on biomass composition. **Bioresource technology**, v. 251, p. 218-229, 2018.

TEW, T. L.; COBILL, R. M. Genetic improvement of sugarcane (*Saccharum* spp.) as an energy crop. In: **Genetic improvement of bioenergy crops**. Springer, New York, NY, 2008. p. 273-294.