



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CARMEN GRASIELA DIAS MARTINS

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO CULTIVADO EM
DOIS SISTEMAS DE PLANTIO DE AÇAIZEIRO NO NORDESTE PARAENSE**

BELÉM

2020

CARMEN GRASIELA DIAS MARTINS

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO CULTIVADO EM
DOIS SISTEMAS DE PLANTIO DE AÇAIZEIRO NO NORDESTE PARAENSE.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da
Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Agronomia para obtenção do título de Mestre
em Agronomia.

Área de concentração: Agronomia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de
Souza

BELÉM

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M379d Martins, Carmen Grasiela Dias

Dinâmica espaço-temporal da umidade do solo cultivado em dois sistemas de plantio de açaizeiro no nordeste paraense / Carmen Grasiela Dias Martins. - 2020.
52 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Agronomia (PPGA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza

1. Água no solo. 2. Estabilidade Temporal. 3. Tensiometria. 4. Euterpe oleracea. I. de Souza, Paulo Jorge de Oliveira Ponte, *orient.* II. Título

CDD

631.7098115

CARMEN GRASIELA DIAS MARTINS

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO CULTIVADO EM
DOIS SISTEMAS DE PLANTIO DE AÇAIZEIRO NO NORDESTE PARAENSE.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Agronomia

19 de fevereiro de 2020

Data da Aprovação

BANCA EXAMINADORA

Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza

**Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza
Presidente/Orientador
Universidade Federal Rural da Amazônia**

Thieres George Freire da Silva

**Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva
1º Examinador
Universidade Federal Rural de Pernambuco**

Augusto José Silva Pedrosa

**Prof. Dr. Augusto José Silva Pedrosa
2º Examinador
Instituto Federal do Pará**

Rodrigo Otávio Rodrigues de Melo Souza

**Prof. Dr. Rodrigo Otávio Rodrigues de Melo Souza
3º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia**

RESUMO

O açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira nativa do bioma amazônico de ocorrência natural em áreas de várzea, de grande exploração extrativista e produção sazonal concentrada no período com o menor regime pluviométrico da região. Com a crescente demanda pela polpa do fruto nos mercados nacionais e internacionais houve a expansão da produção para áreas de terra firme, porém ainda há muitas lacunas a respeito de como ocorre a interação com a dinâmica de água em solos de terra firme. O objetivo foi avaliar a variação espacial e temporal do teor de umidade do solo (θ_v) em dois sistemas de plantio do açazeiro, um monocultivo e um consorciado, para subsídio à implantação destes cultivos em áreas de terra firme e para melhoria do manejo de água. O experimento foi conduzido no ano de 2019 em um plantio comercial de açazeiro em Castanhal-PA, com área de aproximadamente 0,6 ha, implantado em dois sistemas de plantio, monocultivo e consorciado com a cultura do cupuaçuzeiro, sob duas lâminas de irrigação de 0% e 100% da evapotranspiração de referência (ET₀). Foram implantadas 12 baterias de tensiômetros de punção em cinco profundidades (0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 m) próximo às touceiras de açazeiro para monitoramento da tensão no solo nos diferentes sistemas de plantio. As coletas foram realizadas diariamente no período de 7 às 8 h da manhã utilizando tensiômetro digital e régua, durante os meses de abril a dezembro. As umidades foram estimadas pelo modelo ajustado de Van Genuchten (1980) com base nas curvas de retenção das profundidades estudadas. Os valores médios e desvios-padrão do θ_v foram analisados nos dois sistemas de cultivo com e sem irrigação durante os nove meses de monitoramento. A estabilidade temporal do θ_v foi analisada pela diferença relativa e pela correlação de Spearman. Foi utilizada a análise multivariada de componentes principais (ACP) para identificar as associações do θ_v nas diferentes profundidades com as propriedades físicas, densidade de raízes e os elementos climáticos avaliados no período. Os resultados mostram que o tipo de sistema de cultivo com e sem irrigação influenciam na variabilidade espacial do θ_v , apresentando maior variação nos sistemas de sequeiro em todas as profundidades, respondendo aos eventos de precipitação, principalmente nas camadas de 0,1 a 0,3 m. A análise de estabilidade temporal identificou a área de consórcio como a mais representativa para as estimativas do θ_v nas camadas de 0,1 a 0,4 m, sendo a camada de 0,5 m melhor representada no monocultivo, enquanto que a matriz de correlação de Spearman, de modo geral, identificou em todas as áreas avaliadas instabilidade do θ_v , mesmo nas áreas irrigadas. Nas associações do θ_v e as propriedades físicas e densidade de raízes, o θ_v não se associou a nenhuma das características, enquanto que a associação com os elementos climáticos explicaram as variações que ocorreram durante o período de análise. Portanto, as variações do θ_v sofrem influência dos elementos climáticos relacionados com a evapotranspiração, principalmente no período identificado como seco e nas áreas que não recebem irrigação, onde todas as camadas sofrem grande variação.

Palavras-chave: Água no solo; Estabilidade Temporal; Tensiometria; *Euterpe oleracea*.

ABSTRACT

The açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) is a native palm of the Amazon biome, naturally occurring in lowland areas, with great extractive exploration and seasonal production concentrated in the period with the lowest rainfall in the region. With the growing demand for fruit pulp in national and international markets, there was an expansion of production to areas of terra firme, but there are still many gaps as to how the interaction with water dynamics occurs on terra soils. The aim was to evaluate the spatial and temporal variation of soil moisture content (θ_v) in two açazeiro planting systems, monoculture and intercropped, to support the implantation of these crops in upland areas and to improve water management. The experiment was conducted in 2019 in a commercial açazeiro plantation in Castanhal-PA, with an area of approximately 0.6 ha, implanted in two planting systems, monoculture and intercropped with the cupuaçuzeiro culture, under two irrigation levels of 0% and 100% of the reference evapotranspiration (ET₀). Twelve puncture tensiometer batteries were implanted at five depths (0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 m) close to the açazeiro clumps for monitoring soil tension in the different planting systems. The collections were performed daily from 7 to 8 am using a digital tensimeter and ruler, from April to December. Moistures were estimated using the adjusted model of Van Genuchten (1980) based on the retention curves of the studied depths. The mean values and standard deviations of θ_v were analyzed in the two cultivation systems with and without irrigation during the nine months of monitoring. The temporal stability of θ_v was analyzed by the relative difference and Spearman's correlation. Principal component multivariate analysis (PCA) was used to identify the associations of θ_v at different depths with physical properties, root density and climatic elements evaluated in the period. The results show that the type of cultivation system with and without irrigation influences the spatial variability of θ_v , presenting greater variation in rainfed systems at all depths, responding to precipitation events, especially in the 0.1 to 0.3 m layers. The analysis of temporal stability identified the intercropped area as the most representative for the estimates of θ_v in the 0.1 to 0.4 m layers, with the 0.5 m layer being best represented in the monoculture, while the correlation matrix Spearman's, in general, identified instability of θ_v in all evaluated areas, even in irrigated areas. In the associations of θ_v and physical properties and root density, θ_v was not associated with any of the characteristics, while the association with climatic elements explained the variations that occurred during the analysis period. Therefore, variations in θ_v are influenced by climatic elements related to evapotranspiration, especially in the period identified as dry and in areas that do not receive irrigation, where all layers suffer great variation.

Keywords: Soil water; Temporal stability; Tensiometry; *Euterpe oleracea*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área experimental de açaizeiro irrigado e consorciado com cupuaçuzeiro, e das baterias de tensiômetros (onde os pontos: 1, 2 e 3 correspondem ao monocultivo em sequeiro; 4, 5 e 6 ao monocultivo irrigado; 7, 8 e 9 ao consórcio sequeiro; 10, 11 e 12 ao consórcio irrigado) em Castanhal, Pará.	17
Figura 2 – Croqui da disposição espacial das calhas de coleta de precipitação efetiva abaixo do dossel de açaizeiro, entre linhas e entre plantas na área experimental em Castanhal-PA, Brasil.	21
Figura 3 - Bateria de tensiômetros em cinco profundidades distantes 0,2 m da touceira de açaizeiro e distantes entre si por 0,1 m.	23
Figura 4 – Tensímetro utilizado nas coletas de tensão dos tensiômetros (a) e régua milimetrada (b) para obtenção da altura de água interna dos tensiômetros acima da superfície do solo.	23
Figura 5 – Curvas características de retenção de água no solo para as diferentes profundidades no monocultivo (a) e no consórcio (b) da área experimental em Castanhal-PA, Brasil.	25
Figura 6 – Precipitação acima do dossel, precipitação efetiva no monocultivo e consórcio, evapotranspiração de referência e irrigação (a), temperatura do ar e umidade relativa abaixo do dossel (b), déficit de pressão de vapor e velocidade do vento (c) em plantio comercial de açaizeiro em Castanhal-Pa durante o período de abril a dezembro.	28
Figura 7 - Sazonalidade do teor de umidade no perfil do solo entre as profundidades de 0,1 a 0,5 m em cultivo de açaizeiro irrigado (100) e sequeiro (0), em consórcio (C) e monocultivo (M) em Castanhal-PA, Brasil.	30
Figura 8 – Sazonalidade do teor de umidade no solo em cinco profundidades (0,1 a 0,5 m) em plantio de açaizeiro em monocultivo com lâmina de 0% da ET ₀ (sequeiro) e lâmina de 100% da ET ₀ (irrigado) em Castanhal-PA, Brasil. As barras verdes e azuis indicam os eventos de precipitação efetiva e irrigação, respectivamente.	31
Figura 9 - Sazonalidade do teor de umidade no solo em cinco profundidades (0,1 a 0,5 m) em plantio de açaizeiro em consórcio com cupuaçuzeiro com lâmina de 0% da ET ₀ (sequeiro) e lâmina de 100% da ET ₀ (irrigado) em Castanhal – PA, Brasil. As barras verdes e azuis indicam os eventos de precipitação efetiva e irrigação, respectivamente.	33
Figura 10 – Diferença relativa média classificada por profundidade do perfil do solo nas áreas de monocultivo sem irrigação (M0, correspondendo aos pontos de 1 a 3), monocultivo com irrigação (M100, pontos de 4 a 6), consórcio sem irrigação (C0, pontos de 7 a 9) e consórcio com irrigação (C100, pontos de 10 a 12) (na esquerda); e comparação entre o teor de umidade médio das áreas de açaizeiro em monocultivo e consórcio, com irrigação e sem irrigação e os pontos de teor de umidade com estabilidade temporal, durante o mesmo período, nas profundidades de 0,1 a 0,5m (na direita).	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variabilidade dos elementos meteorológicos (2003-2019) na cidade de Castanhal-PA, Brasil.	18
Tabela 2 - Análise granulométrica e físico-hídrica do solo de monocultivo de açaizeiro (M) e de consórcio (C), com irrigação (100) e sem irrigação (0) da área experimental em Castanhal-PA, Brasil.	19
Tabela 3 – Densidade média e desvio padrão de raízes nas profundidades de 0,1 a 0,5 m nos sistemas de monocultivo (M) e consórcio (C) de açaizeiro, com irrigação (100) e sem irrigação (0) em Castanhal-PA, Brasil.....	26
Tabela 4 – Matriz de correlação de Spearman entre os meses de abril a dezembro (P4 a P12) nos tratamentos de monocultivo (M) e consórcio (C) de açaizeiro, com irrigação (100) e sem irrigação (0) em Castanhal-PA, Brasil.....	37
Valores em negrito significativos a 5% de probabilidade.	38

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	8
1.1. Revisão de Literatura	9
1.1.1. Açaizeiro	9
Caracterização botânica.....	9
Distribuição geográfica.....	10
Importância econômica.....	10
Transição Várzea-Terra Firme	11
Sistemas de cultivos	12
1.1.2. Micrometeorologia	12
1.1.3. Teor de Umidade no solo	13
Água no solo.....	13
Determinação do teor de umidade no solo	14
2. DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO CULTIVADO COM DOIS SISTEMAS DE PLANTIO DE AÇAIZEIRO NO NORDESTE PARAENSE.....	15
2.1. Introdução	15
2.2. Material e Métodos	16
2.2.1. Área de estudo.....	17
2.2.5. Teor de umidade do solo.....	24
2.2.7. Densidade de raízes.....	26
2.2.8. Análise de estabilidade espacial e temporal do teor de umidade do solo	26
2.2.9. Análise estatística.....	28
2.3. Resultados.....	28
2.4. Discussão.....	39
2.5. Conclusões	44
REFERÊNCIAS	44

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A crescente visibilidade do açaí, fruto do açazeiro, no mercado nacional e internacional, promoveu um grande impacto no sistema produtivo dessa cultura que antes era essencialmente extrativista. De hábito cespitoso e adaptado a áreas que sofrem inundação, o açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira endêmica da região Amazônica que é muito apreciada pelas comunidades locais por constituir a base alimentar (OLIVEIRA et al., 2002; BRONDÍZIO; SAFAR; SIQUEIRA, 2002).

Muito além de questões alimentares, as propriedades do açaí ganharam mercados na área de estética e saúde, aumentando ainda mais a demanda pelo fruto o que promoveu o investimento no manejo das áreas de várzeas e expansão da cultura para áreas de terra firme (MARTINS et al., 2018; VASCONCELOS et al., 2019). Dessa forma, muitas tecnologias e pesquisas foram e são desenvolvidas para driblar as limitações nesses novos ambientes a fim de obter maiores produtividades e minimizar a sazonalidade da produção (HOMMA et al., 2006).

Nesse sentido, cultivares com aptidão para o desenvolvimento em solos de terra firme foram desenvolvidas por programas de melhoramento genético visando produtividades satisfatórias e bom rendimento de polpa do fruto como foi o caso do lançamento da cultivar BRS Pará (OLIVEIRA; FARIAS NETO, 2004). Além disso, para reduzir a sazonalidade da produção, isto é, aumentar os ganhos na entressafra, foi desenvolvida a cultivar BRS Pai d'Égua que além de ter uma escala de produção mais distribuída ao longo do ano, apresenta boa produtividade e menor diâmetro dos frutos quando cultivadas em sistemas irrigados de terra firme (FARIAS NETO, 2019).

Mesmo com tecnologias que partem desde a seleção das sementes e progênies até a pós-colheita e processamento do fruto, esse avanço não é uniforme sendo algumas áreas mais priorizadas que outras, ocasionando déficits de informações que influenciam no sistema de produção da cultura (CARVALHO et al. 2017; CARVALHO; NASCIMENTO, 2018).

Entre as tecnologias empregadas no sistema de produção do açazeiro, está a utilização de irrigação para minimizar a deficiência hídrica no período seco. No entanto ainda há carências de informações que afetam o manejo da irrigação, influenciando nos gastos energéticos e dos recursos hídricos (SILVESTRE et al., 2017). Nesse sentido, o conhecimento de como ocorre a dinâmica de água nos solos de terra firme cultivados com açazeiro ainda é muito insipiente,

sendo essa abordagem muito importante para a cultura, visto que o açaizeiro é natural de áreas que não há restrição hídrica (SANTOS et al., 2018).

Como o solo é um componente ambiental heterogêneo que apresenta variação do teor de umidade no solo tanto espacialmente como temporalmente, o mesmo influencia diretamente no desempenho da planta, uma vez que é onde a raiz dos vegetais demanda água e nutrientes para seu metabolismo (DUMEDAH; COULIBALY, 2011). Dessa forma, muitos estudos tem buscado fazer o monitoramento do teor de umidade no solo para ajudar no manejo da irrigação, previsão de secas e enchentes, além de auxiliar na modelagem agrícola (DAVENPORT; STEVENS; WHITLEY, 2008; DUMEDAH; COULIBALY, 2011; BARONI et al., 2013; CHO; CHOI, 2014). Em virtude disso, o trabalho desenvolvido por Vachaud et al (1985) tem sido muito utilizado para encontrar pontos de estabilidade espaço-temporal do teor de umidade que ajudam no monitoramento para auxílio no manejo e na tomada de decisão.

Além disso, o açaizeiro é incorporado em outros sistemas de cultivo, adotado principalmente pela agricultura familiar que pratica o consórcio com outras culturas para dinamização da economia além de usufruir dos serviços ecossistêmicos (ALMEIDA; GAMA, 2014; ALMEIDA et al., 2018), configurando um outro ambiente que pode influenciar na dinâmica de água no solo. Entre as principais culturas utilizadas no consórcio com açaizeiro, está o cupuaçuzeiro que é uma planta da região Amazônica que se desenvolve muito bem abaixo do dossel das árvores, com uma produção concentrada no primeiro semestre garantindo o impulsionamento da economia do pequeno produtor nesse período (ALVES, 2012).

Dessa forma, objetiva-se avaliar a variação espacial e temporal da umidade do solo em dois sistemas de plantio do açaizeiro, um monocultivo e outro consorciado com cupuaçuzeiro, para subsídio à implantação destes cultivos em áreas de terra firme e para melhoria do manejo de água.

1.1. Revisão de Literatura

1.1.1. Açaizeiro

Caracterização botânica

O açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma planta pertencente à família Arecaceae, incluída no gênero *Euterpe*, estando entre as espécies mais frequentes de um total de 28 espécies catalogadas do gênero. A *E. oleracea* juntamente com a *Euterpe precatória* e *Euterpe edulis*

são os indivíduos mais representativos do gênero, no entanto as duas primeiras são as mais apreciadas por seus frutos (YAMAGUCHI et al., 2015).

O crescimento desta palmeira é do tipo cespitoso, apresentando touceiras com números variados de perfilhos, dependendo do estágio de desenvolvimento do vegetal (SANTOS et al., 2018). A estipe apresenta altura de 3 a 20 m com variação de diâmetro de 7 a 18 cm, apresenta sistema radicular fasciculado e folhas compostas do tipo pinada. A inflorescência é do tipo cacho, envolvidas inicialmente na pré-floração por espatas, com abortamento das espatas na floração (OLIVEIRA et al., 2002).

Nas ráquias do açazeiro, estão inseridas tanto flores pistiladas como estaminadas dispostas em tríades onde cada flor feminina é ladeada por duas flores masculinas. O fruto, o qual é conhecido como açaí, é classificado como uma drupa globosa com variação no diâmetro, peso e coloração em decorrência dos estádios de maturação do fruto. A semente do açaí apresenta um embrião pequeno, com abundância em endosperma que possui várias fissuras (OLIVEIRA et al., 2002; YAMAGUCHI et al., 2015; CARVALHO; NASCIMENTO, 2018).

Distribuição geográfica

Naturalmente, a espécie *E. oleracea* ocorre em áreas de várzea, onde os solos são influenciados pela sazonalidade das inundações, sendo nativa do bioma Amazônico. No Brasil, sua distribuição geográfica é observada principalmente nas regiões norte e nordeste do país, sendo 46% das ocorrências registradas no estado do Pará. Além do estado do Pará, há registro de ocorrência nos estados do Amazonas, Amapá, Maranhão, Tocantins e Mato Grosso (VAZ; NABOUT, 2016).

Além do Brasil, o açazeiro é encontrado em outros países da América Latina como Panamá, Equador, Venezuela, Peru, Guianas e Colômbia, que são áreas de abrangência da floresta Amazônica. Apesar da importância do fruto no contexto atual, nos outros países o valor da palmeira é associado ao palmito, o coração da palmeira, o qual é mais explorado pelo fato da palmeira ser abundante tanto em plantios puros quanto adensado com outras árvores em áreas de várzea (VALLEJO et al., 2014).

Importância econômica

Inicialmente, a cultura do açaí era reconhecida exclusivamente como a base da alimentação dos povos ribeirinhos e sua exploração era realizada de forma extrativista. No entanto, com a explosão demográfica e desenvolvimento de regiões metropolitanas como em Belém no Pará, a demanda pelo fruto cresceu ganhando mais notoriedade nos mercados locais,

evidenciado no início da década de 1970 (OLIVEIRA et al., 2002; BRONDÍZIO; SAFAR; SIQUEIRA, 2002).

Na última década, a polpa do fruto ganhou visibilidade além dos mercados locais, conquistando mercados nacionais e internacionais, agregando maior valor para atender novos nichos de comércio. Muito além das questões alimentares e culturais, o fruto do açaizeiro ganhou aspectos de estética e saúde, em virtude do açaí ser rico em fibras, vitaminas e antocianinas, características que atraem consumidores seletivos e exigentes (NOGUEIRA; SANTANA; GARCIA, 2013; MARTINS et al., 2018; VASCONCELOS et al., 2019)

Para atender a necessidade da demanda crescente pelo fruto, os plantios começaram a ser manejados nas áreas de várzeas, além de adaptar os cultivos para áreas de terra firme, aumentando a produção do fruto nos estados produtores (YOKOMIZO et al., 2016; SILVESTRE et al., 2017). Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de açaí, sendo os estados do Pará e Amazonas responsáveis por 90% da produção nacional, com um volume de produção de 1.415.969 t e 103.204 t de frutos em 2017, respectivamente. Nesse cenário, apesar do extrativismo ser por muito tempo a principal fonte do açaí, ultimamente o volume de produção da cultura é proveniente em mais de 85% de cultivos manejados (IBGE, 2019).

Transição Várzea-Terra Firme

A paisagem que compõe o bioma Amazônico é muito diversa e apresenta características peculiares de cada ambiente, como pode ser observado nas áreas denominadas de várzea e terra firme. As áreas de várzeas são ambientes dinâmicos que sofrem influência dos rios, onde é encontrado grande quantidade de materiais suspensos em virtude das inundações sazonais. Enquanto que nas áreas de terra firme, são locais mais estáveis que não são influenciados pelos rios (RODRIGUES; OLIVEIRA, 1997).

Geralmente em áreas de várzeas, há a predominância de solos classificados como Gleissolos (PY-DANIEL, 2007). Nesses locais, o solos possuem má drenagem e os teores de argila e silte são mais elevados em relação as partículas de areia, além disso possui alta capacidade de trocas catiônicas (CTC) e alto teor de matéria orgânica em virtude da deposição de sedimentos que são transportados pelos rios e da decomposição de materiais senescentes, o que lhe confere a fertilidade desses solos (PY-DANIEL, 2007; CAMPOS et al., 2013).

Enquanto que em ambientes de terra firme, os solos são mais intemperizados e planos, sendo mais encontrado Latossolos nessa região, os quais são solos mais profundos e com boa

drenagem, no entanto, são solos distróficos que indisponibiliza a absorção de nutrientes importantes para o desenvolvimento dos vegetais (CAMPOS et al., 2012).

O açazeiro é uma planta com adaptação e dominância em áreas de várzeas, onde é encontrado com grande densidade populacional em virtude de fatores como luminosidade, abundância nutricional dos solos e pela capacidade de perfilhamento. Com as inundações sazonais nesses ambientes, as palmeiras, como o açazeiro, desenvolveram estruturas adaptativas como a formação de aerênquimas, lenticelas, pneumatóforos e raízes aéreas que permitem seu pleno desenvolvimento nos solos encharcados (JARDIM et al., 2007).

Sistemas de cultivos

Além de plantios manejados em áreas de várzeas e de cultivo em monocultura em áreas de terra firme, o açazeiro é utilizado consorciados com outras culturas, como por exemplo em arranjos agrofloretais, conhecidos como sistemas agrofloretais (SAF's) (ALMEIDA; GAMA, 2014). No intuito de promover a diversidade da economia com o aumento da variedade de produtos produzidos na área, há um aumento na biota da área em virtude das condições microclimáticas e propriedades do solo que esses ambientes proporcionam (SILVA et al., 2017).

Segundo Homma et al. (2006), o plantio de açazeiro é largamente empregado com culturas perenes como cacauzeiro (*Theobroma cacao*), cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum*) (ALVES, 2012), pimenteira-do-reino (*Piper nigrum*) entre outras, além de ser implantado em final de cultivos como no caso de maracujazeiro (*Passifora edulis*) e bananeira (*Musa spp.*) (ALMEIDA et al., 2018), em algumas situações é observado no aproveitamento de áreas de pastagens degradadas. No entanto, ainda se precisa de estudos complementares para entender se esses sistemas trazem viabilidade para o produtor que possui o açazeiro como cultura principal.

1.1.2. Micrometeorologia

A micrometeorologia procura analisar e entender sobre as flutuações das variáveis meteorológicas na camada limite planetária ou na camada superficial em uma escala curta de tempo, compreendendo horas ou menos. Enquanto que na microclimatologia, são analisadas as mesmas variáveis em uma longa escala temporal, objetivando as variações diurnas e sazonais observando as tendências e padrões (ARYA, 2001).

Assim como a variação dos elementos meteorológicos que acontecem sobre uma vegetação alta difere do que acontece numa vegetação mais densa, os processos que acontecem dentro do dossel são diferentes ou respondem de forma diferente ao que acontece na superfície da vegetação. Em alguns casos, as variáveis meteorológicas apresentam estratificação em decorrência da altura da cobertura vegetal (FOKEN, 2017).

Em estudos realizados na Mata Atlântica, Ewers & Banks-Leite (2013) relatam que fragmentos menores que 50 ha são suscetíveis ao efeito de borda, principalmente com relação a temperatura nas camadas logo abaixo do dossel, o que não foi observado na temperatura próxima ao solo e no solo, mostrando que o efeito tampão nesses estratos não são afetados e respondem lentamente as condições que acontecem na superfície do dossel.

Nesse sentido, Hardwick et al. (2015) evidenciaram que a estrutura do dossel juntamente com a altura das plantas provoca alteração no microclima interno de uma vegetação. Em virtude da entrada de radiação no dossel, isto é, em sistemas mais abertos em que a radiação atinge diretamente o solo, as temperaturas do ar aumentam em 6,5 °C, como é observado no plantio de palma de óleo, enquanto que em florestas manejadas, esse elemento apresenta uma elevação de até 2,5 °C. Esse comportamento de aumento é observado na temperatura do solo e no déficit de pressão do vapor, enquanto que é ocasionado uma diminuição da umidade relativa (HARDWICK et al., 2015).

1.1.3. Teor de Umidade no solo

Água no solo

O solo é um sistema trifásico com presença de fases sólida, líquida e gasosa. O material de origem ou parental juntamente com a matéria orgânica constituem a fase sólida. A fase líquida, é constituída pela água ou solução do solo, enquanto que a fase gasosa é composta pelos gases produzidos e consumidos pelos animais e pelas raízes das plantas. O solo é caracterizado por propriedades físicas, químicas e biológicas que são determinadas pelos fatores de formação dos solos, quanto ao material de origem, a evolução do clima e do relevo, além de levar em consideração os organismos que habitam e o tempo (SANTANA; SANS, 2013).

Além de funcionar com um suporte físico e fornecedor dos principais nutrientes para as plantas, o solo assume também o papel de reservatório de água. O arranjo das partículas do solo formando grânulos e agregados constituem o meio poroso que influencia em processos como na interação solo-planta-atmosfera, principalmente nos termos de energia da água que é

traduzida em potencial, que controla o movimento da água, nutrientes, sais no solo, além da absorção de água e nutrientes pela planta (FIDALSKI et al., 2013; LEPSCH, 2016).

O conteúdo de água no solo representa o quanto de água pode ser armazenado no solo, em cada camada ou, comumente, a profundidade efetiva do sistema radicular (ANDRADE; BORGES JÚNIOR; COUTO, 2008). Esse conteúdo varia entre o intervalo do ponto de murcha permanente, o qual refere-se ao ponto em que o teor de água não pode ser retirado da matriz do solo, e o ponto de saturação do solo, correspondendo ao momento de encharcamento em que todos os poros do solo estão completamente preenchidos (MAROUELLI et al., 2012; SILVA et al., 2014).

As condições em que a água no solo está na capacidade de campo são as ideais para manter o pleno crescimento e desenvolvimento da planta sem haver limitações por déficit hídrico. A água no solo pode ser recarregada principalmente por precipitação e ascensão capilar, em algumas regiões há a necessidade de recorrer a sistemas de irrigação para evitar o comprometimento da produção vegetal, pois a demanda por evapotranspiração supera a quantidade de água disponível no solo (BRUNO et al., 2006).

Determinação do teor de umidade no solo

O teor de água no solo pode ser determinado por diversos métodos, mas isso vai depender do objetivo e a viabilidade na utilização dos materiais e instrumentos. Ainda assim, existem vários fatores que dificultam a obtenção dessa informação, pois a água no solo é de caráter dinâmico e facilmente apresenta alteração espacial, tanto horizontalmente quanto verticalmente, e temporal, além de ser influenciado pelo manejo do solo, o tipo de sistema radicular da planta, o relevo e entre outros fatores (ANDRADE; BORGES JÚNIOR; COUTO, 2008).

O método clássico para a determinação desse teor no solo é o processo gravimétrico que consiste na coleta de amostras de solos, podendo ser simples ou compostas, em diferentes áreas e profundidades. Dependendo do objetivo, as amostras podem ser do tipo deformadas e não deformadas, sendo essa última necessária a utilização de trado especializado e utilização de cilindros de alumínio para preservação da estrutura da amostra. O teor de umidade é determinado pela pesagem das amostras no momento inicial e depois de atingir peso constante com a secagem na estufa (BUSKE et al., 2014).

Alguns métodos determinam o teor de umidade no solo de forma indireta utilizando as propriedades do solo, como é o caso dos métodos de reflectometria no domínio do tempo (TDR) e reflectometria no domínio da frequência (FDR) que utilizam as mudanças nas propriedades

dielétricas do solo para estimar o teor de umidade. No entanto, esses métodos precisam ser calibrados para cada tipo de solo em que são utilizados para minimizar o erro de estimativa desses sensores (SOUZA et al., 2013).

O potencial de água no solo é outra propriedade utilizada na estimativa do teor de umidade no solo por meio de tensiômetros e psicômetros, convertendo os valores com base na curva característica de retenção de água no solo. Esses instrumentos utilizam cápsulas e são baseados no princípio de equilíbrio entre a solução do solo e o interior do instrumento. Em alguns locais, o tensiômetro é utilizado como uma ferramenta no manejo da irrigação por sua praticidade e baixo custo de aquisição (VAN DER PLOEG et al., 2008; AZEVEDO et al., 2017).

2. DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO CULTIVADO COM DOIS SISTEMAS DE PLANTIO DE AÇAIZEIRO NO NORDESTE PARAENSE.

2.1. Introdução

O açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira endêmica da floresta Amazônica, de comportamento cespitoso e ocorrência natural em áreas de várzeas (VAZ; NABOUT, 2016). Por muito tempo foi explorada de forma extrativista para obtenção do palmito, e seu fruto, açaí, há tempos foi apreciado apenas localmente sendo a base da alimentação ribeirinha. Após a década de 70, o fruto ganhou notoriedade nos mercados locais e, atualmente conquistou mercados nacionais e internacionais, com motivações além da alimentação em virtude dos benefícios contidos no fruto (BRONDÍZIO; SAFAR; SIQUEIRA, 2002; VASCONCELOS et al., 2019).

Com o aumento da demanda pelo fruto, além de realizar o manejo de açazais nativos, as áreas plantadas expandiram para áreas de terra firme (YOKOMIZO et al., 2016). Nesse cenário produtivo, os estados do Pará e Amazonas respondem por mais de 90% da produção, sendo que parte da produção atualmente é proveniente de plantios cultivados (IBGE, 2019).

Apesar da expansão da cultura para áreas de terra firme, ainda são encontrados muitos desafios para alcançar o aumento da produtividade do açaizeiro e a diminuição da sazonalidade no fornecimento de frutos para o mercado (HOMMA et al., 2006). Alguns tratos culturais são empregados para amenizar essas limitações, entre eles está a utilização de sistemas de irrigação para suprir a demanda hídrica da planta no período menos chuvoso (SILVESTRE et al., 2017).

No entanto, ainda não se sabe como ocorre a dinâmica de água em solos de terra firme cultivados com açaizeiro, implicando no manejo da irrigação de quando e quanto irrigar.

Além do arranjo em monocultivo, o açaizeiro é encontrado consorciado com outras culturas, em alguns casos em arranjos denominados sistemas agroflorestais (SAF's) no intuito de otimizar o uso da terra, diversificando a produção, conservando o solo e diminuindo a pressão no uso da terra para o cultivo agrícola (ALVES, 2012; ALMEIDA; GAMA, 2014; ALMEIDA et al., 2018). Ao consorciar culturas diferentes, é esperado que haja diferenças em diversos aspectos, como no microclima e no teor de umidade no solo, pois esses fatores afetam diretamente a evapotranspiração das plantas.

O teor de umidade no solo corresponde a quantidade de água em um determinado volume ou massa de solo, contido nos espaços porosos do solo, variando conforme a densidade, estrutura e textura do solo. A água no solo é essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo captada pelas raízes com menos de 1% assimilada pela planta, sendo em sua maioria envolvida na transpiração da planta, realizando a osmorregulação e transporte de solutos (SCHERER; FRANZEN; CIHACEK, 2017).

O teor de umidade no solo sofre variação temporal e espacial, e dependendo do tipo de cobertura vegetal, essa variação pode afetar o desenvolvimento da planta, pois influencia diretamente no armazenamento de água no solo (ZENG et al., 2011; YAO et al., 2016). Em alguns casos ou períodos, com a elevada demanda hídrica do vegetal, há a necessidade de utilizar sistemas de irrigação para manter o solo com o teor adequado de água para não prejudicar a produção vegetal (PEREIRA et al., 2017).

Nesse contexto, são utilizadas técnicas para avaliação da estabilidade do teor de umidade no solo para identificar pontos de amostragem que sejam representativos para o monitoramento dessa variável no solo (GONÇALVES; FOLEGATTI; SILVA, 1999; BARONI et al., 2013). Uma das técnicas mais utilizadas para essa análise é a proposta por Vachaud et al. (1985) que faz a análise por diferença relativa e correlação dos dados espaço-temporal.

Portanto, o objetivo foi avaliar a variação espacial e temporal da umidade do solo em dois sistemas de plantio do açaizeiro, um monocultivo e outro consorciado com cupuaçuzeiro, para subsídio à implantação destes cultivos em áreas de terra firme e para melhoria do manejo de água no nordeste paraense.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Área de estudo

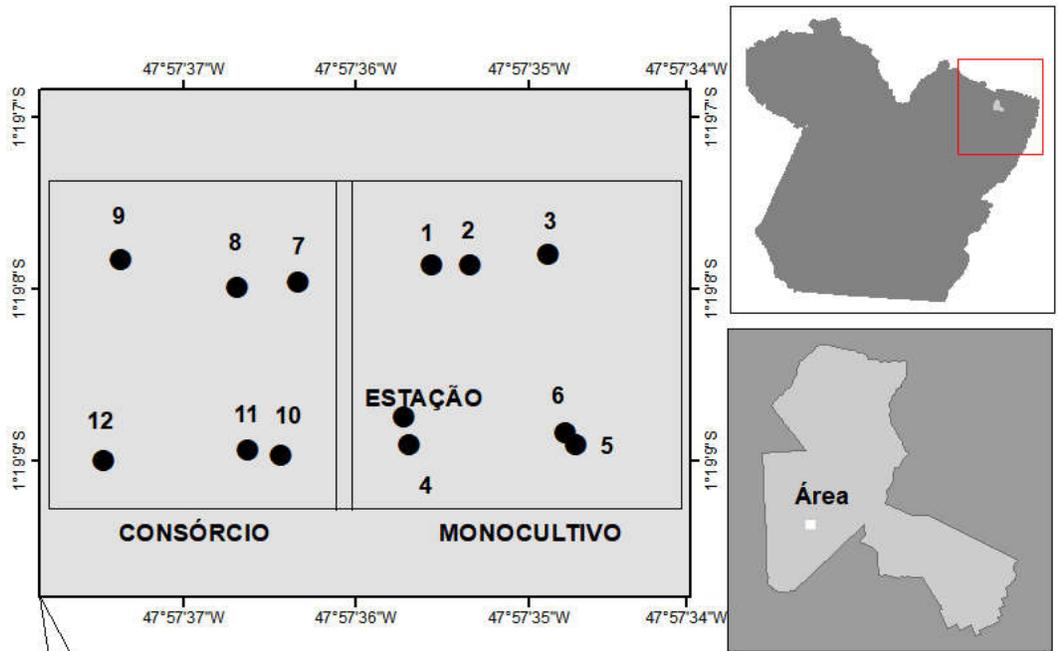
O experimento foi conduzido em uma propriedade privada, situada ao lado da fazenda escola da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) na cidade de Castanhal-PA, Brasil, sob as coordenadas 1° 17' 50 S e 47° 55' 20" W (Figura 1). A classificação climática da região, segundo Köppen-Geiser, é do tipo Am, definido como monção tropical (ALVARES et al., 2014). A Tabela 1 mostra as variáveis meteorológica monitoradas pela estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no município de Castanhal-PA, a qual dista a 2,6 km da área experimental. O solo da área é classificado como Latossolo amarelo distrófico de textura franco-arenosa, com base na granulometria da tabela 2 (SANTOS et al., 2018).

Figura 1 - Localização da área experimental de açaizeiro irrigado e consorciado com cupuaçuzeiro, e das baterias de tensiômetros (onde os pontos: 1, 2 e 3 correspondem ao monocultivo em sequeiro; 4, 5 e 6 ao monocultivo irrigado; 7, 8 e 9 ao consórcio sequeiro; 10, 11 e 12 ao consórcio irrigado) em Castanhal, Pará.



Localização da área de estudo

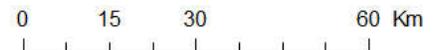
Fazenda Escola de Castanhal



Sistema de Coordenadas Geográficas
 Datum: WGS 84
 Fonte Vetores: IBGE
 Elaboração: Adrielle Carvalho Monteiro
 Layout: Carmen Grasiela Dias Martins
 Data: 20/03/2020

LEGENDA

- CASTANHAL
- PARÁ



Fonte: Adrielle Carvalho Monteiro.

Tabela 1 – Variabilidade dos elementos meteorológicos (2003-2019) na cidade de Castanhal-PA, Brasil.

Mês/Ano	Precipitação	T média	UR	U2	DPV	ET0
	mm	°C	%	m s ⁻¹	kPa	mm
Jan	189,43	26,52	80,70	1,71	1,05	3,25
Fev	230,18	25,90	85,01	1,53	0,86	2,92
Mar	333,32	25,79	86,22	1,42	0,95	2,95

Abr	312,22	25,83	86,46	1,40	0,99	3,03
Mai	244,60	26,13	84,39	1,43	0,93	3,22
Jun	147,89	26,30	81,32	1,55	1,10	3,44
Jul	133,77	26,32	80,14	1,68	1,20	3,52
Ago	89,87	26,65	78,84	2,07	1,25	3,98
Set	44,98	27,02	76,15	2,32	1,11	4,23
Out	44,98	27,42	73,82	2,37	1,22	4,28
Nov	48,35	27,82	71,92	2,37	1,34	4,23
Dez	119,47	27,20	76,07	2,00	1,17	3,59
Anual	1674,56	26,60	79,66	1,84	1,11	1175,50
2019	2518,40	26,49	81,33	0,09	0,74	1078,44

Fonte: O Autor.

Foram coletadas amostras de solos indeformadas e deformadas para a determinação das características granulométricas e físicas do solo nos dois sistemas de cultivo. A textura foi determinada pelo método da pipeta, utilizando o NaOH como dispersante químico e agitação mecânica por 16 h (DONAGEMMA et al., 2017). A argila foi determinada por sedimentação, o teor de areia por peneiração e o teor de silte por diferença entre as partículas (Tabela 2). A granulometria foi classificada como arenosa (SANTOS et al, 2018). O teor de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente foi determinado pela curva de retenção na mesa de tensão e no WP4, respectivamente, sendo a tensão de 10 kPa considerada para a capacidade de campo e a tensão de 1500 kPa para o ponto de murcha permanente. Enquanto a densidade do solo foi obtida pelo método do cilindro de Umland (DONAGEMMA et al., 2011). As análises foram realizadas no departamento de solos da UFRA, campus Belém, no laboratório de física do solo.

Tabela 2 - Análise granulométrica e físico-hídrica do solo de monocultivo de açaizeiro (M) e de consórcio (C), com irrigação (100) e sem irrigação (0) da área experimental em Castanhal-PA, Brasil.

Tratamento	Profundidade	Argila	Areia	Silte	Ds ¹	θ CC ²	θ PMP ³
	cm		%		g cm ⁻³	m ³ m ⁻³	
M 0	0-20	7,90	84,41	7,68	1,55	0,20	0,04
	20-40	13,77	74,55	11,68	1,62	0,32	0,08
	40-60	15,18	74,95	9,88	1,59	0,41	0,21
M 100	0-20	8,77	83,29	7,94	1,55	0,20	0,04
	20-40	14,04	74,33	11,63	1,62	0,32	0,08
	40-60	17,63	72,33	10,04	1,59	0,41	0,21
C 0	0-20	8,94	81,65	9,40	1,42	0,21	0,06
	20-40	14,24	74,52	11,24	1,89	0,57	0,23
	40-60	15,50	73,21	11,29	1,75	0,43	0,21
C100	0-20	10,42	83,58	6,00	1,42	0,21	0,06
	20-40	15,88	72,93	11,20	1,89	0,57	0,23

40-60 15,07 71,33 13,60 1,75 0,43 0,21

¹Densidade do solo; ²Teor de umidade na capacidade de campo, ³Teor de umidade no ponto de murcha permanente.
Fonte: O Autor.

A área total apresenta extensões de 203,8 x 57,7 m (aproximadamente 1,17 ha), sendo que a área experimental corresponde a 51% da área total com dimensões de 104,4 x 57,7 m. Na área experimental (Figura 1), está implantada a cultura do açaizeiro (*E. oleracea* Mart.) cultivar BRS-Pará, em uma área denominada como monocultivo com dimensões de 52,2 x 57,7 m, e o açaizeiro em consórcio com o cupuaçuzeiro (*T. grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) Schum.) cultivar Carimbó, localizado na área denominada como consórcio de 52,2 x 57,7 m. Ambos os plantios tem oito anos, com espaçamento de 4 x 4 m no monocultivo, e no consórcio 8 x 8 m entre cupuaçuzeiro e 8 x 4 m entre plantas com açaizeiro.

Antes da implantação das culturas, foi realizada duas gradagens no solo da área. As mudas de açaizeiro foram adquiridas com idade de 12 meses, idade ideal para o transplante do açaizeiro. As plantas de açaizeiro foram manejadas para o estabelecimento de 3 estipes por touceira com uma altura de 12 m, sendo as plantas daninhas controladas por roçagem, com quatro roçagens por ano. Foi realizada adubação de 2 kg de NPK por touceira por ano, com a formulação contendo 13% de N, 11% de P, 21% de K, 2% de Mg e 0,2% de Boro, além disso no ano de 2019 foi acrescido 2kg de adubação orgânica do tipo cama de aviário na área.

2.2.2. Irrigação

Cada área, tanto de consórcio como de monocultivo, foi dividida em quatro blocos de 52 x 14,5 e em cada bloco foi configurado um tipo de lâmina de irrigação calculados em função da evapotranspiração de referência (ET₀) (Figura 1). Os tratamentos monitorados foram identificados por T0 e T100, onde o T0 corresponde ao bloco sem irrigação e o T100 é o bloco com lâmina de 100% da ET₀. Em virtude de não haver informações sobre o manejo da irrigação na cultura do açaizeiro, foi escolhido o tratamento sem irrigação que é uma realidade de alguns produtores que ainda não fazem o uso da irrigação nos plantios de açaizeiro, e o tratamento com 100% da ET₀ onde é repostado a lâmina em resposta a demanda atmosférica.

O sistema de irrigação implantado é do tipo localizado por microaspersão, constituído de um microaspersor por planta com vazão de 34 L h⁻¹ com uma pressão de serviço de 5,5 mca. O coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) do sistema foi de 93,12% (±0,84), classificado como excelente pela metodologia de Merriam & Keller (1978), com uma eficiência do sistema de 94%. A bomba utilizada é do tipo submersa com potência de 3 cv localizada a 170 m da área experimental. A irrigação foi acionada no período menos chuvoso da região, que

coincide entre os meses de setembro a novembro, sendo a lâmina aplicada conforme a ET0 calculada.

Para o cálculo da lâmina de irrigação, a ET0 foi calculada com base nos dados adquiridos da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do município de Castanhal, distante 2,6 km da área experimental. Para o cálculo da ET0 foi utilizado a equação de Penman-Monteith parametrizada pela FAO 56, descrita na equação 1.

$$ET0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad Eq. (1)$$

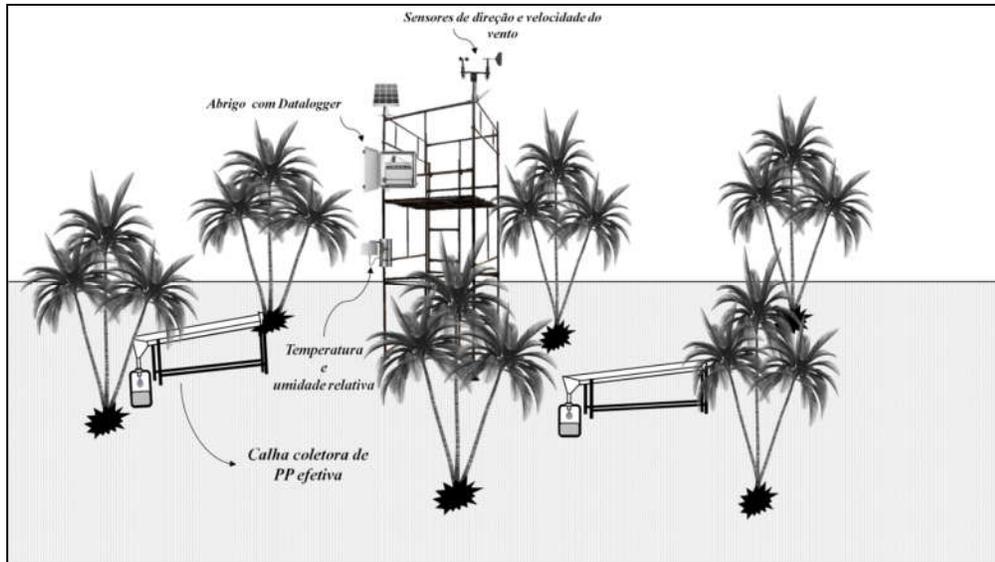
Onde, ET0 é a evapotranspiração de referência, em mm d⁻¹; Rn corresponde ao saldo de radiação à superfície da cultura, em MJ m⁻² d⁻¹; G corresponde a densidade do fluxo de calor do solo, em MJ m⁻² d⁻¹; T é a temperatura do ar a 2 m de altura, em °C; u₂ é a velocidade do vento a 2 m de altura, em m s⁻¹; e_s corresponde a pressão de vapor de saturação, enquanto o e_a representa a pressão parcial de vapor, ambas em kPa; Δ representa a declividade da curva de pressão de vapor de saturação, em kPa °C⁻¹; e γ é o coeficiente psicrométrico, kPa °C⁻¹.

2.2.3. Monitoramento das variáveis meteorológicas

No centro da área foi implantada uma torre micrometeorológica de 17 metros de altura, a qual foi instrumentada acima e abaixo do dossel com sensores para monitoramento da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar global incidente, radiação solar refletida, radiação fotossinteticamente ativa, precipitação, umidade do solo, temperatura do solo, velocidade e direção do vento. Estes sensores foram conectados a um datalogger (CR1000, *Campbell Scientific*) que realizava leituras a cada 10 segundos e gravação das médias e totais a cada 20 minutos.

As variáveis meteorológicas utilizadas para relacionar com o teor de umidade no solo (θ) foram a velocidade do vento, a temperatura do ar e umidade relativa abaixo do dossel e a precipitação efetiva. A precipitação efetiva foi determinada pela coleta da precipitação abaixo do dossel do açazeiro utilizando calhas de policloreto de vinila (PVC), com comprimento de aproximadamente 2 m. As calhas foram instaladas entre as linhas e entre plantas, nos dois sistemas de plantio (Figura 2). As coletas foram feitas diariamente utilizando uma proveta de 500 mL para determinação do volume de água, sendo posteriormente o volume convertido em mm, levando em consideração a área de captação e o volume coletado.

Figura 2 – Croqui da disposição espacial das calhas de coleta de precipitação efetiva abaixo do dossel de açazeiro, entre linhas e entre plantas na área experimental em Castanhal-PA, Brasil.



Fonte: Deborah Luciany Pires Costa

Além das variáveis descritas acima, foi utilizado o déficit de pressão de vapor (DPV) para relacionar com o θ , sendo essa variável estimada pela metodologia de Tetens (1980), utilizando as equações 2, 3 e 4.

$$e_s = 0,6108 * 10^{\frac{7,5 * T}{237,3 + T}} \quad (2)$$

$$UR = \frac{e_a}{e_s} * 100 \quad (3)$$

$$DPV = (e_s - e_a) \quad (4)$$

Em que,

e_s – Pressão de saturação (kPa); T - Temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); UR - Umidade relativa do ar (%); e_a – Pressão de vapor de água (kPa); DPV – Déficit de pressão de vapor (kPa).

2.2.4. Monitoramento da tensão de água no solo

Para o monitoramento da tensão de água no solo foi utilizado tensiômetros de punção de diferentes tamanhos, adequados para diferentes profundidades. Foram implantadas 12 baterias de tensiômetros de punção em cinco profundidades (0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 m) totalizando 60 tensiômetros na área, sendo seis baterias em cada sistema de cultivo e três baterias em cada tratamento de lâmina (Figura 1). Os tensiômetros numa bateria, foram implantados com a distância de 0,1 m um do outro e 0,2 m da touceira de açazeiro (Figura 3), para melhor acompanhar a dinâmica do θ no cultivo da cultura (COELHO; SILVA; MIRANDA, 2010).

Figura 3 - Bateria de tensiômetros em cinco profundidades distantes 0,2 m da touceira de açazeiro e distantes entre si por 0,1 m.

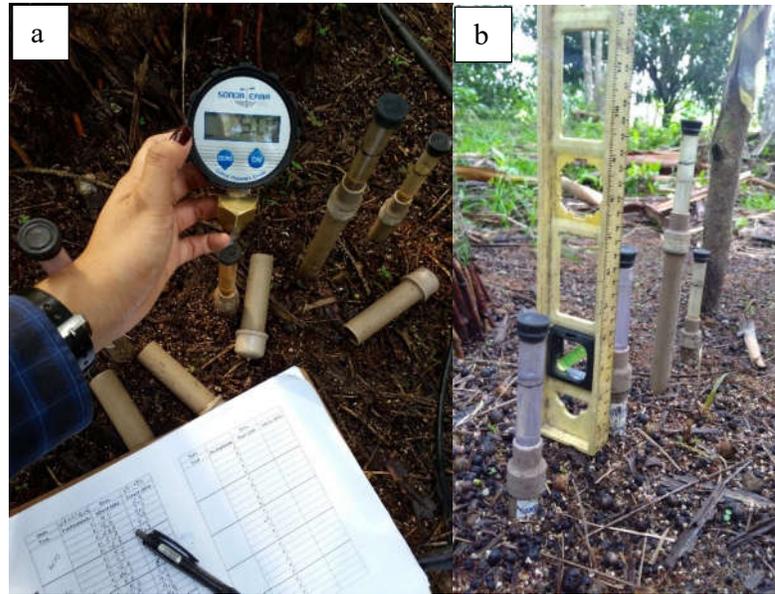


Fonte: O Autor.

Antes da implantação dos equipamentos, as tampas dos tensiômetros de punção foram removidas, e as hastes com as cápsulas foram colocadas em um recipiente com água destilada durante 24 h, garantindo saturação da cápsula porosa. Para a instalação dos equipamentos no campo, foi realizado um furo preferencialmente em solo úmido, com trado do tipo rosca para cada profundidade, além de utilizar o solo saturado de cada profundidade para ambientar a cápsula porosa. O interior do tensiômetro foi preenchido com água destilada até uma determinada altura que possibilitasse as leituras da altura da água, depois disso foi colocado a rolha de silicone e retirado o ar de dentro do equipamento utilizando uma seringa.

Os dados foram coletados, diariamente, utilizando tensímetro digital (Figura 4a) e régua (Figura 4b) milimetrada, sendo o primeiro utilizado para a coleta da tensão no tensiômetro e o segundo para mensurar a altura de água dentro do tensiômetro acima do solo. As leituras foram feitas no intervalo de 7 às 8h, e no período de acionamento da irrigação, o sistema era acionado após a realização das leituras matutinas.

Figura 4 – Tensímetro utilizado nas coletas de tensão dos tensiômetros (a) e régua milimetrada (b) para obtenção da altura de água interna dos tensiômetros acima da superfície do solo.



Fonte: O Autor.

O tensímetro digital fornece leituras de tensão em quilopascal (kPa), enquanto que a régua em centímetros (cm). Os dados foram anotados e transferidos para uma planilha eletrônica para realizar o cálculo do potencial matricial (ψ_m), segundo a equação 5 (AZEVEDO et al., 2017).

$$\psi_m = (Z + h_1 - L) * 0,0981 \quad Eq. (5)$$

Em que, ψ_m corresponde ao potencial matricial, em kPa; o Z é a distância entre a cápsula e a superfície do solo, em cm; o h_1 é a altura da água no tensiômetro acima da superfície do solo, em cm; enquanto o L corresponde a leitura do tensímetro, em centímetro de coluna d'água (cca).

2.2.5. Teor de umidade do solo

Para a determinação do teor de umidade do solo a partir dos valores de tensão é preciso determinar a curva de retenção de água no solo. Para isso foram coletadas amostras indeformadas e deformadas nos dois sistemas de cultivo nas camadas de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. As amostras não deformadas foram coletadas com auxílio de amostrador do tipo Uhland, saturadas, posteriormente levadas à mesa de tensão para obtenção das umidades correspondentes às tensões de 0,1 até 70 kPa, pelo processo de secagem, após estabilização.

As amostras deformadas foram peneiradas, obtendo-se agregados menores que 2,0 mm, saturadas e levadas ao WP4, para estabilização e posterior determinação da umidade correspondente às tensões de 100, 500, 1000 e 1500 kPa. As análises para a determinação da

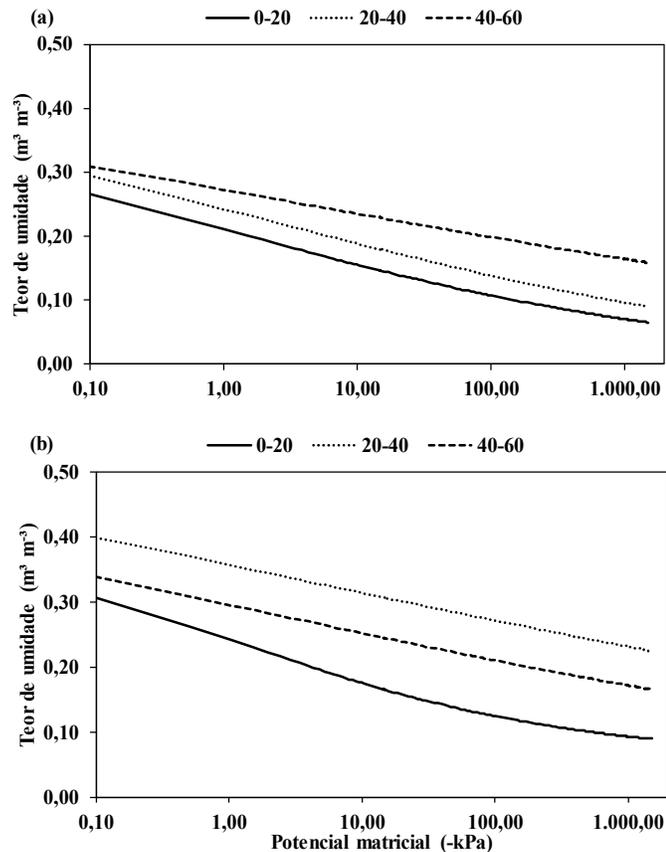
curva de retenção de água no solo foram realizadas no laboratório de física do solo na UFRA, campus Belém.

Com os resultados da curva, foi realizada o ajuste da equação proposta por Van Genuchten (1980) para obtenção dos parâmetros característicos do solo em estudo, a qual é descrita pela equação 6.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha * |\psi_m|)^n]^m} \quad (Eq. 6)$$

Sendo θ a umidade volumétrica, ψ_m o potencial matricial, com $m = 1-1/n$ (MUALEM, 1976); θ_R e θ_S a umidade volumétrica residual e na saturação, respectivamente. Enquanto n e α são parâmetros de ajuste. Após a realização dos ajustes da equação, com base nas curvas de retenção para as camadas de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm para cada sistema de cultivo (Figura 5), foi utilizado os parâmetros ajustados para a obtenção da umidade volumétrica com base nas tensões coletadas em campo.

Figura 5 – Curvas características de retenção de água no solo para as diferentes profundidades no monocultivo (a) e no consórcio (b) da área experimental em Castanhal-PA, Brasil.



Fonte: O Autor.

2.2.7. Densidade de raízes

A densidade de raízes foi determinada pelo método do anel volumétrico, onde foram coletadas amostras indeformadas em cinco profundidades nos tratamentos do monocultivo, consórcio, com irrigação e sem irrigação. Em cada tratamento, foram coletados quatro pontos aleatórios próximo as touceiras de açaizeiro. As raízes foram separadas do solo por tamisação e secas em estufa por 24h em temperatura de 100 °C para obtenção do peso seco das raízes. A densidade de raízes foi calculada com base no peso seco obtido e o volume do anel volumétrico, os dados obtidos estão descritos na tabela 3.

Tabela 3 – Densidade média e desvio padrão de raízes nas profundidades de 0,1 a 0,5 m nos sistemas de monocultivo (M) e consórcio (C) de açaizeiro, com irrigação (100) e sem irrigação (0) em Castanhal-PA, Brasil.

Tratamento	Profundidade (cm)	Média (g dm ⁻³)	Desvio Padrão (g dm ⁻³)
C0	10	70,48	13,85
	20	44,94	16,64
	30	39,38	32,50
	40	6,40	7,13
	50	9,56	10,97
C100	10	73,26	24,39
	20	43,46	10,86
	30	46,87	62,12
	40	21,87	14,60
	50	19,08	11,61
M0	10	47,56	17,10
	20	40,20	65,14
	30	37,80	29,28
	40	15,45	12,52
	50	8,83	3,92
M100	10	57,69	8,03
	20	51,41	26,23
	30	19,03	10,58
	40	23,77	29,94
	50	13,07	14,33

Fonte: O Autor.

2.2.8. Análise de estabilidade espacial e temporal do teor de umidade do solo

Para a análise da estabilidade espaço-temporal do teor de umidade no solo (θ) foi adotado o procedimento recomendado por Vachaud et al. (1985) que compreende duas técnicas. A primeira técnica verifica a variabilidade espacial dos processos pela técnica das diferenças

médias relativas, onde é identificado quais e quantos locais são adequados para o monitoramento do θ com melhor precisão. O resultado é apresentado em percentual, organizado do menor para o maior, permitindo identificar as posições que representam a média e onde subestimam e superestimam os dados avaliados, sendo que os pontos que apresentam menor desvio padrão são os mais indicados para a representação da média geral (VACHAUD et al., 1985; HEATHMAN et al., 2012).

Para o cálculo da estabilidade espacial foi utilizado a diferença relativa (δ_{ij}) entre as medições individuais do θ na posição i e no instante j (θ_{ij}) e o valor médio em cada posição i no mesmo tempo j , demonstrado na equação 7.

$$\delta_{ij} = \frac{\theta_{ij} - \bar{\theta}_j}{\bar{\theta}_j} \quad Eq. (7)$$

Com esse resultado foi calculada a média das diferenças relativas para cada posição i no tempo j , dada pela equação 8, além de ser calculado o desvio padrão de cada diferença relativa dado pela equação 9.

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta_{ij}) \quad Eq. (8)$$

$$\sigma(\delta_i) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \bar{\delta}_i)^2} \quad Eq. (9)$$

Onde N corresponde ao número de pontos observados.

Na segunda técnica de Vachaud et al. (1985) é utilizado o teste não-paramétrico de Spearman (Equação 10) onde é verificada a variabilidade temporal dos pontos monitorados. Valores de r igual a 1 indicam estabilidade perfeita entre dois períodos, sendo assim quanto mais próximo de 1 for o r mais estável é o processo do θ .

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (\theta_{ij} - \theta_{ij'})^2}{n(n^2 - 1)} \quad Eq. (10)$$

Onde r_s é a correlação de Spearman; θ_{ij} é o teor de umidade no solo medido no local i e no tempo j ; $\theta_{ij'}$ é o teor de umidade no solo medido no local i na mesma posição, mas no tempo j' ; e n corresponde ao número de observações.

2.2.9. Análise estatística

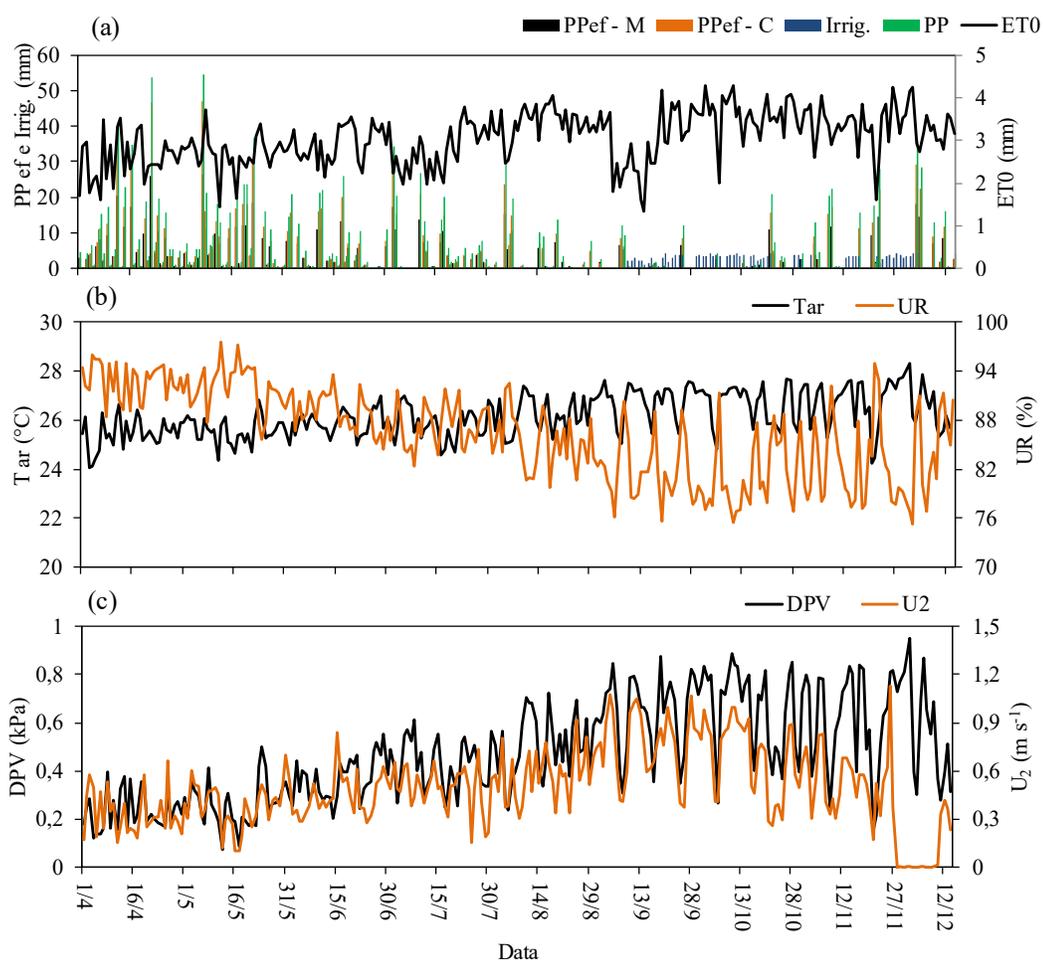
Os dados foram analisados utilizando o software Microsoft Office Excel (Addinsoft (2020) XLSTAT statistical and data analysis solution. Boston, USA.). Os dados de teor de umidade do solo foram submetidos a análise estatística descritiva, avaliando os valores médios, desvios-padrão nas profundidades de 0,1 a 0,5 m nos dois sistemas de cultivos e considerando as diferentes lâminas. As propriedades físicas, densidade de raízes foram submetidas a análise multivariada de componentes principais (ACP) com os teores de umidade do solo em cada profundidade, além disso foi utilizado a ACP relacionando os teores de umidade do solo em cada mês com os elementos climáticos para identificar associações entre esses fatores.

2.3. Resultados

2.3.1. Variabilidade dos elementos meteorológicos.

Entre os meses de avaliação, a precipitação total foi de 1.421,9 mm acima do dossel, sendo maior no mês de abril com 320 mm e menor no mês de setembro com 41 mm. Os meses de abril e maio foram observadas as maiores lâminas de precipitação efetiva (PPef), com 241 mm e 234 mm no consórcio e 170 mm e 165 mm no monocultivo, respectivamente (Figura 6a).

Figura 6 – Precipitação acima do dossel, precipitação efetiva no monocultivo e consórcio, evapotranspiração de referência e irrigação (a), temperatura do ar e umidade relativa abaixo do dossel (b), déficit de pressão de vapor e velocidade do vento (c) em plantio comercial de açaizeiro em Castanhal-Pa durante o período de abril a dezembro.



Fonte: O Autor

Ainda que os maiores volumes de PPef tenham sido registrados nos meses de abril e maio, no período de junho a dezembro ainda ocorreram eventos de precipitação, mas em menor quantidade, o que sugere a transição e início do período seco da região, com o menor evento de PPef ocorrendo nos meses de setembro com 24 mm no monocultivo, e 27 mm no consórcio. Devido a isso, nos meses de setembro a dezembro, foram aplicadas lâminas de irrigação durante todo o período com total de 199,11 e 138,21 mm no monocultivo e consórcio, respectivamente.

A evapotranspiração de referência (ET0) durante o período apresentou média de 3,05 mm ($\pm 0,61$), com mínima de 1,35 mm no mês de setembro e máxima de 4,29 mm em outubro. De abril a dezembro foi observado um aumento da ET0 média, passando de 2,56 mm no mês de abril para 3,32 mm no mês de dezembro.

Com a diminuição da precipitação ao longo dos meses avaliados, além do aumento na ET0, a temperatura do ar (Tar) também aumentou, em média 1,16 °C de abril para dezembro

dentro do dossel (Figura 6b). A umidade relativa (UR) média do período foi de 86,4% ($\pm 5,5$), e apresentou redução de 9,4% entre os meses de abril a dezembro.

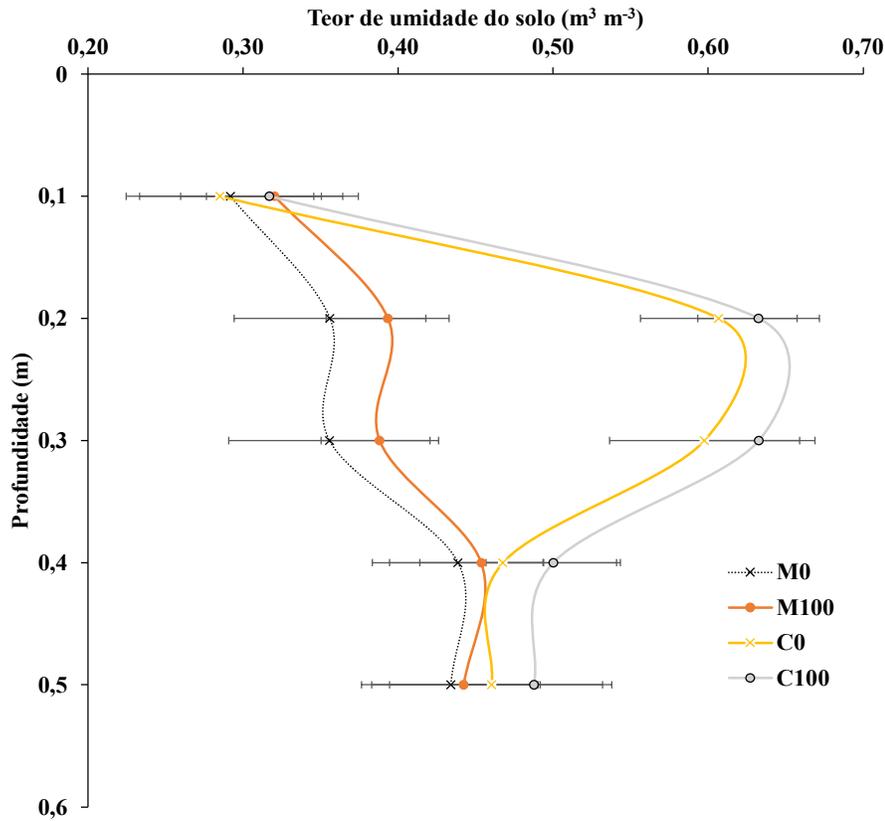
Outras variáveis que influenciam na demanda atmosférica são o déficit de pressão de vapor (DPV) e velocidade do vento (U_2), que durante os meses de abril e setembro apresentaram aumento de mais de 100%, correspondendo aos meses de mínima e máxima, respectivamente, para essas variáveis (Figura 6c). O DPV médio do período foi de 0,47 kPa ($\pm 0,21$), estando inicialmente em 0,23 kPa passando para 0,56 kPa, respectivamente nos meses de abril a dezembro. A velocidade do vento nos meses de setembro e outubro alcançaram $0,65 \text{ m s}^{-1}$ correspondendo aos maiores valores médios entre os meses monitorados, a média nesse período foi de $0,50 \text{ m s}^{-1}$ ($\pm 0,24$).

2.3.2. Sazonalidade do teor de umidade no solo

O teor de umidade do solo (θ) apresentou variabilidade tanto em relação ao tipo de cultivo no qual o açazeiro está inserido quanto à presença de irrigação. O θ na camada superficial de 0,1 m foi semelhante entre os sistemas de cultivo, com valores médios entre 0,29 e $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, mas com o aumento da profundidade das camadas, observou-se que o θ foi maior na área do consórcio com valores de 0,61 a $0,63 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nas camadas de 0,2 e 0,3 m (Figura 7), enquanto que nas profundidades de 0,4 e 0,5 m o θ variou de 0,44 a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ entre os sistemas de cultivo.

Quanto a presença de irrigação, é notório que o θ foi maior nos tratamentos que recebem irrigação, mantendo uma variação vertical uniforme de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ dentro do perfil em todas as camadas monitoradas, tanto no monocultivo como no consórcio. Nos sistemas de sequeiro, o θ no monocultivo em todas as camadas apresentou variação vertical de $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, diferindo do irrigado em 10% na camada de 0,1m, diminuindo essa diferença com o aumento da profundidade, chegando a 7% nas camadas de 0,2 e 0,3 m, e a 2% nas camadas de 0,4 e 0,5m. Enquanto que no consórcio, a camada de 0,5 m foi a que apresentou maior variação do θ , com média de $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,08$), com uma redução média de 6% em comparação ao irrigado.

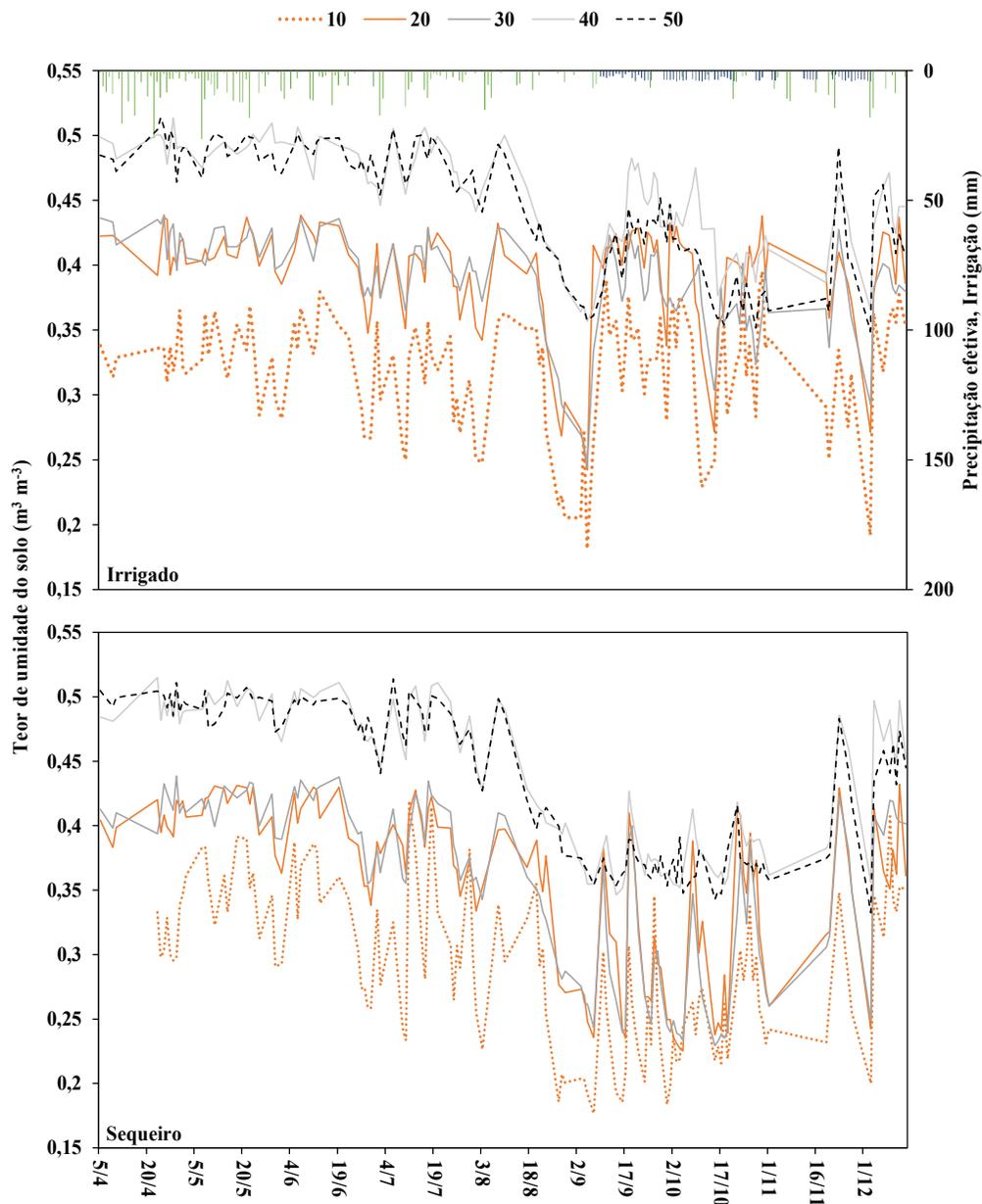
Figura 7 - Sazonalidade do teor de umidade no perfil do solo entre as profundidades de 0,1 a 0,5 m em cultivo de açazeiro irrigado (100) e sequeiro (0), em consórcio (C) e monocultivo (M) em Castanhall-PA, Brasil.



Fonte: O Autor.

Ao analisar o θ ao longo do período monitorado é possível dividir o cenário em decorrência dos eventos de precipitação, onde os meses de abril até meados de agosto compreendem o período com maior índice pluviométrico, enquanto que a metade de agosto até metade de novembro representam o período onde os eventos de chuva são menores. Nos dois sistemas, o θ alcança os maiores valores durante ou após eventos de precipitação, principalmente no primeiro semestre que é considerado o período chuvoso (Figura 8).

Figura 8 – Sazonalidade do teor de umidade no solo em cinco profundidades (0,1 a 0,5 m) em plantio de açaizeiro em monocultivo com lâmina de 0% da ET0 (sequeiro) e lâmina de 100% da ET0 (irrigado) em Castanhal-PA, Brasil. As barras verdes e azuis indicam os eventos de precipitação efetiva e irrigação, respectivamente.



Fonte: O Autor.

A variação que ocorre no θ durante todo o período é observada em todas as profundidades no monocultivo. No entanto, a camada de 0,1m é onde o θ sofre maior variação em virtude de estar mais próxima da superfície e mais suscetível aos eventos superficiais, enquanto que nas camadas de 0,4 e 0,5 m, o θ responde mais tardiamente aos eventos de precipitação (Figura 8). No cenário em que o monocultivo recebe irrigação, é observado que o θ nas camadas de 0,1 a 0,3 m conseguem manter a variação semelhante ao primeiro semestre, quando não há restrição hídrica, enquanto que nas camadas de 0,4 e 0,5 m a lâmina aplicada

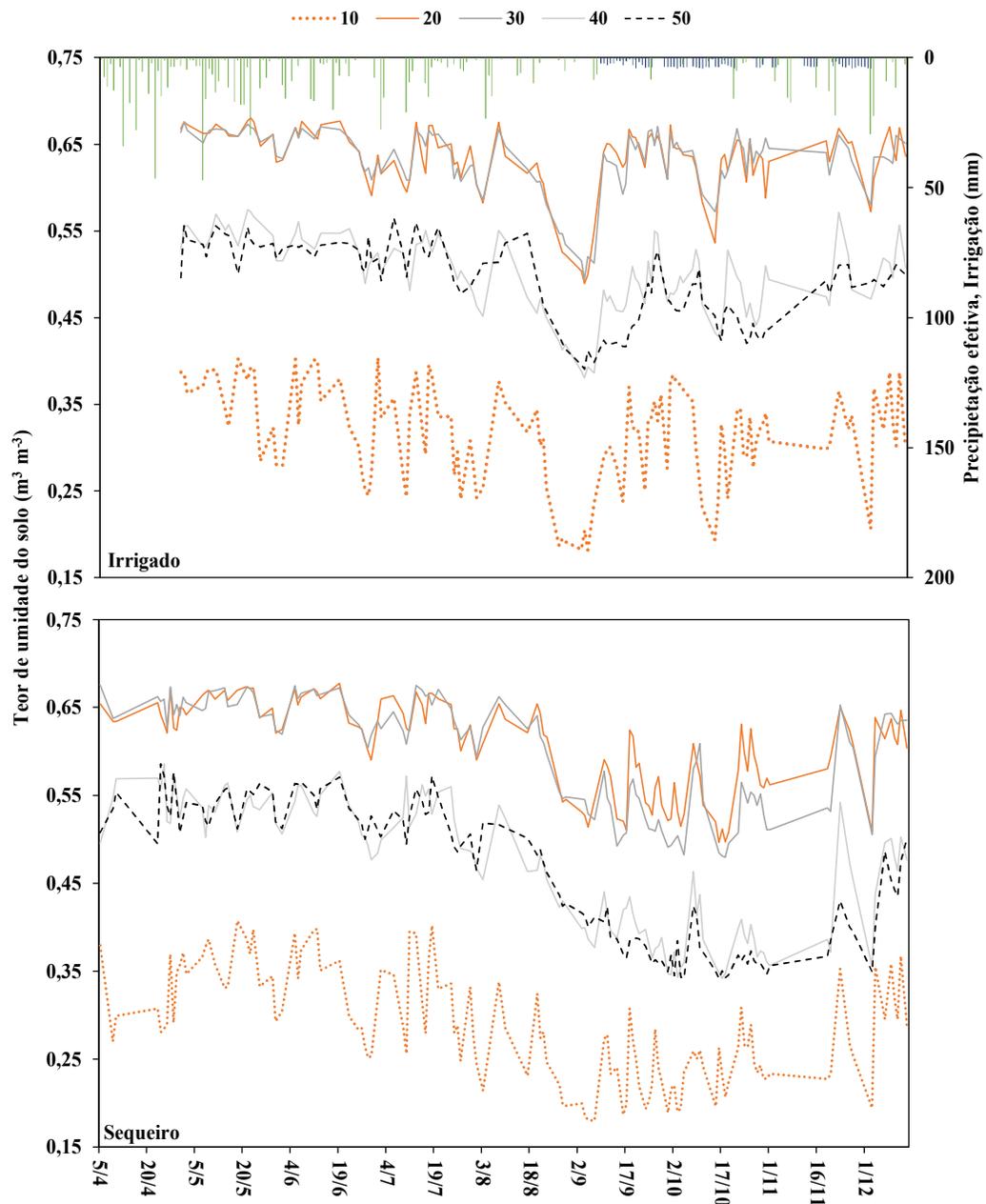
não é suficiente para manter essa variação, onde o θ , no período chuvoso, alcançava valores em torno de $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e no período seco os valores ficam em torno de $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Quanto ao cultivo de açaizeiro em monocultivo que não recebe irrigação no período seco, o θ diminui em praticamente 100% comparado ao θ do período chuvoso em todas as camadas monitoradas (Figura 8). Na camada de 0,1 m, o θ reduziu de 0,43 para $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ sendo a camada que mais sofre variação, enquanto que nas camadas de 0,2 e 0,3 m a variação é semelhante com redução de 0,44 para $0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, assim como nas profundidades de 0,4 e 0,5 m onde a redução foi de 0,51 para $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

É importante salientar que a diminuição significativa do θ em meados de agosto até início de setembro aconteceu pelo atraso no acionamento da irrigação, pois ainda não há parâmetros indicativos para se iniciar a irrigação na região. Comumente, os sistemas de irrigação são acionados entre os meses de setembro a novembro, o qual compreende o período seco da região.

No consórcio irrigado, a variabilidade do θ no período seco é semelhante ao observado no período chuvoso em todas as camadas monitoradas, sendo a lâmina aplicada suficiente para manter o padrão de umidade nesse local (Figura 9). Assim como no monocultivo, a profundidade de 0,1 m é onde o θ sofre maior variação, de 0,40 para $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, correspondendo uma redução de mais de 50% tanto no irrigado quanto no sequeiro. Enquanto no consórcio sem irrigação, nas profundidades 0,2 e 0,3 m a redução é de aproximadamente 29% e nas camadas 0,4 e 0,5 m a diminuição é mais de 40%.

Figura 9 - Sazonalidade do teor de umidade no solo em cinco profundidades (0,1 a 0,5 m) em plantio de açaizeiro em consórcio com cupuaçuzeiro com lâmina de 0% da ET_0 (sequeiro) e lâmina de 100% da ET_0 (irrigado) em Castanhal – PA, Brasil. As barras verdes e azuis indicam os eventos de precipitação efetiva e irrigação, respectivamente.



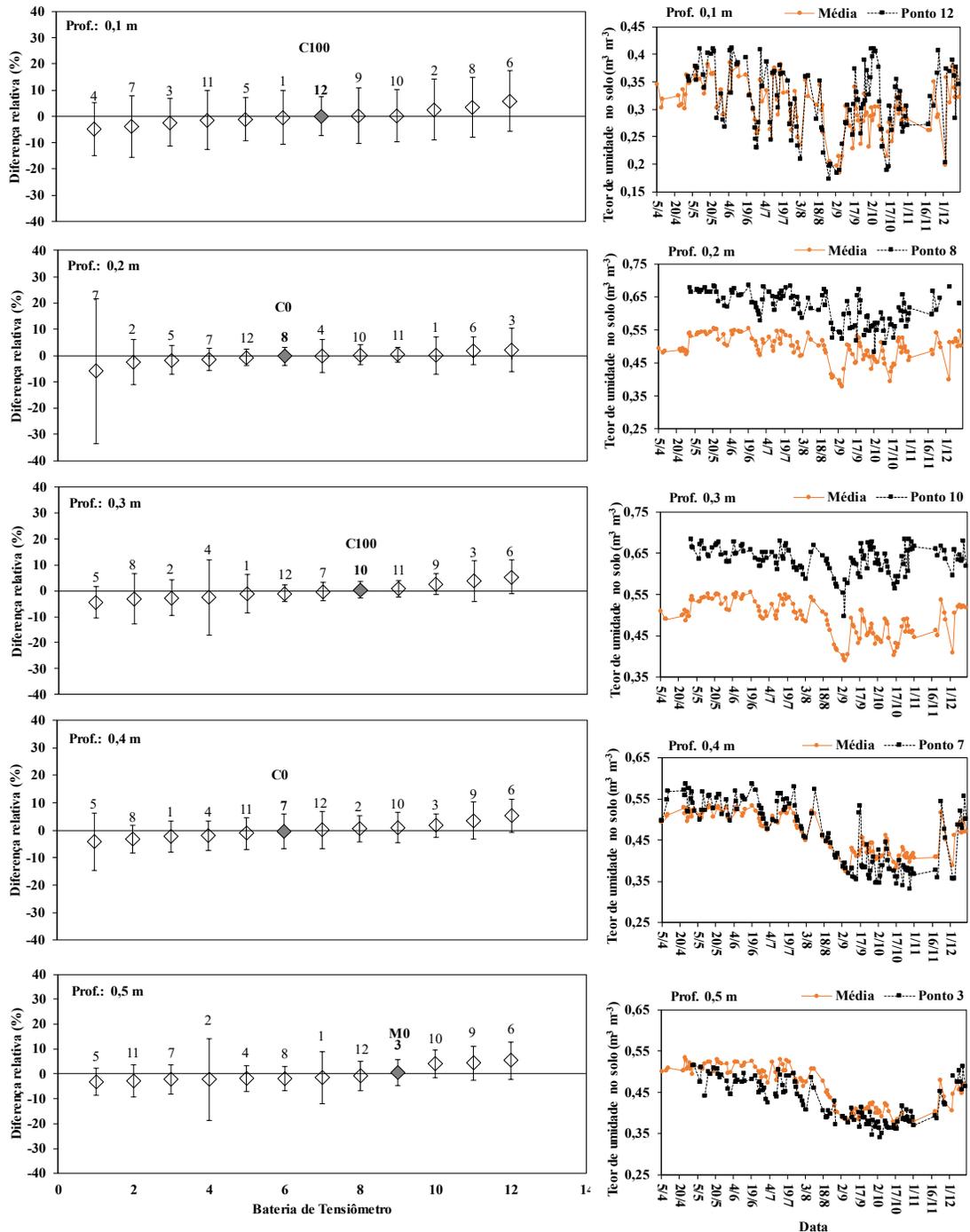
Fonte: O Autor.

2.3.3. Estabilidade espaço-temporal do teor de umidade no solo

Os valores de diferença relativa média (δ_i) considerando as 12 baterias de tensiometria nas cinco profundidades nos dois sistemas de cultivo de açazeiro monitorados entre os meses de abril a dezembro estão apresentados na Figura 10. Os dados foram plotados em ordem crescente, do menor para o maior, para identificar os locais onde os valores do θ foram superestimados e subestimados, e por fim identificar os pontos mais representativos para o valor

médio do θ nas diferentes profundidades com os valores mais baixos de δi e com o menor desvio padrão.

Figura 10 – Diferença relativa média classificada por profundidade do perfil do solo nas áreas de monocultivo sem irrigação (M0, correspondendo aos pontos de 1 a 3), monocultivo com irrigação (M100, pontos de 4 a 6), consórcio sem irrigação (C0, pontos de 7 a 9) e consórcio com irrigação (C100, pontos de 10 a 12) (na esquerda); e comparação entre o teor de umidade médio das áreas de açaizeiro em monocultivo e consórcio, com irrigação e sem irrigação e os pontos de teor de umidade com estabilidade temporal, durante o mesmo período, nas profundidades de 0,1 a 0,5m (na direita).



Fonte: O Autor.

De maneira geral, os pontos mais representativos foram identificados no cultivo do açazeiro em consórcio, com exceção da camada de 0,5 que foi melhor representada no cultivo em monocultivo. Apesar da maioria dos pontos estarem distribuídos no cultivo consorciado, a localização dos pontos foi diferente em cada profundidade, sendo os pontos para as camadas de 0,1 e 0,3 m localizados no cultivo irrigado e os pontos para as camadas de 0,1 e 0,4 situados no cultivo em sequeiro. Enquanto que para a camada de 0,5 m, o ponto mais representativo está localizado no monocultivo em sequeiro.

Ao avaliar os pontos que superestimam o θ nas camadas monitoradas, o ponto 6 foi identificado em todas as camadas com valores de superestimativa de 5% nas camadas de 0,1, 0,3, 0,4 e 0,5 m, enquanto que na camada de 0,2 m a superestimativa foi de 2% (± 5) caracterizando esse ponto entre os mais úmidos. Outros pontos que apresentaram superestimativa foram o ponto 8 na camada de 0,1 m com 3,5% (± 11); o ponto 3 nas camadas de 0,2 e 0,3 m com 2,3% (± 8) e 3,9% (± 8), respectivamente; e o ponto 9 nas profundidades de 0,4 e 0,5 com 3,5% (± 7) e 4,3% (± 7), respectivamente.

Com relação aos pontos de subestimativa do θ que caracterizam os pontos mais secos dos cultivos, o ponto 7 subestimou o teor para as camadas superficiais de 0,1 e 0,2 m com -3,8% (± 12) e -5,9% (± 27), respectivamente, sendo o último o maior valor de desvio padrão de δi observado entre os pontos analisados. Para as profundidades de 0,3 a 0,5m, o ponto 5 foi o que mais subestimou em até -4% os valores de θ .

Ao identificar os pontos que apresentam o teor de umidade mais representativos para as camadas monitoradas, os dados desses pontos foram comparados com os valores médios do θ de todos pontos para cada profundidade no intuito de validar os resultados (Figura 10). Os pontos nas camadas 0,1, 0,4 e 0,5 m ficaram bem próximo dos valores médios de θ em toda a área avaliada, com valores médios de 0,31, 0,4 e 0,4 $m^3 m^{-3}$, respectivamente. Enquanto que nas camadas de 0,2 e 0,3 m, os valores médios observados foram de 0,58 e 0,63 $m^3 m^{-3}$, apesar de serem os pontos mais representativos pela δi para essas camadas, apresentam valores acima da média nessas camadas.

Para finalizar a avaliação da estabilidade espaço-temporal do teor de umidade no solo, foi calculado os coeficientes de correlação de Spearman entre os nove meses de monitoramento do θ nos diferentes tratamentos (Tabela 4). De maneira geral, os coeficientes foram baixos e em alguns períodos foram significativos ($p < 0,5$), demonstrando que o teor de umidade no solo apresenta instabilidade nos diferentes sistemas, mesmo com a presença de irrigação. É

interessante notar que as altas correlações e significativas foram comuns entres os sistemas no mês de setembro e outubro, mês com menor volume de chuva e quando se iniciou a irrigação na área.

Tabela 4 – Matriz de correlação de Spearman entre os meses de abril a dezembro (P4 a P12) nos tratamentos de monocultivo (M) e consórcio (C) de açaizeiro, com irrigação (100) e sem irrigação (0) em Castanhal-PA, Brasil.

Local	Período	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
M0	P4	1,00								
	P5	0,41	1,00							
	P6	0,24	-0,09	1,00						
	P7	0,10	0,66	-0,43	1,00					
	P8	0,56	0,65	0,66	0,07	1,00				
	P9	0,29	-0,62	0,10	-0,52	-0,22	1,00			
	P10	0,27	-0,69	0,28	-0,44	-0,20	0,93	1,00		
	P11	0,45	0,31	0,49	0,44	0,46	-0,25	0,06	1,00	
	P12	-0,11	0,12	0,43	0,44	0,30	-0,17	0,10	0,63	1,00
M100	Período	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
	P4	1,00								
	P5	0,88	1,00							
	P6	0,11	-0,10	1,00						
	P7	-0,36	-0,19	0,02	1,00					
	P8	-0,26	-0,20	0,80	0,13	1,00				
	P9	0,71	0,59	0,04	-0,82	-0,15	1,00			
	P10	0,41	0,49	-0,44	-0,16	-0,48	0,05	1,00		
	P11	0,40	0,52	0,25	0,62	0,17	-0,30	0,33	1,00	
P12	-0,25	-0,26	0,53	0,27	0,57	-0,03	-0,95	-0,07	1,00	
C0	Período	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
	P4	1,00	0,20							
	P5	0,20	1,00							
	P6	0,58	-0,13	1,00						
	P7	-0,13	-0,67	0,65	1,00					
	P8	0,09	-0,43	0,73	0,77	1,00				
	P9	0,38	0,35	-0,04	-0,52	-0,12	1,00			
	P10	0,41	0,21	0,25	-0,20	0,08	0,92	1,00		
	P11	0,20	-0,76	0,52	0,75	0,34	-0,40	-0,12	1,00	0,59
P12	-0,23	-0,44	0,63	0,92	0,68	-0,35	0,01	0,59	1,00	
C100	Período	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
	P4	1,00								

P5	0,48	1,00							
P6	-0,50	-0,60	1,00						
P7	-0,30	-0,81	0,06	1,00					
P8	-0,07	-0,72	0,76	0,30	1,00				
P9	-0,07	0,58	0,06	-0,65	-0,22	1,00			
P10	0,22	0,85	-0,21	-0,82	-0,47	0,91	1,00		
P11	-0,20	-0,51	0,23	0,66	0,21	-0,10	-0,27	1,00	
P12	-0,85	-0,72	0,67	0,51	0,44	0,08	-0,31	0,56	1,00

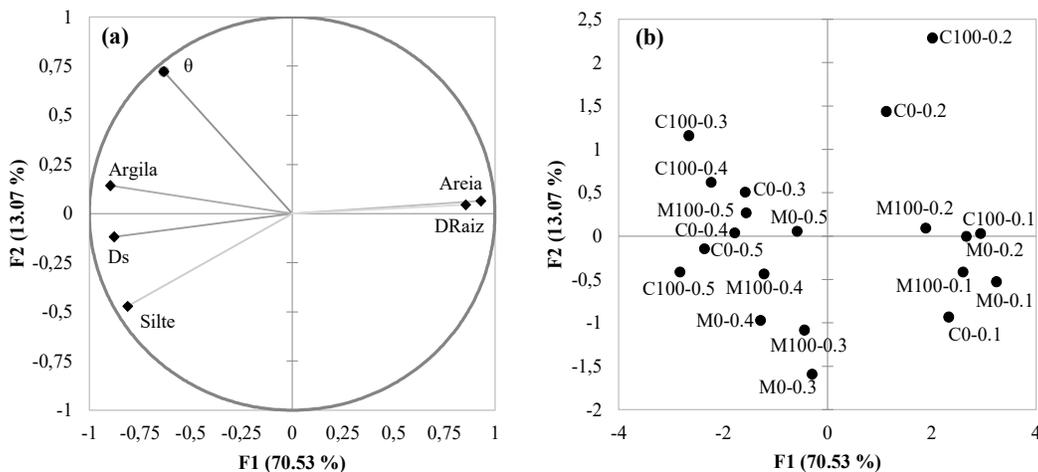
Valores em negrito significativos a 5% de probabilidade.

Fonte: O Autor.

2.3.4. Relação do teor de umidade no solo com as variáveis de solo e meteorológica.

Na análise multivariada de componentes principais (ACP) do teor de umidade no solo com as propriedades físicas do solo e a densidade de raízes, os dois primeiros componentes principais (CPs) responderam por 83,61% de toda variação dos dados, sendo 70,53% explicado pelo primeiro CP e 13,07% pelo segundo (Figura 11). Os teores de argila e silte e a densidade do solo apresentaram peso negativo no CP1, enquanto que a areia e a densidade de raízes apresentaram peso positivo nesse componente (Figura 11a). Por outro lado, no CP2, o teor de umidade no solo apresentou peso positivo e foi o maior nesse componente, não apresentando associações com as propriedades físicas do solo e densidade de raízes (Figura 11b).

Figura 11 – Análise multivariada de componentes principais (ACP) do teor de umidade do solo (θ) e as propriedades físicas do solo e a densidade de raízes em cinco profundidades (0,1, 0,2, 0,3, 0,4 e 0,5 m) nos diferentes sistemas de cultivo de açaizeiro (M100 – monocultivo irrigado, M0 – monocultivo sequeiro, C100 – consórcio irrigado, C0 – monocultivo sequeiro) em Castanhal-PA, Brasil.



Fonte: O Autor.

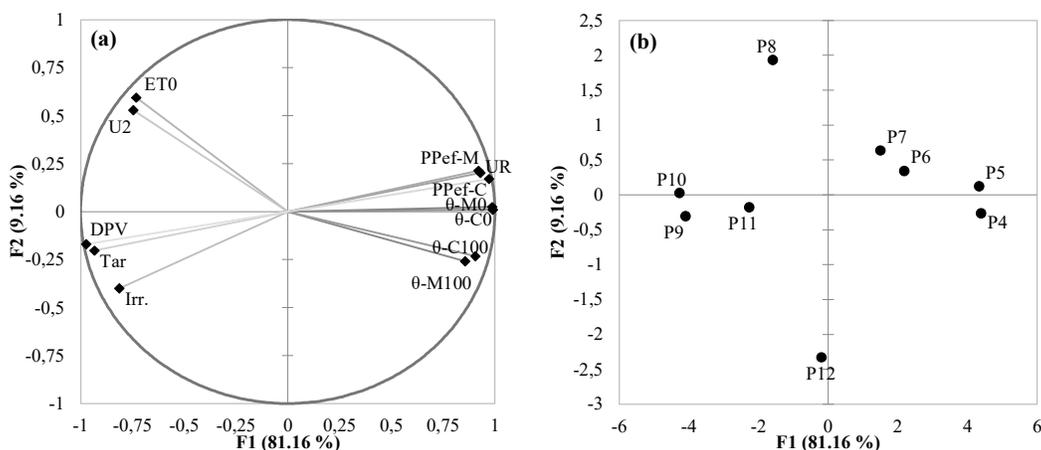
Em relação a ACP do teor de umidade no solo entre os meses de abril a dezembro com as variáveis meteorológicas, as duas primeiras CP explicam 90,31% da variabilidade dos dados

originais, sendo que a CP1 responde por 81,16%, a qual é suficiente para explicar a maioria da variabilidade dos valores (Figura 12).

Todos os vetores foram longos e, portanto, possuem dominância na análise, apresentando peso positivo para as variáveis de teor de umidade no solo em todos os tratamentos (θ M0, θ M100, θ C0 e θ C100), precipitação efetiva (PPef) no monocultivo (M) e consórcio (C) e a umidade relativa (UR) (Figura 13a). Com peso negativo para as variáveis de evapotranspiração de referência (ET0), irrigação (Irrig.), velocidade do vento (U2), temperatura do ar (Tar) e déficit de pressão de vapor (DPV).

Durante os meses de abril a julho, a variabilidade do θ é explicada pela precipitação efetiva nas áreas e pela umidade relativa, uma vez que a precipitação é a principal entrada de água e o período é denominado como o mais chuvoso da região (Figura 12b). Enquanto que no período de setembro a novembro, a irrigação, Tar, DPV, ET0 e U2 foram as variáveis que afetaram a variabilidade do θ , sendo o período que essas variáveis são acionadas, com o caso da irrigação, e que apresentam acréscimo como é o caso das demais. Com relação aos meses de agosto e dezembro, não houve associação com as variáveis abordadas.

Figura 12 – Análise multivariada de componentes principais (ACP) do teor de umidade no solo (θ) durante os meses de abril a dezembro (P4 a P12) e os elementos climáticos em cultivo de açaizeiro em monocultivo e consorciado, com e sem irrigação em Castanhal-PA, Brasil.



Fonte: O Autor.

2.4. Discussão

2.4.1. Sazonalidade do teor de umidade no solo

O teor de umidade nas camadas superficiais é influenciado diretamente pelos fatores da superfície, como o microclima abaixo do dossel que facilmente consegue retirar a umidade do solo. Em solos com textura mais arenosa, a água fica mais suscetível de ser retirada por evaporação ou ser infiltrada, fazendo com que o teor de umidade nessas camadas sofra muita

variação ao longo do dia e do ano (NEVES et al., 2017; FU et al., 2018), independentemente do tipo de sistema de cultivo do açaizeiro.

Com o aumento da profundidade, o teor de umidade no solo aumenta, com os acréscimos sendo observados a partir da camada de 0,2 m nos dois sistemas de cultivo, sendo maior nas camadas de 0,4 e 0,5 no monocultivo e no consórcio os teores são maiores nas camadas de 0,2 e 0,3 m. No consórcio é notado os maiores valores, pois nesse sistema há um aumento na densidade do solo nessas camadas além de haver um incremento do teor de argila e silte com o aumento da profundidade.

Resultados semelhantes foram encontrados nos estudos avaliados por Huang et al. (2016) ao avaliarem o teor de umidade em várias camadas, evidenciando também menores teores de umidade na superfície e o aumento desse teor com o aumento da profundidade, devido a superfície ter sido mais afetada pelos processos de evaporação de água do solo, e o incremento em profundidade responder ao aumento de teores de argila e silte em solos de boa drenagem.

Em sistemas consorciados, o sistema radicular é outro fator que influencia no teor de umidade no solo, pois as plantas apresentam mecanismos que depositam a água próxima das raízes ou acima da camada das raízes, e com o passar do tempo, essas áreas aumentam o teor de umidade no solo (ROMERO-SALTOS et al., 2005). As plantas inseridas na área como o açaizeiro, que apresenta raiz efetiva até a profundidade de 0,4 m (AUGUSTO; MARTINS; GÓES, 2004), e o cupuaçuzeiro, que entre as camadas de 0,2 a 0,3 m desenvolvem uma grande quantidade de raízes laterais ou secundárias (IICA, 2017), sendo verificado na tabela 3 que a densidade de raízes nessas duas camadas respondem por aproximadamente 50%, corroborando a ideia do aumento do teor de umidade nessas camadas.

O aumento do teor de umidade no solo em todas as camadas respondeu aos eventos de precipitação tanto no período chuvoso quanto no período seco, além de ser observado esse padrão também com a irrigação. Todavia, essas respostas à entrada de água no período chuvoso e seco são de magnitudes diferentes, uma vez que no período chuvoso o teor de umidade no solo está mais próximo da saturação e sua variação é menor (BIUDES et al., 2015; QUEIROZ et al., 2020).

Com a diminuição da pluviosidade no período seco e sua menor frequência de ocorrência, o teor de umidade contido no solo é ainda mais demandado para suprir as perdas pela evapotranspiração que aumentam neste período, principalmente nos sistemas sem irrigação. No entanto, em alguns dias, as chuvas de 4 mm diário não foram suficientes para recuperação do teor de umidade no solo, sendo verificada um aumento do teor de umidade na

profundidade de 0,5 m e, nos dias consecutivos, nota-se esse aumento nas outras camadas, podendo-se inferir a entrada de água por outros mecanismos a exemplo da ascensão capilar.

Esse movimento é observado tanto em culturas anuais (LIU et al., 2014; LIU et al., 2017) quanto em regiões de florestas tropicais, como foi observado por Romero-Saltos et al.(2005) na floresta nacional de Tapajós, ao notarem que no período seco o fluxo de água em direção as camadas superficiais são maiores em decorrência da diferença de potencial entre as camadas. Dessa forma, garante-se que as plantas nesse período realizem seus processos e completem as suas fases fenológicas (CHATURVEDI; RAGHUBANSHI, 2018).

No monocultivo irrigado, a reposição de água com uma lâmina de 100% da demanda atmosférica mantém o teor de umidade das camadas de 0,1 a 0,3 m, enquanto que nas camadas de 0,4 a 0,5 m esses teores se mantem abaixo do que é observado no período chuvoso, no entanto, todas as camadas apresentam teor de umidade bem acima do sistema de monocultivo em sequeiro no período seco. Esse fato pode estar associado a evapotranspiração da palmeira, uma vez que nessas profundidades está localizada a raiz efetiva do vegetal e o período seco é marcado com as maiores taxas de ET₀ (AZEVEDO et al., 2008; MARTORANO, 2017; KHAND et al., 2017).

No consórcio irrigado, a lâmina aplicada assegura o padrão do teor de umidade no solo nesse sistema, demonstrando que a quantidade de água aplicada é suficiente para a reposição do teor de umidade no solo que é retirado do sistema, seja pela planta ou pela atmosfera. O que está relacionado ao fato do microclima dentro do dossel que é proporcionado pelo consórcio das culturas de alturas diferentes, diminuir a influência dos efeitos dos componentes da evapotranspiração (VON ARX; DOBBERTIN; REBETEZ, 2012; VON ARX et al., 2013).

2.4.2. Estabilidade espaço-temporal do teor de umidade no solo

A estabilidade tanto espacial como temporal do teor de umidade no solo é influenciada por diversos fatores, provocando sua variabilidade numa área tanto na superfície em decorrência de fenômenos relacionados a micrometeorologia, à cobertura do solo ou topografia, como em profundidade, em virtude da textura e estrutura do solo e a disposição das raízes (RUIZ-SINOGA et al., 2011; HEATHMAN et al., 2012; JIA; SHAO; JIA, 2013; QUEIROZ et al., 2020). Na avaliação das áreas, a maioria dos pontos representativos estão distribuídos no sistema consorciado, principalmente nas camadas de 0,1 a 0,4 m, sendo o monocultivo mais representativo para o teor de umidade na profundidade de 0,5 m.

Ainda que os pontos padrões estejam no consórcio, os pontos que representam o teor de umidade nas camadas de 0,2 e 0,3, quando plotados, são superiores ao que é observado na média, nesses casos poderiam ser avaliados outros pontos para essas profundidades. A maioria dos trabalhos sobre a estabilidade do teor de umidade pela técnica de diferença relativa caracterizam os pontos mais próximo de zero e com menor desvio padrão como preconizado por Vachaud et al. (1985). No entanto há autores que escolhem os pontos representativos com base apenas na diferença relativa média próxima de zero, mesmo que esses pontos apresentem grande desvio padrão (MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ; CEBALLOS, 2005).

Já os pontos localizados no monocultivo, principalmente no tratamento irrigado, apresentaram os pontos de superestimativa e subestimativa do teor de umidade, o que se deve a grande facilidade na variabilidade nesse sistema que é observada na maioria das camadas ao longo do tempo, como foi observado por Queiroz et al (2020) que associaram os grandes desvios padrões as constantes flutuações no teor de umidade no solo nas camadas monitoradas.

Na análise de estabilidade temporal dos pontos amostrados, observa-se instabilidade em todos os sistemas, até mesmo nos que recebem irrigação, com baixos coeficientes de correlação. Nesse cenário, é importante observar que dentro do perfil do solo, o sistema é dinâmico tanto na superfície quanto nas camadas subsuperficiais pelos processos de entrada e saída de água no solo que variam bastante.

As correlações moderadas e baixas, que configuram instabilidade do teor de umidade no solo, são descritas tanto com relação ao tipo de cobertura do solo quanto em relação as profundidades monitoradas, e sua instabilidade geralmente está relacionada aos processos de umedecimento e secagem do solo porque após eventos de chuva o coeficiente de Spearman diminui (NEVES et al., 2017). Há estudos que encontram alto coeficiente de correlação de Spearman em períodos mais secos e de transição, e em zonas mais áridas (DUMEDAH; COULIBALY, 2011; RUIZ-SINOVA et al., 2011; RÖTZER; MONTZKA; VEREECKEN, 2015; QUEIROZ et al., 2020).

Apesar da variabilidade espacial, foram identificados pontos de estabilidade do teor de umidade do solo para essas áreas de cultivo em diferentes profundidades, em especial na profundidade designada como raiz efetiva do açaizeiro que corresponde a 0,4 m, com o ponto localizado mais ao centro da área de estudo. Quanto a variabilidade temporal, durante todo o período avaliado não houve estabilidade do teor de umidade o que chama atenção para o monitoramento frequente para evitar que a cultura sofra com déficit hídrico.

2.4.3. Relação do teor de umidade no solo com as variáveis do solo e meteorológicas

Apesar de não haver associações das propriedades do solo e da densidade de raízes com o teor de umidade no solo (θ) para explicar toda a variabilidade do teor nas áreas amostradas, esses fatores são marcantes nas diferentes profundidades independente do sistema. Nas camadas superficiais o teor de areia e de densidade de raízes são inversamente proporcionais ao θ , enquanto que o aumento do θ nas camadas mais profundas (0,3 a 0,5 m) é também verificado o incremento de argila, silte e a densidade do solo nessas camadas (Tabela 2 e 3).

Camadas de solos de texturas mais arenosa perdem água mais facilmente por evaporação ou infiltração, pois o poder de retenção de água nesses solos é menor quando comparado com solos com maior teor de argila (CENTENO et al., 2017; SILVA et al., 2018), e em virtude dessa característica possuem uma relação inversa com o θ . Enquanto que o aumento no teor de silte e argila aumentam a capacidade de retenção de água no solo, dessa forma o θ são maiores em camadas com o incremento dessas partículas no solo (PHIL-EZE, 2010).

Resultados encontrados por Li et al. (2018) e Queiroz et al. (2020) mostraram que ao correlacionar o θ com as propriedades físicas, notaram que o teor de areia foi um fator que afetou o θ em diversas camadas no perfil e o teor de argila se correlacionou positivamente com o θ , dessa forma com o incremento de argila em profundidade houve o aumento no θ .

Com relação as associações com as variáveis meteorológicas, o teor de umidade no solo foi dominado pela precipitação efetiva e umidade relativa nos meses do período chuvoso da região, enquanto que no período seco os elementos ligados a evapotranspiração foram dominantes. Dessa forma, com as variações ocorridas na velocidade do vento (U_2), evapotranspiração de referência (ET_0), déficit de pressão de vapor (DPV) e temperatura do ar (Tar) no período seco, essas variáveis podem ser importantes indicadores para começar o acionamento dos sistemas de irrigação na região.

Essa relação alta e positiva entre o θ e a precipitação efetiva é devido ao fato de a pluviosidade configurar a principal entrada de água no sistema solo-planta-atmosfera e ser mais frequente e com maiores volumes no período chuvoso da região (abril a junho), além disso nesse período é notado os maiores valores de umidade relativa do ar. Enquanto que nos meses de setembro a novembro, período que foi acionado a irrigação, por isso essa variável obteve associação com θ , é marcado pelo aumento significativo da U_2 , DPV, Tar e ET_0 , com valores médios de $0,65 \text{ m s}^{-1}$, $0,64 \text{ kPa}$, $26,74 \text{ }^\circ\text{C}$ e $3,29 \text{ mm}$, respectivamente.

Com tudo, as variáveis meteorológicas afetam mais a variabilidade do θ do que as variáveis relacionadas ao solo nessas áreas de cultivo de açaizeiro. Dessa forma, buscar um monitoramento do teor de umidade relacionado as condições atmosféricas podem auxiliar a tomada de decisão do produtor no campo.

2.5. Conclusões

O teor de umidade no solo é semelhante em algumas camadas entre os sistemas de cultivo de açaizeiro, sendo os maiores teores observados no cultivo consorciado.

Pela diferença relativa, os pontos mais representativos e estáveis para toda área nas diferentes camadas estão localizados no cultivo consorciado, com exceção da profundidade de 0,5m que está situada no monocultivo. Quanto à estabilidade temporal, de acordo com o coeficiente de Spearman, observa-se que todos os sistemas apresentam instabilidade pela dinâmica de água que ocorre espacialmente e temporalmente ao longo do período.

Baseado nas associações analisadas, notou-se que as propriedades físicas do solo e a densidade de raízes não foram suficientes para explicar toda a variabilidade do teor de umidade no solo nas diferentes profundidades. Por outro lado, os elementos climáticos U2, DPV, Tar e ET0 foram importantes para explicar a variabilidade do teor de umidade no período seco, sendo esses fatores importantes indicadores para o começo da irrigação na região.

Apesar dos resultados obtidos, ainda precisa de análises complementares para o melhor direcionamento do manejo do teor de umidade do solo para essa cultura nos diferentes sistemas de cultivo, o que será buscado em pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. S. ; GAMA, J. R. V. Quintais agroflorestais: estrutura, composição florística e aspectos socioambientais em área de assentamento rural na Amazônia brasileira. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 4, p. 1041–1053, 2014.

ALMEIDA, U. O.; NETO, R. C. A.; LUNZ, A. M. P.; COSTA, D. A.; ARAUJO, J. M.; RODRIGUES, M. J. S. Crescimento de açaizeiro (*Euterpe precatoria* Mart.) consorciado com bananeira. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, v. 5, n. 3, p. 154–166, 2018.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

ALVES, R. M. **Implantação de um pomar de cupuaçuzeiro com a cultivar BRS Carimbó.**

1ª ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2012.

ANDRADE, C. L. T.; BORGES JÚNIOR, J. C. F; COUTO, L. Características físico-hídricas e dinâmica de água no solo. *In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação***. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013. p.71-143.

ARYA, P. S. **Introduction to micrometeorology**. Elsevier, 2001. 447 p.

AUGUSTO, S. G.; MARTINS, P. F. DA S; GÓES, A. V. DE M. Caracterização do sistema radicular efetivo do cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.), da pupunheira (*Bactris gaesipaes* H. B. K.) e do açaizeiro (*Euterpe oleraceae* Mart.) em Latossolo Amarelo álico na Amazônia. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, p. 57–65, 2004.

AZEVEDO, J. A. de; JUNQUEIRA, N. T. V.; BRAGA, M. F.; SÁ, M. A. C. de. **Parâmetros de irrigação durante o período seco em plantas jovens de dendê cultivadas no Cerrado**. Planaltina: Embrapa Solos, 2008. 4p. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico, 146).

AZEVEDO, J.; FREIRE, A. G.; ALENCAR, T. L.; SANTOS, C. L. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; BEZERRA, F. M. L.; MOTA, J. C. A. Desempenho de sistemas de leitura de tensiômetro em condições de temperatura controlada. **Irriga**, v. 22, n. 4, p. 735–756, 2017.

BARONI, G.; ORTUANI, B.; FACCHI, A.; GANDOLFI, C. The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field. **Journal of Hydrology**, v. 489, p. 148-159, 2013.

BIUDES, M. S.; VOURLITIS, G. L.; MACHADO, N. G.; ARRUDA, P. H. Z.; NEVES, G. A. R.; LOBO, F. A.; NEALE, C. M. U; NOGUEIRA, J. S. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 202, p. 112-124, 2015.

BRONDÍZIO, E. S.; SAFAR, C. A. M.; SIQUEIRA, A. D. The urban market of Açaí fruit (*Euterpe oleracea* Mart.) and rural land use change: Ethnographic insights into the role of price and land tenure constraining agricultural choices in the Amazon estuary. **Urban Ecosystems**, v. 6, p. 67–97, 2002.

BRUNO, R. D.; ROCHA, H. R.; FREITAS, H. C.; GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 2477–2489, 2006.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; ALMEIDA, M. C. Relações solo-superfície geomórfica em uma topossequência várzea-terra firme na região de Humaitá (AM). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 325–336, 2012.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; AQUINO, R. E.; OLIVEIRA, I. A. Superfícies geomórficas e atributos do solo em uma

topossequência de transição várzea-terra firme. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, p. 132–142, 2013.

CARVALHO, A. V.; SILVEIRA, T. F. F.; MATTIETTO, R. A.; OLIVEIRA, M. S. P.; GODOY, H. T. Chemical composition and antioxidant capacity of açai (*Euterpe oleracea*) genotypes and commercial pulps. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 97, n. 5, p. 1467–1474, 2017.

CARVALHO, J. E. U. DE; NASCIMENTO, W. M. O. DO. Technological innovations in the propagation of Açai palm and Bacuri. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 40, n. 1, 2018.

CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; SOUSA, R. O.; TIMM, L. C. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017.

CHATURVEDI, R. K.; RAGHUBANSHI, A. S. Soil Water Availability Influences Major Ecosystem Processes in Tropical Dry Forest. **International Journal of Hydrology**, v. 2, n. 1, 2018.

CHO, E.; CHOI, M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula. **Journal of Hydrology**, v. 516, p. 317–329, 2014.

COELHO, E. F.; SILVA, A. J. P. DA; MIRANDA, J. H. DE. Definição do posicionamento de sensores para monitoramento da água no solo em bananeira irrigada por diferentes sistemas de irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 4, p. 608–618, 2010.

DAVENPORT, J. R.; STEVENS, R. G.; WHITLEY, K. M. Spatial and Temporal Distribution of Soil Moisture in Drip-irrigated Vineyards. **HortScience**, v. 43, n. 1, p. 229–235, 2008.

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M.; ALMEIDA, B. G.; RUIZ, H. A.; KLEIN, V. A.; DECHEN, S. C. F.; FERNANDES, R. B. A. Análise Granulométrica. In: TEIXEIRA, P. C. et al. (Eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017. p. 574.

DUMEDAH, G.; COULIBALY, P. Evaluation of statistical methods for infilling missing values in high-resolution soil moisture data. **Journal of Hydrology**, v. 400, n. 1-2, p. 95-102, 2011.

EWERS, R. M.; BANKS-LEITE, C. Fragmentation Impairs the Microclimate Buffering Effect of Tropical Forests. **Plos one**, v. 8, n. 3, 2013.

FARIAS NETO, J. T. BRS Pai d'Égua: Cultivar de açai para terra firme com suplementação

- hídrica. Embrapa Amazônia Oriental: **Comunicado técnico**, v. 317, 2019.
- FOKEN, T. Specifics of the Near-Surface Turbulance. In: **Micrometeorology**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017. p. 109-120.
- FU, C. F.; BIAN, Z. H.; XI, J. J.; ZHAO, J. B. Spatial distribution characteristics of soil moisture in different types of sand dune in the Mu Us Sandy Land, adjacent to north of Chinese Loess Plateau. **Environmental earth sciences**, v. 77, n. 4, p. 151, 2018.
- GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, A. P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 155–164, 1999.
- HARDWICK, S. R.; TOUMI, R.; PFEIFER, M.; TURNER, E. C.; NILUS, R.; EWERS, R. M. The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 201, p. 187–195, 2015.
- HEATHMAN, G. C.; COSH, M. H.; HAN, E.; JACKSON, T. J.; MCKEE, L.; MCAFEE, S. Field scale spatiotemporal analysis of surface soil moisture for evaluating point-scale in situ networks. **Geoderma**, v. 170, p. 195-205, 2012.
- HOMMA, A. K. O.; NICOLI, C. M. L.; MENEZES, A. J. E. A.; MATOS, G. B.; CARVALHO, J. E. U.; NOGUEIRA, O. L. **Custo Operacional de Açaizeiro Irrigado no Nordeste Paraense**. 1ª ed. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2006.
- HUANG, X.; SHI, Z. H.; ZHU, H. D.; ZHANG, H. Y.; AI, L.; YIN, W. Soil moisture dynamics within soil profiles and associated environmental controls. **Catena**, v. 136, p. 189-196, 2016.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Produção de açaí extrativista e cultivado. 2019. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/> >. Acessado em: 1 out 2019.
- INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA LA AGRICULTURA – IICA. Cupuaçu *Theobroma grandiflorum*. 2017. 23p.
- JARDIM, M. A. G.; SANTOS, G. D.; MEDEIROS, T. D. S.; FRANCEZ, D. D. C. Diversidade e estrutura de palmeiras em floresta de várzea do estuário amazônico. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v. 2, n. 4, p. 67-84, 2007.
- JIA, Y.; SHAO, M.; JIA, X. Spatial pattern of soil moisture and its temporal stability within profiles on a loessial slope in northwestern China. **Journal of hydrology**, v. 495, p. 150-161, 2013.
- KHAND, K.; NUMATA, I.; KJAERGAARD, J.; VOURLITIS, G. L. Dry season evapotranspiration dynamics over human-impacted landscapes in the southern Amazon using the Landsat-based METRIC model. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, p. 706, 2017.
- LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos. Oficina de textos, 2016.

LI, T.; SHAO, M. A.; JIA, Y.; JIA, X.; HUANG, L. Profile distribution of soil moisture in the gully on the northern Loess Plateau, China. **Catena**, v. 171, p. 460-468, 2018

LIU, Y.; WANG, J.; LIU, D.; LI, Z.; ZHANG, G.; TAO, Y.; XIE, J.; PAN, J.; CHEN, F. Straw Mulching Reduces the Harmful Effects of Extreme Hydrological and Temperature Conditions in Citrus Orchards. **Plos one**, v. 9, n. 1, p. 1-9, 2014.

LIU, Z.; QIN, A.; ZHANG, J.; SUN, J.; NING, D.; ZHAO, B.; XIAO, J.; LIU, Z.; DUAN, A. Maize Yield as a Function of Water Availability across Precipitation Years in the North China Plain. **Crop Science**, v. 57, n. 4, p. 2226, 2017.

MAROUELLI, W. A.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C.; SOUSA, V. F. Manejo da água de irrigação. In: SOUSA, V. F. de; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 158-232.

MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J.; CEBALLOS, A. Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis. **Journal of Hydrology**, v. 312, n. 1-4, p. 28-38, 2005.

MARTINS, I. C. V. S.; BORGES, N. A.; STENVINKEL, P.; LINDHOLM, B.; ROGEZ, H.; PINHEIRO, M. C. N.; NASCIMENTO, J. L. M.; MAFRA, D. The value of the Brazilian açai fruit as a therapeutic nutritional strategy for chronic kidney disease patients. **International Urology and Nephrology**, v. 50, n. 12, p. 2207-2220, 2018.

MARTORANO, L. G. Expansion of palm oil (*Elaeis guineensis* Jacq.) in the state of Maranhão and soil water deficit limitations in the Brazilian Amazon. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 11, p. 1386, 2017.

MERRIAM, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. 271p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water resources research**, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

NEVES, H. H. D.; MATA, M. G. F. D.; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, D. F. D.; WENDROTH, O. O.; CEDDIA, M. B. Spatial and temporal patterns of soil water content in an agroecological production system. **Scientia Agricola**, v. 74, n. 5, p. 383-392, 2017.

NOGUEIRA, A. K. M.; SANTANA, A. C.; GARCIA, W. S. A dinâmica do mercado de açai fruto no Estado do Pará: de 1994 a 2009. **Revista Ceres**, v. 60, n. 3, p. 324-331, 2013.

OLIVEIRA, M. S. P.; CARVALHO, J. E. U.; NASCIMENTO, W. M. O.; MÜLLER, C. H. Cultivo do Açaizeiro para Produção de Frutos. Embrapa Amazônia Oriental: **Circular Técnica**, v. 26, 2002.

OLIVEIRA, M.S.P.; FARIAS NETO, J. T. Cultivar BRS-Pará: Açaizeiro para produção de

- frutos em terra firme. Embrapa Amazônia Oriental: **Comunicado técnico**, v. 114, 2004.
- PEREIRA, P. C.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; SILVA, M. J. Water balance in soil cultivated with forage cactus clones under irrigation. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 3, p. 776–785, 2017.
- PHIL-EZE, P. O. Variability of soil properties related to vegetation cover in a tropical rainforest landscape. **Journal of Geography and Regional planning**, v. 3, n. 7, p. 177, 2010.
- PY-DANIEL, R.; PY-, R. Caracterização da área amostrada. In: **Biodiversidade Do Médio Madeira**. [s.l: s.n.]. p. 35–42.
- QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; JARDIM, A. M. D. R. F.; SOUZA, C. A. A.; ARAÚJO JÚNIOR, G. D. N.; MORAIS, J. E. F.; SOUZA, L. S. B. Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. **Catena**, v. 188, p. 104457, 2020.
- ROMERO-SALTOS, H.; STERNBERG, L. S. L.; MOREIRA, M. Z.; NEPSTAD, D. C. Rainfall exclusion in an eastern Amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake. **American Journal of Botany**, v. 92, n. 3, p. 443–455, 2005.
- RÖTZER, K.; MONTZKA, C.; VEREECKEN, H. Spatio-temporal variability of global soil moisture products. **Journal of hydrology**, v. 522, p. 187-202, 2015
- RUIZ-SINOGA, J. D.; MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; GABARRÓN-GALEOTE; M. A.; GARCÍA-MARÍN, R. The effects of soil moisture variability on the vegetation pattern in Mediterranean abandoned fields (Southern Spain). **Catena**, v. 85, n. 1, p. 1-11, 2011.
- SANTANA, D. P.; SANS, L. M. A. Classes de solo e irrigação. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013. p. 15-68.
- SANTOS, B. L. G.; GAMA, J. R. V.; RIBEIRO, R. B. S.; ANJOS, K. F.; GOMES, K. M.; XIMENES, L. C.; MELO, L. O. Estrutura e valoração de *Euterpe oleracea* em uma floresta de várzea na Amazônia. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 3, p. 391–396, 2018.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A. DE; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. DE; ARAUJO FILHO, J. C. DE; OLIVEIRA, J. B. DE; CUNHA, T. J. F. **Sistema de classificação de solos**. 5. ed. rev ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.
- SCHERER, T. F.; FRANZEN, D.; CIHACEK, L. Soil Water, and Plant Characteristics important to irrigation. **NDSU Extension Service**, v. 1675, p. 1–16, 2017.
- SILVA, B. M.; SILVA, E. A.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, M. M.; SERAFIM, M. E. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 464–475, abr. 2014.
- SILVA, C. J. DA; SILVA, C. A.; FREITAS, C. A.; GOLYNSKI, A.; SILVA, L. F. M.;

- FRIZZONE, J. A. Tomato water stress index as a function of irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 95–100, 2018.
- SILVA, G. C.; NETO, S. E. A.; SILVA, A. N.; ALMEIDA, W. A. Artrópodes como indicadores da conservação do solo sob diferentes usos agrícolas no sudoeste Amazônico. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, v. 4, n. 2, 2017.
- SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; BORBA, J. O. M.; TAVARES, D. D.; AMARAL, A. J.; MARTINS, A. F. Solos arenosos para Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em Arez, Rio Grande do Norte. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, n. 5, p. 581-589, 2018.
- SILVESTRE, W. V. D.; SILVA, P. A.; PALHETA, L. F.; OLIVEIRA NETO, C. F.; SOUZA, R. O. R. M.; FESTUCCI-BUSELLI, R. A.; PINHEIRO, H. A. Differential tolerance to water deficit in two açai (*Euterpe oleracea* Mart.) plant materials. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 39, n. 1, p. 4, 2017.
- TETENS, V. O. Über einige meteorologische Begriffe. **Zeitschrift Geophysic**, v. 6, n.1, p. 297-309, 1930.
- SOUZA, C. F.; PIRES, R. C. M.; MIRANDA, D. D.; VARALLO, A. C. T. Calibração de sondas fdr e tdr para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 597-606, 2013.
- VACHAUD, G.; PASSERAT DE SILANS, A.; BALABANIS, P.; VAUCLIN, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, n. 4, p. 822-828, 1985
- VALLEJO, M. I.; GALEANO, G.; BERNAL, R.; ZUIDEMA, P. A.. The fate of populations of *Euterpe oleracea* harvested for palm heart in Colombia. **Forest Ecology and Management**, v. 318, p. 274–284, 2014.
- VAN DER PLOEG, M. J.; GOOREN, H.; BAKKER, G.; DE ROOIJ, G. H. Matric potential measurements by polymer tensiometers in cropped lysimeters under water-stressed conditions. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 3, p. 1048-1054, 2008.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
- VASCONCELOS, M. S.; MOTA, E. F.; GOMES-ROCHETTE, N. F.; NUNES-PINHEIRO, D. C. S.; NABAVI, S. M.; MELO, D. F. Açai or Brazilian Berry (*Euterpe oleracea*). In: **Nonvitamin and Nonmineral Nutritional Supplements**. Elsevier, 2019. p. 131–133.
- VAZ, Ú. L.; NABOUT, J. C. Using ecological niche models to predict the impact of global climate change on the geographical distribution and productivity of *Euterpe oleracea* Mart. (Arecaceae) in the Amazon. **Acta Botanica Brasilica**, v. 30, n. 2, p. 290–295, 2016.

- VON ARX, G.; DOBBERTIN, M.; REBETEZ, M. Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 166, p. 144-155, 2012.
- VON ARX, G.; GRAF PANNATIER, E.; THIMONIER, A.; REBETEZ, M. Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate. **Journal of Ecology**, v. 101, n. 5, p. 1201-1213, 2013.
- YAMAGUCHI, K. K. DE L.; PEREIRA, L. F. R.; LAMARÃO, C. V.; LIMA, E. S.; VEIGA-JUNIOR, V. F. Amazon acai: Chemistry and biological activities: A review. **Food Chemistry**, v. 179, p. 137–151, 2015.
- YANG, T.; ALA, M.; ZHANG, Y.; WU, J.; WANG, A.; GUAN, D. Characteristics of soil moisture under different vegetation coverage in Horqin Sandy Land, northern China. **Plos one**, v. 13, n. 6, p. e0198805, 2018.
- YAO, Y.; WANG, X.; ZENG, Z.; LIU, Y.; PENG, S.; ZHU, Z.; PIAO, S. The Effect of Afforestation on Soil Moisture Content in Northeastern China. **Plos one**, v. 11, n. 8, p. e0160776, 2016.
- YOKOMIZO, G. K.-I.; MOCHIUTTI, S.; QUEIROZ, J. A. L. SANTOS, G. R. DOS; FURTADO, R. G.; BRANDÃO, A. P. COLARES, I. B. Estimativas de parâmetros genéticos para caracteres de frutos em açazeiros no Amapá. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 3, p. 985, 2016.
- ZENG, C.; SHAO, M.; WANG, Q.; ZHANG, J. Effects of land use on temporal-spatial variability of soil water and soil-water conservation. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, v. 61, n. 1, p. 1–13, 2011.