

FELIPE CARVALHO SANTANA

**DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO E MODELAGEM DIGITAL DE RADIAÇÃO EM
SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CAFÉ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

S232d
2016

Santana, Felipe Carvalho, 1990-

Dinâmica da água no solo e modelagem digital de radiação
em sistemas agroflorestais de café / Felipe Carvalho Santana. –
Viçosa, MG, 2016.

xii, 73f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Café - Sombreamento. 2. Precipitação (Metereologia).
3. Café - Cultivo em sistema agroflorestais - Efeito da
temperatura. 4. *Erythrina poppigiana*. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-graduação em
Agroecologia. II. Título.

CDD 22. ed. 633.73

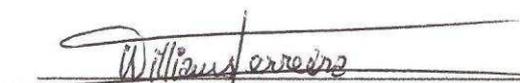
FELIPE CARVALHO SANTANA

**DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO E MODELAGEM DIGITAL DE RADIAÇÃO EM
SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CAFÉ**

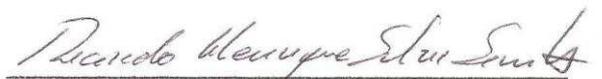
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, para obtenção do título de Magister Scientiae.

APROVADA: 18 de agosto de 2016.


Márcio Rocha Francelino


Williams/Pinto Marques Ferreira


Pedro Christo Brandão


Ricardo Henrique Silva Santos


Elpídio Inácio Fernandes Filho
(Orientador)

Ao meus pais Celso e Wânia

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela força, sabedoria e por me permitir estar vivendo esta história, iluminando e me mostrando sempre os melhores caminhos.

Aos meus avós Mauro e Cleide por sempre acreditarem em mim motivando meus sonhos.

Aos meus pais Wânia e Celso por todo amor, motivação.

A Adalgisa pelo companheirismo e cuidado.

Aos meus irmãos Lucas e Fernando por compartilharmos ideias e sonhos.

Ao professor Elpídio por acreditar em mim.

A professora Hewlley Acioli, professor Anôr e Ricardo pela colaboração durante a execução do trabalho.

Aos amigos do LabGEO, por toda colaboração, em especial ao Cléverson, Adriano e Bruno.

Aos amigos da Fitotecnia, professor Casali.

Aos colegas da Pós-Graduação em Agroecologia.

Aos funcionários da Horta Velha, Divino e Leite.

A CAPES, por me conceder a bolsa de mestrado.

BIOGRAFIA

Felipe Carvalho Santana nasceu em Belo Horizonte - MG no dia 13/02/1990, filho de Celso Santana e Wânia Beatriz Carvalho.

Cursou o ensino médio na FUNEC – Fundação de Ensino de Contagem entre os anos de 2005 e 2007.

Em 2009 iniciou o curso de Engenharia Ambiental na Universidade do Estado de Minas Gerais em João Monlevade, onde se graduou em 2014.

Foi bolsista de Iniciação Científica durante os anos de 2011 e 2013, trabalhando com Silvicultura e Geoprocessamento.

Em agosto de 2014 iniciou o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agroecologia da Universidade Federal de Viçosa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	xi
Introdução Geral	1
Referências	5
MODELAGEM DIGITAL DE UM SISTEMA AGROFLORESTAL POR MEIO DE LASER SCANNER TERRESTRE.....	7
Resumo	7
1 Introdução.....	8
2 Material e Métodos.....	9
2.1 Descrição da área	9
2.2 Variáveis do SAF	10
3 Resultados e Discussão	11
3.1 Variáveis do SAF	11
3.2 Modelo digital do cafeeiro	17
4 Conclusões.....	19
Referências	20
MODELO DIGITAL DE RADIAÇÃO PARA SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CAFÉ	23
Resumo	23
1 Introdução.....	24
2 Material e Métodos.....	25
2.1 Modelo digital de superfície (MDS)	25
2.2 Modelo digital de radiação (MDRad)	26
2.3 Modelo digital de sombra (MDSomb)	28

2.4	Porcentagem de sombreamento do sistema.....	30
2.5	Avaliações microclimáticas.....	30
3	Resultados e Discussão	31
3.1	Modelos digitais de superfície (MDS)	31
3.1.1	Análise RMSE dos modelos	31
3.2	Modelo digital de radiação (MDRad)	33
3.3	Modelo digital de sombra (MDSomb)	43
3.4	Porcentagem de sombreamento do sistema.....	44
3.5	Avaliações microclimáticas.....	44
4	Conclusões	49
	Referências	50
	MOVIMENTO DE ÁGUA NO SOLO EM SISTEMA AGROFLORESTAL DE CAFÉ E ERITRINA	53
	Resumo	53
1	Introdução.....	54
2	Material e Métodos.....	55
2.1	Água no solo.....	56
2.2	Avaliação da condutividade hidráulica não saturada	56
3	Resultados e Discussão	57
3.1	Água no solo.....	62
3.2	Avaliação da condutividade hidráulica não saturada	65
4	Conclusões	69
	Referências	70
	Considerações Gerais	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem do SAF gerada a partir do escaneamento realizado com o uso do laser scanner.	12
Figura 2 - Imagem gerada pelo software RiscanPRO no processo de isolamento e verificação da altura de indivíduo arbóreo.	12
Figura 3 - Isolamento de um cafeeiro no software RiscanPRO.	15
Figura 4 - (A) Área de projeção segundo o método proposto por Favarin et al., (2002). (B) método realizado durante a modelagem do cafeeiro, onde a linha branca é o contorno realizado na modelagem.	18
Figura 5 - Imagem superior da área de estudo com pontos em vermelho representando as 20 hastes de bambu.	29
Figura 6 - Croqui da instalação da haste com altura média de 3 m.	29
Figura 7 - Modelos digitais de superfície (MDS) da área de estudo. MDS elaborado através do método de escolha de ponto Average (A); IDW (B); e Maximum (C).	32
Figura 8 - Diferença entre os modelos digitais de elevação (MDS). Diferença entre Average e Maximum (A). Diferença entre Maximum e IDW (B). Diferença entre Average e IDW (C). As diferenças são representadas em metros (m).	33
Figura 9 - Regressão linear dos dados disponibilizados pelo INMET em relação aos dados obtidos com o auxílio do piranômetro.	34
Figura 10 - Regressão linear dos dados simulados através do modelo em período de agosto de 2015 à abril de 2016. Eixo x representa os valores de radiação aferidos em campo utilizando o piranômetro sunshine BF3 Delta-T Devices. Eixo y representa os valores simulados para esse mesmo período.	36
Figura 11 - Duração de radiação direta em horas para o solstício de inverno (A); equinócio (B) e solstício de verão (C).	37
Figura 12 - Duração da radiação direta em horas durante o período da florada (01 de agosto a 30 de setembro).	39
Figura 13 - Duração da radiação direta em horas durante a expansão rápida do fruto (01 de novembro a 31 de dezembro).	41
Figura 14 - Duração da radiação direta em horas durante o período de maturação dos grãos de café (01 de abril a 31 de junho).	42
Figura 15 - Comparação de variáveis meteorológicas durante o período de investigação.	46
Figura 16 - Temperaturas do ar (°C) diárias: máximas (linhas vermelhas) e mínimas (linhas azuis) no SPS e SAF.	47
Figura 17 - Porosidade total, macroporosidade e microporosidade ($m^3 m^{-3}$) dos pontos onde foram instalados os sensores de umidade.	58
Figura 18 - Calibração dos sensores utilizando solo de diferentes manejos e diferentes profundidades.	62
Figura 19 - Dias de déficit e excesso hídrico nos três sistemas de cultivos de café, SAFa, SAFb e SPS em Viçosa-MG.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Média das seis repetições das medidas realizadas de indivíduos de <i>Erythrina poeppigiana</i> no SAF utilizando dados do laser	13
Tabela 2 - Avaliação da altura, altura de inserção da copa e área de projeção da copa de cinco <i>E. poeppigiana</i> no SAF	14
Tabela 3 - Dados obtidos para as variáveis dendométricas dos 10 cafeeiros distribuídos na área experimental.....	15
Tabela 4 - Média, desvio padrão e variância dos índices de área foliar (IAF) dos cafeeiros, avaliados em sistema a pleno sol (SPS) e sistema agroflorestal (SAF).....	16
Tabela 5 - Área de projeção da copa dos cafeeiros calculada como proposto por Favarin et al., (2002) e modelada em software ArcGIS	17
Tabela 6 - Datas de leitura e horários de leitura de radiação global em campo	27
Tabela 7 - Data e horário de verificação de sombreamento nas hastes de bambu	28
Tabela 8 - Combinação de variáveis transmitância e difusividade para obtenção da matriz de calibração com valores de RG (Wh m^{-2}) extraídos do ponto de coleta	35
Tabela 9 - Combinação de variáveis transmitância e difusividade para obtenção da matriz de calibração com valores de RG (Wh m^{-2}) após o processo refinado.....	35
Tabela 10 - Exatidão global e índice Kappa para predições realizadas nos sistemas	43
Tabela 11 - Matrizes de confusão elaboradas a partir dos dados observados nas hastes ao longo do período de avaliação (agosto a novembro de 2015)	43
Tabela 12 - Porcentagem de sombreamento medida em campo para diferentes distâncias e diferentes densidades de copas de eritrinas	44
Tabela 13 - Análise textural, densidade do solo e partícula de amostras de solos retiradas na área experimental.....	59
Tabela 14 - Análise química de cada ponto onde foram instalados os sensores TDR	61
Tabela 15 - Capacidade de Campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e Ponto de Murcha Permanente ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) dos pontos onde foram instalados sensores de umidade TDR	63
Tabela 16 - Condutividade hidráulica não saturada para pontos onde foram instalados sensores TDR.....	65
Tabela 17 - Períodos diários de maior consumo (6:00 às 14:00) em três dias de avaliação de secagem do solo.....	67
Tabela 18 - Períodos diários de menor consumo (14:00 às 6:00) em três dias de avaliação de secagem do solo.....	68

RESUMO

SANTANA, Felipe Carvalho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2016. **Dinâmica da água no solo e modelagem digital de radiação em sistemas agroflorestais de café.** Orientador: Elpídio Fernandes Filho. Coorientador: Anôr Fiorini de Carvalho.

A espécie *Coffea arabica* L. (café arábica) originou-se no sub-bosque de sombra moderada da Etiópia. A introdução no Brasil seguiu os padrões nativos dos sub-bosques africanos, posteriormente com a exportação, começaram a ser plantado a pleno sol, entretanto, em regiões montanhosas de altitude elevada, a produção sombreada continuou sendo realizada por pequenos agricultores familiares. O sombreamento proporciona barreira contra ventos e geadas, melhora na qualidade do fruto devido à maturação mais lenta e a redução da bienalidade do café. No entanto, devido a divergências de resultados, favoráveis e desfavoráveis do cultivo do café sombreado, faz-se necessário um estudo maior quanto ao modelo necessário para que o cultivo do café sombreado seja melhor e eficiente, capaz de gerar predições sobre melhor disposição de sombreamento do café em diferentes climas e relevos. Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo geral criar modelo capaz de prever o melhor formato para o cultivo do café sombreado em diferentes relevos bem como quais espécies de árvores podem ser inseridas nesse cultivo. Para isso, foram realizadas avaliações micrometeorológicas, por período de oito meses (2015 e 2016), em experimento de cultivar Oeiras, espécie Café Arábica, com oito anos de idade, espaçadas em 2,80 por 0,75 m, conduzido a pleno sol e consorciado com, eritrina (*Erythrina poppigiana*), com distância do cafeeiro para as árvores na 1ª linha de 1,40 m e 2ª linha de 4,20 m, em área experimental da UFV. A umidade do solo foi aferida com auxílio de sensores TDR, temperatura do ar foi avaliada com sensores termistor e a precipitação por pluviógrafo tipo báscula. Foi realizado o escaneamento, com o equipamento laser scanner das feições do relevo, altura e diâmetro da copa da copa dos cafeeiros, calculando o índice de área foliar (IAF). As feições do relevo foram incluídos na estatística de programação com o ArcGIS, gerando o modelo digital de superfície e de elevação. A Radiação Global foi verificada através de piranômetro. Após a coleta dos dados de radiação in situ, foi simulado o modelo do sistema agroflorestal, através da ferramenta Solar Analyst, do ArcGIS. Esse modelo foi relacionado com as medições reais, verificando se a simulação realizada pelo software correspondem às leituras realizadas em campo durante o mesmo período. Foi observado que a precipitação no período do experimento, no geral, teve um comportamento próximo da Normal Climatológica - NC, com

a exceção dos meses de janeiro e fevereiro de 2016. Para todo o período do experimento as temperaturas máximas medidas em Viçosa estiveram em média cerca de 1,7°C acima da NC, com valores mais extremos nos meses de novembro e dezembro de 2015, cerca de 3,6°C e 3,1°C respectivamente. O mesmo ocorreu para as temperaturas máximas coletadas no experimento, porém com valores em média de 3,2°C acima da NC, com destaque para os meses de novembro e dezembro de 2015 em que a temperatura máxima atingiu valores de cerca de 5,0°C acima do esperado. O SAF reduziu o gradiente de temperatura, apresentando redução de 2 °C para médias de temperaturas máximas e aumento de 1 °C para temperaturas mínimas. Foi possível identificar as feições do café e calcular o IAF, apresentando média de 4,4 e 3,6 para SAF e SPS, respectivamente. Valores próximos de IAF foram encontrados em cafeeiros com idades semelhantes utilizando técnicas convencionais de estimativa do IAF. No modelo de radiação foram encontrados correlações entre os dados medidos e simulados de 0,95 para dias de céu limpo.

ABSTRACT

SANTANA, Felipe Carvalho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2016. **Dynamic water in the soil and digital modeling of radiation in coffee's agroforestry systems.** Advisor: Elpídio Fernandes Filho. Co-advisor: Anôr Fiorini de Carvalho.

The species *Coffea arabica* L. (arabica) originated in the moderate shade sub-forest of Ethiopia. The introduction in Brazil followed the native patterns of the African sub-forests, later with the export, began to be planted in full sun, however, in mountainous regions of high altitude, the shaded production continued being realized by small familiar farmers. Shading provides a barrier against wind and frost, improved fruit quality due to slower maturation and reduced coffee bienniality. However, due to disagreements of favorable and unfavorable results of the cultivation of shaded coffee, it is necessary to study more about the model necessary for shade cultivation to be better and efficient, capable of generating predictions about better shading arrangement Of coffee in different climates and reliefs. Therefore, this work had as general objective to create a model able to predict the best format for the cultivation of shaded coffee in different reliefs as well as which tree species can be inserted in this crop. For that, micrometeorological evaluations were carried out for a period of eight months (2015 and 2016), in an experiment of cultivar Oeiras, species Café arabica, with eight years of age, spaced at 2.80 by 0.75 m, conducted in full sun (*Erythrina poppigiana*), with distance from the coffee tree to the trees in the 1st line of 1,40 m and the 2nd line of 4,20 m in the experimental area of the UFV. Soil moisture was measured with the aid of TDR sensors, air temperature was evaluated with thermometer sensors and rainfall by scale type pluviometer. Scanning was performed with laser scanner equipment of the relief features, height and diameter of the cup crown of the coffee trees, calculating the leaf area index (LAI). Relief features were included in the programming statistics with ArcGIS, generating the After the collection of in situ radiation data, the model of the agroforestry system was simulated using the ArcGIS Solar Analyst tool, which was related to the Measurements were performed in the field during the same period. It was observed that the precipitation in the period of the experiment, in general, had a behavior close to the Normal Climatological - NC, with the exception of the months of January and February, 2016. For the whole period of the experiment the maximum temperatures measured in Viçosa were on average about 1.7°C above the NC, with more extreme values in the months of November and December, 2015, about 3.6°C and 3.1 °C respectively. The same occurred for the maximum temperatures

collected in the experiment, but with values on average of 3.2°C above the NC, highlighting the months of November and December of 2015 when the maximum temperature reached values of about 5.0°C above the expected. The SAF reduced the temperature gradient, presenting a reduction of 2°C for averages of maximum temperatures and increase of 1°C for minimum temperatures. It was possible to identify the coffee features and to calculate the LAI, presenting an average of 4.4 and 3.6 for SAF and SPS, respectively. Values close to IAF were found in coffee trees of similar ages using conventional IAF estimation techniques. In the radiation model correlations were found between the measured and simulated data of 0.95 for days of clear skies.

Introdução Geral

Na construção e aperfeiçoamento continuado do conhecimento em Agroecologia, enquanto ciência é importante o refinamento das técnicas e práticas de manejo dos agroecossistemas; tarefa desempenhada por agentes do desenvolvimento rural, professores e pesquisadores (Caporal, 2009). Logo, a adoção de práticas de manejo mais sustentáveis pode possuir caráter especializado, não dispensando, no entanto, o conhecimento empírico. Dentre as práticas de manejo agroecológico, o cultivo de várias espécies em uma mesma área se destaca na medida em que pode estabelecer o uso mais eficiente do solo. O sistema agroflorestal (SAF) é o mais conhecido e praticado com espécies perenes e anuais. Na Zona da Mata de Minas Gerais, esse sistema é desenvolvido e tem como cultura principal os cafeeiros arábica (Campanha et al., 2007).

A espécie *Coffea arabica* L. originou-se nos sub-bosque de sombra moderada da Etiópia. Em regiões montanhosas de altitude elevada, a produção sombreada vem sendo realizada por pequenos produtores, uma vez que o sistema agroflorestal permite, além do cultivo do café, renda adicional através da comercialização do produto produzido pela espécie arbórea consorciada (Duarte et al., 2008; Mancuso et al., 2013; Neupane and Thapa, 2001).

O sombreamento moderado do café modifica o microclima e o balanço de energia além de propiciar maior resistência a intempéries (Pezzopane et al., 2000). Cultivar café sob sombra, não significa somente reduzir o estresse ambiental do cafeeiro, mas sim, modificar o microclima para a cultura (Muschler, 1999).

Logo, pode proporcionar melhoria na qualidade do fruto, diferenciando o sabor final do café, modificando as propriedades organolépticas do grão, que são justificadas pela maturação mais lenta, aumentando a fase de café cereja do grão (Mancuso et al., 2013; Pinto Neto et al., 2014).

Na década de 50, foram testados sistemas com a utilização de espécies arbóreas de *Inga* (*Inga* sp.) junto ao cultivo do café. No entanto, nesse tipo de sistema ocorreram níveis bastante elevados de sombra e competição, provocando o decréscimo de produtividade. Essa prática voltou a ser estudada por volta da década de 70, com a utilização de outras espécies para diferentes níveis de sombreamento (Valentini et al., 2010).

De acordo com DaMatta (2004); Pinto Neto et al. (2014) o sombreamento é considerado moderado para a cultura de café, no sudeste brasileiro, quando se encontra entre 20 a 30% , na altitude média de aproximadamente 900 m.

No entanto os trabalhos que tratam do sombreamento do café não costumam dizer em qual face de exposição da montanha que ocorre o plantio, de modo que o café possa apresentar sombreamento excessivo, já que de acordo com Ferreira et al. (2013) pode haver maior sombreamento nas encostas de montanhas localizadas no hemisfério sul à face Noruega.

O uso da arborização tem o objetivo de atenuar a incidência direta de radiação solar, o que pode reduzir extremos como as elevadas temperaturas que ocorrem durante o dia e baixas temperaturas durante a noite (Mancuso et al., 2013; Pinto Neto et al., 2014). A estabilização da temperatura pode auxiliar no desenvolvimento do grão de café, reduzindo o estresse térmico da planta. Desta forma, pode reduzir também a bienalidade da produção do cafeeiro, igualando a produção ao longo dos anos (Morais et al., 2009).

O uso de árvores dentro sistema além de propiciar sombra, pode diminuir os efeitos do vento, que vão desde danos mecânicos no cultivar até reações fisiológicas (retirada da camada limítrofe) que facilitam a penetração de patógenos (Pinto Neto et al., 2014).

No entanto, essa arborização pode contribuir para um microclima desfavorável para o cafeeiro, por condicionar maior umidade do ar no interior do dossel do cafeeiro, se comparado com o cultivo do café a pleno sol, proporcionando, assim, um ambiente favorável à proliferação da ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome), fungo que atinge as plantações de café, que induz a queda precoce das folhas, provocando menor florada e consequentemente menor produção de frutos (Mancuso et al., 2013).

Entretanto, no sistema agroflorestal há também, menor perda de solos, de matéria orgânica e de nutriente por escoamento superficial, isso é devido à arquitetura da copa que evita o impacto direto da gota de chuva com o solo, reduzindo assim, a erosão laminar (em superfície), indicando melhor sustentabilidade ecológica ao promover a retenção dos nutrientes no solo (Campanha et al., 2007; Duarte et al., 2008; Franco et al., 2002; Mancuso et al., 2013; Pinto Neto et al., 2014).

Algumas árvores leguminosas apresentam perda de folhas e desrama natural, que disponibilizam cobertura morta para o solo e entrada de radiação nos sistemas agroflorestais, dentre elas o gênero *Erythrina*, possui característica de árvore caducifólia, perdendo suas folhas em agosto, quando floresce (Lorenzi, 1992).

A manta de cobertura morta permite a redução da temperatura e controle da umidade do solo (Lima et al., 2009). Entretanto alguns autores verificaram menor conservação de água no solo em época de menor precipitação em monocultivo de café se comparada ao sistema

agroflorestal (Coelho et al., 2010). Utilizando o sistema de consórcio de milho e glericídia (*Glericidia sepium*) Marin et al. (2006) verificaram também, redução significativa da umidade do solo.

O dossel das árvores modificam a energia proveniente da radiação solar, que é responsável pelos processos de evaporação de água, processos de aquecimento e resfriamento do ar e solo (Pezzopane et al., 2007).

A radiação solar global e o saldo de radiação são os elementos que determinam a disponibilidade de energia para processos como a evapotranspiração, o aquecimento do ar e do solo e a fotossíntese. Logo, interferir na quantidade de radiação que incide no cultivo de café, pode alterar os valores da evapotranspiração (Pezzopane et al., 2007, 2005). Sistemas agroflorestais que utilizam espécies arbóreas podem ser classificados de duas formas tradicional e tecnificado. No sistema de sombra tradicional o café é plantado em floresta nativa, enriquecido com eritrina com intuito de fornecer nitrogênio à cultura de café, não restringindo apenas à eritrina, mas também a utilização de outras espécies leguminosas como ingá e glericídia e além de espécies frutíferas e árvores de potencial lenhoso (Perfecto et al., 1996). Já no cultivo tecnificado utiliza-se, somente, árvores de eritrina, não diversificando a área com outras espécie, realizando o manejo de poda dos indivíduos arbóreos de forma intensiva (Borchert, 1980; Donald, 2004; Mora and Beer, 2013).

Estudos realizados nos cafezais da América Latina mostraram quedas na temperatura máxima em sistemas agroflorestais (Lin, 2007; López-Bravo et al., 2012). Importante levar em consideração que a produção de café na região equatorial e do caribe são bastante diversificadas, variando do café tradicional produzido nas florestas mexicanas, com elevações que variam de 680 a 1800 m e temperatura média de 20 °C, ao café produzidos na Costa Rica e Colômbia, onde as árvores sombreadoras são frutíferas (Jaramillo-Botero et al., 2006; Mancuso et al., 2013).

Já sistemas agroecológicos que utilizam a seringueira localizados em Mococa, com latitude de 21° 28' S, longitude de 47° 01' W e altitude média de 665 m, reduzem a temperatura máxima em até 3 °C em dias mais quentes, auxiliando os processos fenológicos da floração e frutificação, que são estágios críticos durante a primavera e o verão (Valentini et al., 2010).

Na região do Paraná e no norte do Brasil, cultivos consorciados com grevilea (*Grevillea robusta* A. Cunn) apresentaram melhor produção em relação ao sistema de café a pleno sol (SPS). Já ao comparar um mesmo sistema de sombra tecnificada na Colômbia e no

Brasil, foi verificado que a produção no Brasil foi oito vezes menor do que a apresentada na Colômbia (Jaramillo-Botero et al., 2006).

Deste modo algumas experiências com cafeeiros sombreados registram produções semelhantes, e inclusive superiores as do café a pleno sol. Em outras, as produções do café sombreado são extremamente baixas. Essas diferenças não estão só ligadas à radiação solar local, mas ao tipo de solo, clima e as práticas de manejo adotadas (Jaramillo-Botero et al., 2006). Além do aspecto da face de exposição e relevo onde a lavoura está localizada.

Faces voltadas para o Sul (face noruega) recebem uma quantidade menor de radiação se comparado com a face Norte (soalheira). O movimento de translação terrestre provoca a sazonalidade, devido a inclinação de 23° 27' da Terra no seu eixo imaginário de rotação, variando a intensidade da incidência dos raios solares sobre a superfície terrestre (Ferreira et al., 2012).

Desta forma, modelar esses sistemas antes do seu estabelecimento pode favorecer a implantação dos sistemas agroflorestais. A modelagem pode ser considerada uma ferramenta eficiente e confiável para a tomada de decisões. Alguns modelos de simulações de sistemas agroflorestais vem sendo desenvolvido, levando em consideração número elevado de parâmetros, envolvendo, água, nutrientes e luz (Van Noordwijk et al., 2001), e outros que levam em consideração a arquitetura da copa e sua projeção ao solo na simulação de sombra (Charbonnier et al., 2013).

Na intenção de modelar e simular ambientes a utilização de equipamentos que possam reconhecer a conformação dos sistemas agroflorestais, se faz necessária. Equipamento que possui essa aptidão é o laser scanner terrestre (light amplification by stimulated emission of radiation) que emite luz, a fim de identificar e/ou reconhecer inúmeros pontos da área de estudo (Alba et al., 2011; Buck, 2011; Olsoy et al., 2014).

Essa dissertação está estruturada em três capítulos, no primeiro é abordada a modelagem digital de um sistema agroflorestal por meio de laser scanner terrestre. No segundo realizou-se o modelo digital de radiação para sistemas agroflorestais de café. Por fim o movimento de água no solo em sistema agroflorestal de café e eritrina.

Referências

- Alba, M., Barazzetti, L., Fabio, F., Scaioni, M., 2011. Filtering vegetation from terrestrial point clouds with low-cost near infrared cameras. *Ital. J. Remote Sens.* 43, 55–75. doi:10.5721/ItJRS20114325
- Borchert, R., 1980. Phenology and ecophysiology of tropical trees: *Erythrina poeppigiana* O. F. Cook. *Ecol. Soc. Am.* 61, 1065–1074.
- Buck, A.L.B., 2011. Análise de métodos de filtragem em dados laser scanner terrestre aplicados à modelagem tridimensional do tronco de *Pinus* spp.
- Campanha, M.M., Santos, R.H.S., Freitas, G.B., Martinez, H.E.P., Jaramillo-Botero, C., Garcia, S.L., 2007. Análise comparativa das características da serrapilheira e do solo em cafezais (*Coffea arabica* L.) cultivados em sistema agroflorestal e em monocultura, na Zona da Mata MG. *Rev. Árvore* 31, 805–812. doi:10.1590/s0100-67622007000500004
- Caporal, F.R., 2009. Extensão Rural e Agroecologia: temas sobre um novo desenvolvimento rural, necessário e possível.
- Charbonnier, F., le Maire, G., Dreyer, E., Casanoves, F., Christina, M., Dauzat, J., Eitel, J.U.H., Vaast, P., Vierling, L.A., Roupsard, O., 2013. Competition for light in heterogeneous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system. *Agric. For. Meteorol.* 181, 152–169. doi:10.1016/j.agrformet.2013.07.010
- Coelho, R.A., Matsumoto, S.N., Lemos, C.L., Souza, F.A. De, 2010. Nível de sombreamento, umidade do solo e morfologia do cafeeiro em sistemas agroflorestais. *Rev. Ceres* 57, 95–102. doi:10.1590/S0034-737X2010000100016
- DaMatta, F.M., 2004. Fisiologia dos cafeeiros em sistemas arborizados, in: UESB (Ed.), *Arborização de Cafezais*. Matsumoto, Sylvana Naomi, Vitória da Conquista, p. 212.
- Donald, P.F., 2004. Biodiversity impacts of some agricultural commodity production systems. *Conserv. Biol.* 18, 17–37. doi:10.1111/j.1523-1739.2004.01803.x
- Duarte, E.M.G., Cardoso, I.M., Fávero, C., 2008. Terra Forte. *Agriculturas* 5, 11–15.
- Ferreira, W.P.M., Fernandez Filho, E.I., Ribeiro, M. de F., Souza, C. de F., 2013. Influência da radiação solar na cafeicultura de montanha, in: VII Simpósio de Pesquisa Dos Cafés Do Brasil.
- Ferreira, W.P.M., Ribeiro, M.F., Fernandes Filho, E.I., Souza, C. de F., Castro, C.C.R., 2012. As características térmicas das faces noruega e soalheira como fatores determinantes do clima para a cafeicultura de montanha. *Embrapa Café* 34.
- Franco, F.S., Couto, L., Carvalho, A.F. De, Jucksch, I., Fernandes Filho, E.I., Silva, E., Meira Neto, J.A.A., 2002. Quantificação de erosão em sistemas agroflorais e convencionais na Zona da Mata de Minas Gerais. *Rev. Árvore* 26, 751–760. doi:10.1590/S0100-67622002000600011
- Jaramillo-Botero, C., Martinez, H.E.P., Santos, R.H.S., 2006. Características do café (*Coffea arabica* L.) sombreado no norte da América Latina e no Brasil: análise comparativa. *Coffee Sci.* 1, 94–102.
- Lima, M.E., de Carvalho, D.F., de Souza, A.P., Guerra, J.G.M., Ribeiro, R.L.D., 2009. Desempenho da alfaca em cultivo orgânico com e sem cobertura morta e diferentes lâminas d'água. *Cienc. e Agrotecnologia* 33, 1503–1510. doi:10.1590/S1413-70542009000600007
- Lin, B.B., 2007. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agric. For. Meteorol.* 144, 85–94. doi:10.1016/j.agrformet.2006.12.009
- López-Bravo, D.F., Virginio-Filho, E. de M., Avelino, J., 2012. Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions. *Crop*

- Prot. 38, 21–29. doi:10.1016/j.cropro.2012.03.011
- Lorenzi, H., 1992. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa.
- Mancuso, M.A.C., Soratto, R.P., Perdoná, M.J., 2013. Produção de café sombreado. *Colloq. Agrar.* 9, 31–44. doi:10.5747/ca.2013.v09.n1.a087
- Marin, A.M.P., Menezes, R.S.C., Silva, E.D., Sampaio, E.V.D.S.B., 2006. Efeito da *Gliricidia sepium* sobre nutrientes do solo, microclima e produtividade do milho em sistema agroflorestal no agreste Paraibano. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 30, 555–564. doi:10.1590/S0100-06832006000300015
- Mora, A., Beer, J., 2013. Geostatistical modeling of the spatial variability of coffee fine roots under *Erythrina* shade trees and contrasting soil management. *Agrofor. Syst.* 87, 365–376. doi:10.1007/s10457-012-9557-x
- Morais, H., Caramori, P.H., Kogushi, M.S., Gomes, J.C., Ribeiro, A.M.D.A., 2009. Sombreamento de cafeeiros durante o desenvolvimento das gemas florais e seus efeitos sobre a frutificação e produção. *Ciência Rural* 39, 400–406. doi:10.1590/S0103-84782009000200013
- Muschler, R., 1999. Árvores em cafezais. *Clección Módulos Enseñanza Agrofor.*
- Neupane, R.P., Thapa, G.B., 2001. Impact of agroforestry intervention on farm income under the subsistence farming system of the middle hills, Nepal. *Agrofor. Syst.* 53, 31–37. doi:10.1023/A:1012296803189
- Olsoy, P.J., Glenn, N.F., Clark, P.E., 2014. Estimating sagebrush biomass using terrestrial laser scanning. *Rangel. Ecol. Manag.* 67, 224–228. doi:10.2111/REM-D-12-00186.1
- Perfecto, I., Rice, R.A., Greenberg, R., Voort, M.E. Van der, 1996. Shade Coffee: A disappearing refuge for biodiversity. *Bioscience* 46, 598–608.
- Pezzopane, J.E.M., Reis, G.G. dos, Reis, M. das G.F., Costa, J.M.N. da, Higuchi, P., 2000. Balanço de radiação no interior de uma floresta estacional semidecidual secundária no domínio da mata atlântica, in: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. pp. 200–206.
- Pezzopane, J.R.M., Pedro Júnior, M.J., Gallo, P.B., 2007. Balanço de energia em cultivo de café a pleno sol e consorciado com banana “Prata Anã”. *Rev. Bras. Agrometeorol.* 15, 169–177. doi:10.1590/S0006-87052005000300019
- Pezzopane, J.R.M., Pedro Júnior, M.J., Gallo, P.B., 2005. Radiação solar e saldo de radiação em cultivo de café a pleno sol e consorciado com banana “Prata Anã”. *Bragantia* 64, 485–497. doi:10.1590/S0006-87052005000300019
- Pinto Neto, J.N., Alvarenga, M.I.N., Corrêa, M. de P., de Oliveira, C.C., 2014. Efeito das variáveis ambientais na produção de café em um sistema agroflorestal. *Coffee Sci.* 9, 187–195.
- Valentini, L.S. de P., Camargo, M.B.P. de, Rolim, G. de S., Souza, P.S., Gallo, P.B., 2010. Temperatura do ar em sistemas de produção de café arábica em monocultivo e arborizados com seringueira e coqueiro-anão na região de Mococa, SP. *Bragantia* 69, 1005–1010. doi:10.1590/S0006-87052010000400028
- Van Noordwijk, M., Verbist, B., Tomich, T.P., 2001. Simulation models that help us to understand local action and its consequences for global concerns in a forest margin landscape. International Centre for Research in Agroforestry, Bogor.

Capítulo 1

MODELAGEM DIGITAL DE UM SISTEMA AGROFLORESTAL POR MEIO DE LASER SCANNER TERRESTRE

Resumo

O objetivo desse trabalho foi utilizar o laser scanner terrestre no levantamento de variáveis dendrométricas no design de Sistema Agroflorestal (SAF) de café com eritrina e sistema a pleno sol (SPS): altura; altura de inserção da copa; área de projeção da copa das árvores de eritrina; e índice de área foliar (IAF) para plantas de café. Foram escolhidas cinco eritrinas e dez cafeeiros. As plantas foram isoladas no software RiscanPRO, realizando-se seis repetições de aferição para cada variável. Sofreram modelagem para identificar as áreas de projeção de sua copa no software ArcGIS. As árvores de eritrina apresentaram variação com coeficientes de variação de 17,7; 22,7; 20,3 e 54,8% para altura da árvore, copa, inserção da copa e área da copa, respectivamente com médias de 67,0 m², e desvio padrão de 36,0 m². A ferramenta laser scanner terrestre foi eficiente na avaliação de características dendrométricas. O IAF dos cafeeiros SPS e SAF não diferiu estatisticamente. As arvores de eritrinas do SAF apresentou elevada variação a área de projeção da copa e altura da copa. Foi possível calcular o IAF do cafeeiro de forma não destrutiva.

Termos para indexação: desenho; dendrometria; índice de área foliar; café; eritrina.

1 Introdução

Uma das grandes dificuldades em se estabelecer sistemas agroflorestais (SAF) está no arranjo das árvores dentro da área de cultivo e como elas poderão influenciar positiva ou negativamente o sistema após seu desenvolvimento. As árvores podem interferir de várias maneiras na produção das demais culturas associadas e, conseqüentemente, na economia e sustentabilidade dos agricultores (Alves et al., 2015; Oliveira, 2013).

Na concepção de sistemas agroflorestais com cafeeiros, a escolha das espécies e arranjo dos indivíduos no sistema pode ser entendida de maneira geral, como fator discutível (Cardoso et al., 2001). Alguns estudos apontam aspectos do desenho e espaçamento entre indivíduos de forma a reduzir a competição entre os componentes do sistema (Jose and Gordon, 2008; López-Bravo et al., 2012; Nair, 1991; Vaast et al., 2008). No entanto, os sistemas agroflorestais não podem ser apenas replicados sem estudo prévio do relevo e face de exposição do terreno. Como Ferreira et al. (2012) abordam, faces voltadas para o sul geográfico recebem menor quantidade de radiação do que faces voltadas para o norte, o que pode interferir no cultivos do café de montanha.

Para a efetivação dos sistemas de cultivo agroflorestal, a modelagem do sistema em ambiente computacional antes da implantação pode ser uma alternativa para os agricultores, haja vista que muitos produtores não possuem acompanhamento técnico, o que pode gerar excesso de sombreamento nos sistemas, gastos desnecessários e erros no desenho do sistema a ser implantado.

A modelagem e simulações das plantas desses sistemas e seus efeitos sobre o ambiente, sugerindo modificações estruturais da copa com podas e desbastes; a quantidade de árvores por hectare; a direção da linha de plantio das árvores, dentre inúmeras outras práticas de manejo podem ser ditas como alternativas para contornar dificuldades relacionadas ao manejo de sistemas arborizados (Lingnau et al., 2008).

Os avanços tecnológicos na área de mapeamento digital permitem atualmente mapear com precisão objetos presentes na superfície. Dentre estas técnicas destaca-se a tecnologia laser scanner que permite obter as coordenadas X, Y, Z da superfície de qualquer elemento presente na paisagem.

Devido à quantidade de pontos obtidos (Olsoy et al., 2013), bem como sua precisão e acurácia, torna-se importante à utilização desses dados não somente para levantamento topográfico, como também para o uso para levantamento paisagístico (Passalacqua et al.,

2015), arquitetônico (Setkowicz, 2014) e florestal (Bienert et al., 2006; Buck, 2011; Martins Neto et al., 2013), tornando-se interessante também para o levantamento agroflorestal.

Outro ponto importante da tecnologia laser, para o sensoriamento remoto, está no reconhecimento da assinatura espectral de cada objeto, que pode facilitar a identificação dos mesmos, diferenciando, por exemplo, a vegetação de outras superfícies (Moraes, 2002).

O laser scanner terrestre vem sendo utilizado para a verificação de variáveis dendrométricas como o diâmetro do tronco (Buck et al., 2014, 2012; Martins Neto et al., 2013) e altura das árvores (Lingnau et al., 2008). Alguns autores trabalham com dados de pontos da nuvem para levantamento de variáveis (Lingnau et al., 2008), embora outros autores realizem a modelagem da nuvem de pontos transformando-a em modelo tridimensional contínuo (raster), obtendo objetos sólidos (Buck et al., 2014, 2012; Martins Neto et al., 2013) o que pode elevar a precisão da medição de volume de madeira em sistemas de silvicultura.

Nesse contexto, objetivou-se com o presente trabalho:

1. Analisar a aplicação do laser scanner terrestre para o levantamento de variáveis ambientais importantes para o desenho de SAF: altura; altura de inserção da copa; área de projeção da copa das árvores;
2. Determinar o índice de área foliar (IAF) do cafeeiro;
3. Correlacionar a área de projeção da copa do cafeeiro, calculada a partir de dados do laser, com a área de projeção da copa obtida após a modelagem digital do cafeeiro.

2 Material e Métodos

2.1 Descrição da área

A área experimental está localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa - UFV, no município de Viçosa, MG, com coordenadas geográficas: 20° 45' 23,28" S e 42° 50' 33,16" O; 20° 45' 22,75" S e 42° 50' 30,89" O; 20° 45' 22,82" S e 42° 50' 31,01" O; 20° 45' 21,91" S e 42° 50' 31,69" O, datum WGS84, e altitude média de 675 m. Nesta área há uma lavoura de 2.590 m² espaçados a 2,80 x 0,75 m, conduzido em sistema pleno sol (SPS) e consorciado com eritrina (*Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F.Cook).

Os cafeeiros foram plantados em novembro de 2007, já as eritrinas foram em março de 2008, estabelecendo assim, o sistema agroflorestal. No SAF, as eritrinas foram plantadas em linhas distantes 11,20 m, sendo que em cada linha, as eritrinas estão separadas por 2,80 m

(maior densidade populacional), considerado como SAFa, ou 4,40 m (menor densidade populacional), considerado como SAFb. Existem quatro linhas de eritrina, sendo que em cada uma delas foram plantadas duas linhas de café espaçadas a 1,40 e 4,20 m acima e abaixo da linha de eritrina, totalizando dezesseis linhas de café e quatro linhas de eritrina.

Em abril de 2015 foi efetuada varredura múltipla com laser scanner terrestre modelo VZ 1000, da RIEGL de modo a caracterizar as feições do relevo, geometria das copas das árvores, posição espacial das eritrinas e cafeeiros. Foi utilizada a frequência de 300 kHz, com distância entre pontos de 0,07 m à 450 m de distância do equipamento.

As coordenadas, necessárias para realizar o georreferenciamento da nuvem de pontos, foram obtidas por receptor GNSS (Global Navigation Satellite System) modelo GS08 Plus, da Leica, de forma diferencial. Para o processamento dos dados levantados utilizou-se como base a altitude ortométrica e dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC). Os dados foram processados no programa Leica Geo Office 5.1.

Os dados obtidos com a leitura do laser scanner foram utilizados para obter as seguintes variáveis do SAF: altura de inserção da copa, altura das árvores, área de projeção da copa e índice de área foliar do cafeeiro bem como gerar o Modelo Digital de Superfície (MDS).

2.2 Variáveis do SAF

As variáveis, altura, altura de inserção da copa e área de projeção da copa das árvores foram obtidas em cinco árvores de eritrina. Após o levantamento de dados pelo laser scanner, as árvores foram isoladas no software RiscanPRO 2.1. Foram realizadas seis repetições de aferição para cada variável avaliada na árvore de eritrina, calculando a média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação (C.V.). A altura da eritrina, foi avaliada a partir do solo ao ápice da copa da árvore, a altura da copa do primeiro ramo ao ápice das árvores e altura de inserção da copa do solo ao primeiro ramo da copa. A área de projeção da copa foi obtida conforme Salgado et al. (2004) realizando dois transectos x e y (x, perpendicular e y, paralelo à linha de plantio das árvores), sendo a área de projeção da copa calculada por meio da seguinte fórmula:

$$A_{pc} = \frac{\pi \times y}{4} \quad (1)$$

Apc é a área de projeção da copa (m²), x (m) é o transecto traçado perpendicular e y (m) é o transecto traçado paralelo à linha de plantio das árvores.

Dez cafeeiros foram separados aleatoriamente, sendo cinco no SPS e cinco no SAF, não fazendo distinção das densidades de árvores plantadas. Esses cafeeiros foram utilizados para aferição da altura do dossel dos cafeeiros (Hd), aferida no primeiro par de ramos plagiotrópicos e diâmetro da seção inferior do dossel (Di), medida do primeiro par de ramos plagiotrópicos até a seção superior da planta. Os dados foram inseridos no software RiscanPRO. Foi calculado o índice de área foliar (IAF) do cafeeiro utilizando a equação proposta por Favarin et al. (2002).

$$IAF = 0,0134 + 0,7276Di^2Hd \quad (2)$$

Os dez cafeeiros utilizados para estimar o índice de área foliar foram submetidos ao processo de modelagem para identificação da área de projeção de sua copa no software ArcGIS. O resultado da modelagem foi correlacionado com dados de área de projeção obtidos conforme proposto por Favarin et al. (2002).

Para modelagem dos cafeeiros foi utilizado o método de interpolação Maximum, que identifica o ponto de maior cota dentro de cada célula, unindo-os transformando em um modelo digital de superfície.

3 Resultados e Discussão

O processamento da nuvem de pontos gerada pelo laser scanner apresentou desvio padrão que variou de 0,028 a 0,082 m, valor esse, ligeiramente acima do valor máximo recomendado pelo fabricante que é de 0,03 m. Todavia, estes valores recomendados são para superfícies estáticas, que não estão sujeitas a ação dos ventos. Considerando que um dos objetivos foi determinar o IAF de árvores que estão sujeitas a movimentação da copa, galhos e fuste, devido ação do vento (Buck, 2011; Buck et al., 2014), o ajuste encontrado foi considerado adequado para a geração das variáveis do SAF.

3.1 Variáveis do SAF

A partir do uso do laser scanner foi gerado o modelo tridimensional de pontos da área, possibilitando o reconhecimento de suas especificidades. O resultado obtido do

escaneamento (Figura 1) possibilitou a visualização da desuniformidade da vegetação (SAF), além da localização das árvores de eritrina e os arbustos de café dentro do sistema.

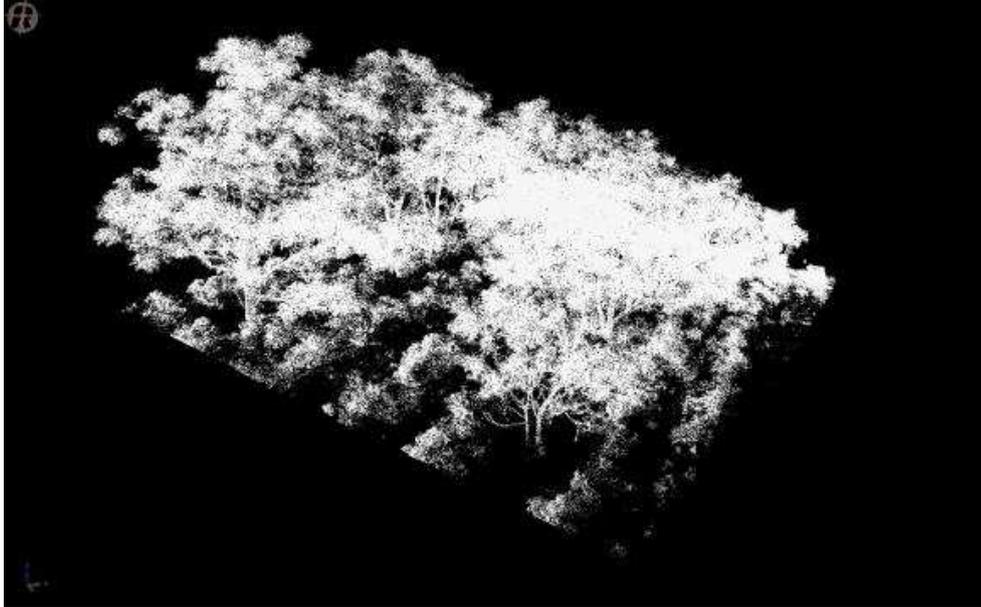


Figura 1 - Imagem do SAF gerada a partir do escaneamento realizado com o uso do laser scanner.

Para a extração dos dados dendrométricos, foi utilizado software RiscanPRO, e as árvores foram isolados conforme pode ser visualizado na Figura 2.

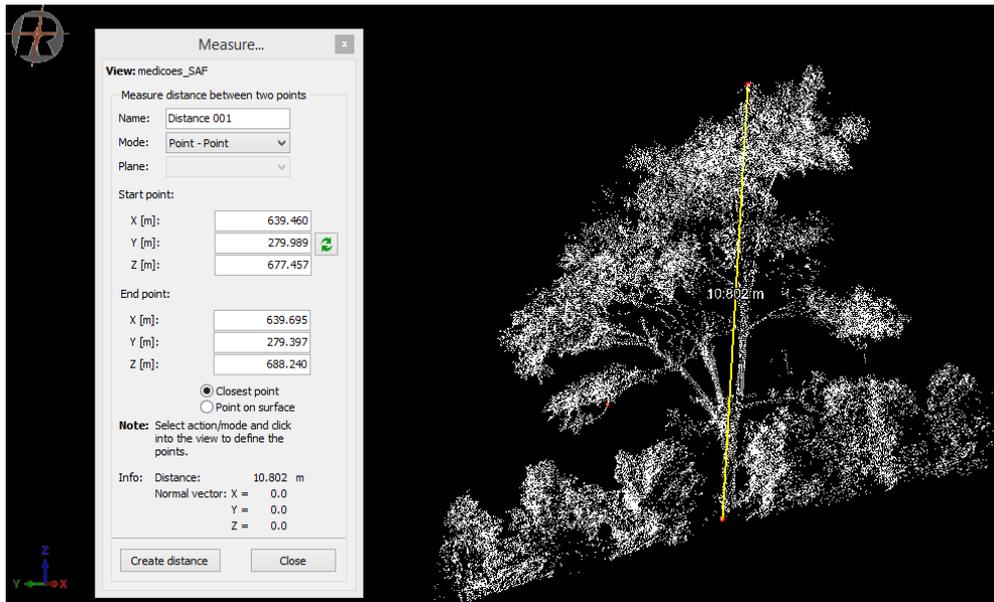


Figura 2 - Imagem gerada pelo software RiscanPRO no processo de isolamento e verificação da altura de indivíduo arbóreo.

Durante a execução do trabalho foi verificado grande variação da estrutura das árvores de eritrina no SAF, o que também foi verificado no trabalho realizado por Charbonnier et al. (2013). Tal fato compromete a implantação desse sistema devido proporcionar maior variação do sombreamento e, conseqüentemente, efeitos sobre cafeeiros próximos. A altura das árvores ao longo do experimento variou de 7,9 a 11,5 m (Tabela 1) com média de 9,5 m (Tabela 2). Foram encontrados na literatura valores de altura para *Erythrina poeppigiana*, variando de 15 a 20 m quando adultas (Lorenzi et al., 2003).

Tabela 1 - Média das seis repetições das medidas realizadas de indivíduos de *Erythrina poeppigiana* no SAF utilizando dados do laser

Variável	Árvore	Média	Desvio Padrão	Variância	C.V. (%)
Altura (m)	1	7,889	0,028	0,001	0,36
	2	7,761	0,04	0,002	0,52
	3	10,746	0,054	0,003	0,51
	4	11,513	0,025	0,001	0,22
	5	9,358	0,044	0,002	0,47
Altura da copa (m)	1	5,496	0,018	0,000	0,32
	2	6,398	0,093	0,009	1,45
	3	8,644	0,036	0,001	0,42
	4	9,779	0,032	0,001	0,33
	5	7,386	0,036	0,001	0,49
Área de projeção da copa (m ²)	1	40,146	0,254	0,065	0,63
	2	33,649	0,631	0,398	1,87
	3	57,684	0,299	0,089	0,52
	4	124,767	1,000	1,000	0,80
	5	78,941	0,344	0,118	0,44
Altura de inserção da copa (m)	1	2,393	0,044	0,002	1,82
	2	1,363	0,126	0,016	9,23
	3	2,102	0,068	0,005	3,25
	4	1,734	0,038	0,001	2,19
	5	1,972	0,039	0,001	1,96

CV : Coeficiente de variação

Foram encontradas áreas de projeção da copa de até 124,76 m², com valores médios de 67 m², e desvio padrão de 36 m². Vaast et al. (2008) encontraram valores de área de projeção da copa de 27 m² para indivíduos de *Erythrina poeppigiana* com 44 meses de plantio.

Tabela 2 - Avaliação da altura, altura de inserção da copa e área de projeção da copa de cinco *E. poeppigiana* no SAF

Variáveis	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
Altura (m)	9,453	1,676	17,7
Altura da copa (m)	7,541	1,713	22,7
Altura de inserção da copa (m)	1,913	0,389	20,3
Área de projeção da copa (m ²)	67,037	36,742	54,8

Na área do estudo, as árvores de eritrinas foram podadas eliminando-se os ramos até 1,80 m. Diferente do que ocorre em cultivos sombreados de café com *Erythrina poeppigiana* na Costa Rica, em que os agricultores praticam podas frequentes mantendo a altura das árvores de 2,0 a 3,0 m, com intuito de acumular biomassa no solo (Borchert, 1980; Mora and Beer, 2013). Entretanto, a realização das podas podem proporcionar ganhos que vão além do aporte de biomassa no solo, reduzindo também a competição por luz e aquisição de nutrientes pelas raízes (Alpizar et al., 1986; Jaramillo-Botero et al., 2006; Mora and Beer, 2013; Nygren and Ramírez, 1995). Desta forma a não execução desse manejo no sistema pode ter causado maior competição entre as árvores de eritrina.

A altura de inserção da copa das árvores apresentou valores médios de 1,91 m. No trabalho de Vaast et al. (2008), são relatados valores de 5,2 m para altura de inserção da copa de *Erythrina poeppigiana*, entretanto, no caso estudado a finalidade de manejo é a disponibilização de biomassa para o sistema. Embora, alturas de inserção da copa elevadas podem disponibilizar a entrada de maior quantidade de radiação direta dentro dos sistemas agroflorestais, favorecendo o desenvolvimento das culturas que estão abaixo do estrato arbóreo (Torquebiau et al., 2002).

Pode ser observado na Figura 3 o processo de isolamento de um cafeeiro, semelhante ao processo realizado para a obtenção das variáveis dendrométricas para as eritrinas (Figura 2). Desta forma foram tomados valores de Di e Hd (m) para cada indivíduo.

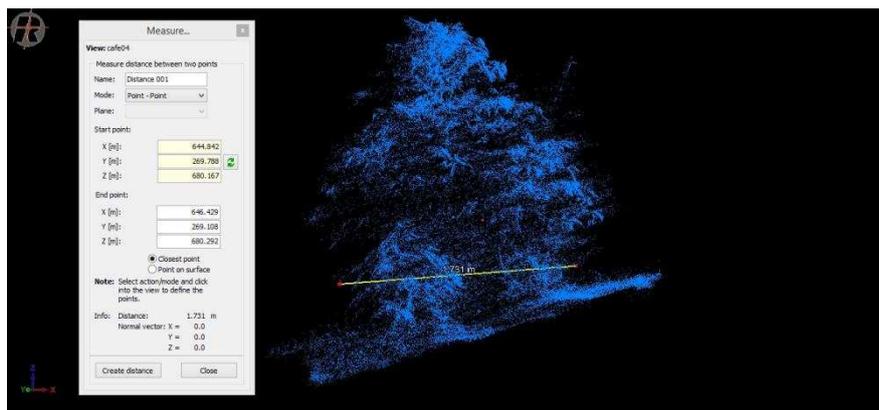


Figura 3 - Isolamento de um cafeeiro no software RiscanPRO.

Os dados avaliados de cada cafeeiro (D_i e H_d) foram obtidos a partir da equação proposta por Favarin et al. (2002), e dispostos na Tabela 3. O IAF calculado a partir dos dados obtidos em abril de 2014 variou de 3,06 a 7,31 $m^2 m^{-2}$ no SAF com média de 4,4 $m^2 m^{-2}$ e 2,19 a 4,52 $m^2 m^{-2}$ no SPS com média de 3,5 $m^2 m^{-2}$.

Tabela 3 - Dados obtidos para as variáveis dendométricas dos 10 cafeeiros distribuídos na área experimental

Café	Sistema	D_i (m)	H_d (m)	Volume do dossel (m^3)	IAF ($m^2 m^{-2}$)
1	SAF	2,20	2,08	2,63	7,31
2	SAF	1,64	1,77	1,24	3,47
3	SAF	1,73	2,14	1,68	4,67
4	SAF	1,46	2,26	1,26	3,52
5	SAF	1,28	2,56	1,10	3,06
6	SPS	1,65	2,27	1,62	4,52
7	SPS	1,50	2,21	1,30	3,62
8	SPS	1,60	1,93	1,28	3,58
9	SPS	1,55	1,94	1,21	3,39
10	SPS	1,24	1,94	0,78	2,19

Valores médios de 3,88 e 4,20 de IAF foram encontrados no trabalho realizado por Kobayashi (2007) para os cultivares Ouro Verde e Mundo Novo respectivamente, em cultivo a pleno sol em Mococa/SP. Já Coltri et al. (2015) avaliando o IAF em São Sebastião do Paraíso/MG, para a cultivar Catuaí, encontraram valores médios de 5,7 $m^2 m^{-2}$ em sistema cultivado a pleno sol, e de 6,4 $m^2 m^{-2}$ em cultivo sombreado com macadâmia. Ambos trabalhos estimaram o IAF segundo proposta de Favarin et al. (2002), entretanto, deve ser levado em consideração que a estimativa proposta foi para o cultivo de cafeeiro a pleno sol, sendo que as

plantas sob sombra apresentam quantidade diferente de folhas em seus galhos (Mancuso et al., 2013; Ricci et al., 2006).

Através do método destrutivo, valores de IAF médio de $3,2 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ para cafés a pleno sol e $3,85 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ foram encontrados sob sombra de eritrina em dezoito plantas de café avaliadas na Costa Rica (Charbonnier et al., 2013).

A maior variabilidade do IAF no SAF, em comparação ao SPS pode ser atribuído também a maior desuniformidade das copas da eritrinas. Charbonnier et al. (2013), constataram que existe variação na estrutura do dossel de indivíduos de eritrina, apresentando em um mesmo sistema, indivíduos com dossel mais aberto e mais alto e indivíduos com dossel menor e mais fechado. Os valores de IAF também variam com a época do ano, comparando médias de IAF em cultivos a pleno sol e sombreados Coltri et al. (2015) encontraram valores máximos em fevereiro e menores valores em agosto. Sob a sombra os cafeeiros modificam a estrutura da folha deixando-as maiores se comparadas com indivíduos a pleno sol (DaMatta, 2004).

Na Tabela 4 são apresentados as médias, desvio padrão, variância e C.V. do IAF para os sistemas avaliados.

Tabela 4 - Média, desvio padrão e variância dos índices de área foliar (IAF) dos cafeeiros, avaliados em sistema a pleno sol (SPS) e sistema agroflorestal (SAF)

Sistemas	IAF (m^2m^{-2})			
	Média	Desvio padrão	Variância	C.V. (%)
SAF	4,406 ^{ns}	1,731	2,997	39,3
SPS	3,461 ^{ns}	0,836	0,699	24,2

^{ns}: Não houve diferença significativa para as médias a 5% de probabilidade avaliando o teste t.

Não houve diferença significativa das médias no teste t a 5% de probabilidade, podendo ser justificado pelo elevado desvio padrão.

A quantificação do IAF é um parâmetro de interesse para o manejo de poda das espécies arbóreas. Avaliar a variação do IAF dos cafeeiros mantidos no SPS e SAF e compará-los pode ser uma alternativa para avaliar o efeito do sombreamento na área deste estudo.

3.2 Modelo digital do cafeeiro

De modo geral, os valores de área de projeção da copa (Apc) modelados foram inferiores aos valores calculados. Os indivíduos quatro e cinco do SAF e sete a nove do SPS foram os que mais diferiram (Tabela 5). Ao comparar a área de projeção da copa de indivíduos arbóreos Hackenberg et al. (2014) encontraram valores semelhantes entre o método manual de mensuração e o método modelado. Do ponto de vista técnico a modelagem apresenta melhores resultados quando comparado aos valores calculados.

Na modelagem todos os “n” comprimentos da seção foram levados em consideração, enquanto que no cálculo proposto por Favarin et al. (2002) um único comprimento foi utilizado para obtenção do valor de área de projeção da copa.

Tabela 5 - Área de projeção da copa dos cafeeiros calculada como proposto por Favarin et al. (2002) e modelada em software ArcGIS

Café	Sistema	Área de projeção da copa (m ²)	
		Favarin et al. (2002)	Modelada
1	SAF	2,30	3,79
2	SAF	2,12	2,11
3	SAF	3,51	2,35
4	SAF	3,56	1,67
5	SAF	5,04	1,28
6	SPS	2,98	2,14
7	SPS	3,61	1,76
8	SPS	4,02	2,00
9	SPS	3,02	1,88
10	SPS	2,83	1,21

Os valores de Apc obtidos por meio do cálculo proposto por Favarin et al. (2002) foram correlacionados com os valores obtidos após a modelagem realizada com o uso do software ArcGIS, obtendo correlação de Pearson de -0,52, classificada como moderada (Figueiredo Filho and Silva Júnior, 2009).

As variações obtidas na aplicação da modelagem podem ser atribuídas à projeção dos maiores ramos ao solo (Figura 4 B), diferente do proposto por Favarin et al. (2002), que utiliza o último par de ramos plagiotrópicos para cálculo da Apc. Na modelagem não se atribui, necessariamente, ao último par de ramos plagiotrópicos para encontrar a área de projeção da copa, mas sim o comprimento do maior ramo ao longo da altura do cafeeiro. Logo, variações obtidas no cálculo proposto por Favarin et al. (2002) podem ser atribuídas a

não homogeneidade, em termos de comportamento fisiológico, de cada planta (Figura 4 A); uma vez que estes estão em ambientes diferentes: SPS e SAF (Freitas et al., 2007).

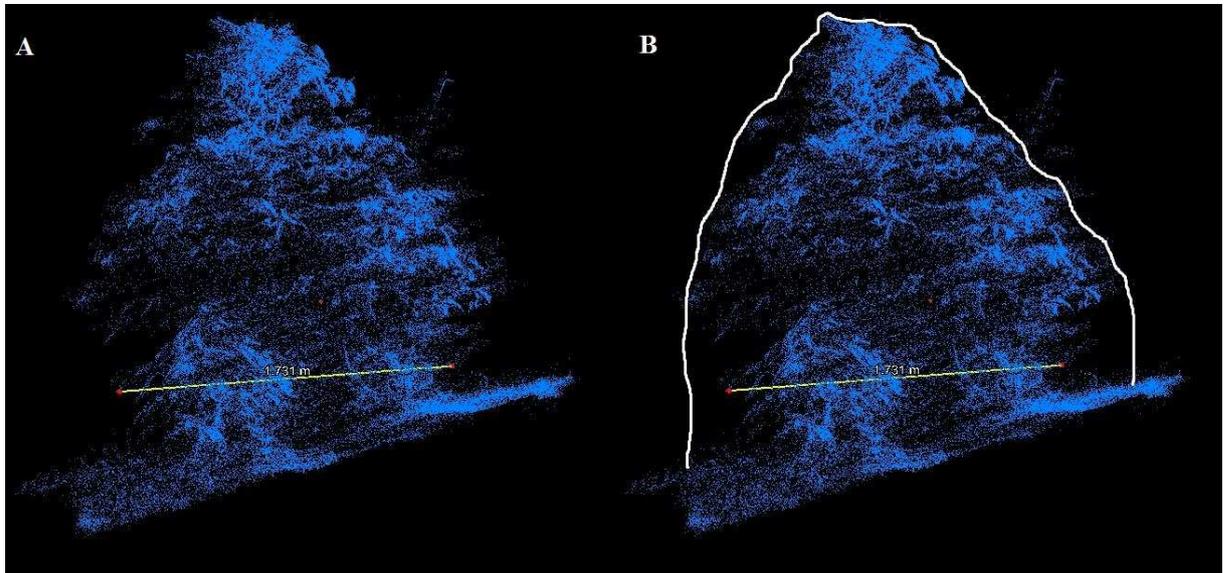


Figura 4 - (A) Área de projeção segundo o método proposto por Favarin et al. (2002). (B) método realizado durante a modelagem do cafeeiro, onde a linha branca é o contorno realizado na modelagem.

Trabalhos de modelagem dendrométrica determinaram valores próximos aos encontrados por métodos destrutivos (Buck et al., 2012), podendo essa técnica ser reproduzida em outras áreas da ciência. Entretanto, ao se trabalhar com medições em SAF afim de determinar variáveis morfométricas dos cafeeiros, deve ser levado em consideração as modificações de características morfológicas como o número de nós por ramos, o comprimento dos ramos plagiotrópicos e o tamanho das folhas (Freitas et al., 2007; Valladares and Niinemets, 2008).

4 Conclusões

A ferramenta laser scanner terrestre demonstrou-se eficiente para o levantamento e avaliação de características dendrométricas como altura; altura de inserção da copa; e área de projeção da copa para indivíduos arbóreos.

O sistema agroflorestal apresenta elevada variação na estrutura das árvores de eritrina, sendo que a área de projeção da copa foi o parâmetro que obteve maior variação, seguido pela altura da copa.

O laser scanner possibilitou o cálculo do índice de área foliar (IAF) do cafeeiro de forma não destrutiva. Não houve diferença significativa do IAF entre os cafeeiros avaliados no sistema a pleno sol e sistema agroflorestal.

A correlação negativa entre os dois métodos de identificação da área de projeção da copa dos cafeeiros foi moderada.

A utilização da modelagem digital dos cafeeiros representa com melhor precisão a área de projeção da copa por não levar em consideração o último par de ramos plagiotrópicos, e sim toda a superfície do cafeeiro.

Referências

- Alpizar, L., Fassbender, H.W., Heuvelpod, J., Fölster, H., Enríquez, G., 1986. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) Materials and methods The Studies were carried out at the Central Experiment of the Department. *Agrofor. Syst.* 4, 175–189.
- Alves, E.P., Silva, M.L. da, Oliveira Neto, S.N. de, Barrella, T.P., Santos, R.H.S., 2015. Economic analisys of a coffee-banana system of a family-based agriculture at the atlantic forest zone, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia* 39, 232–239.
- Bienert, A., Hans-Gerd, M., Scheller, S., 2006. Analysis of the information content of terrestrial laserscanner point clouds for the automatic determination of forest inventory parameters, in: *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*. pp. 1–7.
- Borchert, R., 1980. Phenology and Ecophysiology of Tropical Trees: *Erythrina poeppigiana* O. F. Cook. *Ecol. Soc. Am.* 61, 1065–1074.
- Buck, A.L.B., 2011. Análise de métodos de filtragem em dados laser scanner terrestre aplicados à modelagem tridimensional do tronco de *Pinus* spp.
- Buck, A.L.B., Silva, M.N., Lingnau, C., Machado, Á.M.L., Martins Neto, R.P., 2014. Um algoritmo para filtragem do tronco em nuvem de pontos laser terrestre de árvores de *Pinus* spp. *Bol. Ciencias Geod.* 20, 806–829. doi:10.1590/S1982-21702014000400046
- Buck, A.L.B., Silva, M.N., Lingnau, C., Machado, Á.M.L., Martins Neto, R.P., Pesck, V.A., 2012. Avaliação da modelagem tridimensional do tronco de *Pinus elliottii* a partir de dados laser terrestre. *Ambiência* 8, 549–557. doi:10.5777/ambiencia.2012.04.09
- Cardoso, I.M., Guijt, I., Franco, F.S., Carvalho, A.F., Ferreira Neto, P.S., 2001. Continual learning for agroforestry system design: University, NGO and farmer partnership in Minas Gerais, Brazil. *Agric. Syst.* 69, 235–257. doi:10.1016/S0308-521X(01)00028-2
- Charbonnier, F., le Maire, G., Dreyer, E., Casanoves, F., Christina, M., Dauzat, J., Eitel, J.U.H., Vaast, P., Vierling, L.A., Roupsard, O., 2013. Competition for light in heterogeneous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system. *Agric. For. Meteorol.* 181, 152–169. doi:10.1016/j.agrformet.2013.07.010
- Coltri, P.P., Zullo Junior, J., Dubreuil, V., Ramirez, G.M., Pinto, H.S., Coral, G., Lazarim, C.G., 2015. Empirical models to predict LAI and aboveground biomass of *Coffea arabica* under full sun and shaded plantation: a case study of South of Minas Gerais, Brazil. *Agrofor. Syst.* 621–636. doi:10.1007/s10457-015-9799-5
- DaMatta, F.M., 2004. Fisiologia dos cafeeiros em sistemas arborizados, in: UESB (Ed.), *Arborização de Cafezais*. Matsumoto, Sylvana Naomi, Vitória da Conquista, p. 212.
- Favarin, J.L., Dourado Neto, D., Y García, A.G., Nova, N.A. V, Favarin, M.D.G.G. V, 2002. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 37, 769–773. doi:10.1590/S0100-204X2002000600005
- Ferreira, W.P.M., Ribeiro, M.F., Fernandes Filho, E.I., Souza, C. de F., Castro, C.C.R., 2012. As características térmicas das faces noruega e soalheira como fatores determinantes do clima para a cafeicultura de montanha. *Embrapa Café* 34.
- Figueiredo Filho, D.B., Silva Júnior, J.A., 2009. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). *Rev. Política Hoje* 18, 115–146.
- Freitas, Z.M.T.S., Oliveira, F.J., Carvalho, S.P., Santos, V.F., SANTOS, J.P.D.O., 2007. Avaliação de caracteres quantitativos relacionados com o crescimento vegetativo entre cultivares de café arábica de porte baixo. *Bragantia* 66, 267–275.
- Hackenberg, J., Morhart, C., Sheppard, J., Spiecker, H., Disney, M., 2014. Highly accurate tree models derived from terrestrial laser scan data: A method description. *Forests* 5, 1069–1105. doi:10.3390/f5051069

- Jaramillo-Botero, C., Martinez, H.E.P., Santos, R.H.S., 2006. Características do café (*coffea arabica* L.) sombreado no norte da América Latina e no Brasil: análise comparativa. *Coffee Sci.* 94–102.
- Jose, S., Gordon, A.M., 2008. *Toward agroforestry design: an ecological approach.* Springer Science + Business Media B.V, Florida. doi:10.1007/978-1-4020-6572-9
- Kobayashi, E.S., 2007. Consumo de água e produtividade de cafeeiros arábica na região de Mococa, SP. Campinas.
- Lingnau, C., Silva, M.N., Santos, D.S. dos, Machado, Á., Lima, J.G. dos S., 2008. Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. *Ambiência* 4, 85–96.
- López-Bravo, D.F., Virginio-Filho, E. de M., Avelino, J., 2012. Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions. *Crop Prot.* 38, 21–29. doi:10.1016/j.cropro.2012.03.011
- Lorenzi, H., Souza, H.M., Torres, M.A.V., Bacher, L.B., 2003. Árvores exóticas no Brasil: madeiras, ornamentais e aromáticas. Nova Odessa.
- Mancuso, M.A.C., Soratto, R.P., Perdoná, M.J., 2013. Produção de café sombreado. *Colloq. Agrar.* 9, 31–44. doi:10.5747/ca.2013.v09.n1.a087
- Martins Neto, R.P., Buck, A.L.B., Silva, M.N., Lingnau, C., Machado, Á.M.L., Pesck, V.A., 2013. Avaliação da varredura laser terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas. *Bol. Ciencias Geod.* 19, 420–433. doi:10.1590/S1982-21702013000300005
- Mora, A., Beer, J., 2013. Geostatistical modeling of the spatial variability of coffee fine roots under *Erythrina* shade trees and contrasting soil management. *Agrofor. Syst.* 87, 365–376. doi:10.1007/s10457-012-9557-x
- Moraes, E.C. De, 2002. Fundamentos de sensoriamento remoto.
- Nair, P.K.R., 1991. State-of-the-art of agroforestry systems. *For. Ecol. Manage.* 45, 5–29. doi:10.1016/0378-1127(91)90203-8
- Nygren, P., Ramírez, C., 1995. Production and turnover of N₂ fixing nodules in relation to foliage development in periodically pruned *Erythrina poeppigiana* (Leguminosae) trees. *For. Ecol. Manage.* 73, 59–73. doi:10.1016/0378-1127(94)03505-Q
- Oliveira, A.C.C., 2013. Sistemas agroflorestais com café: fixação e neutralização de carbono e outros serviços ecossistêmicos.
- Olsoy, P.J., Glenn, N.F., Clark, P.E., 2013. Sagebrush Biomass Using Terrestrial Laser Scanning (TLS). *Rangel. Ecol. Manag.* 67, 224–228. doi:10.1007/SpringerReference_28205
- Passalacqua, P., Belmont, P., Staley, D.M., Simley, J.D., Arrowsmith, J.R., Bode, C.A., Crosby, C., DeLong, S.B., Glenn, N.F., Kelly, S.A., Lague, D., Sangireddy, H., Schaffrath, K., Tarboton, D.G., Wasklewicz, T., Wheaton, J.M., 2015. Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review. *Earth-Science Rev.* 148, 174–193. doi:10.1016/j.earscirev.2015.05.012
- Ricci, M.D.S., Costa, J.R., Pinto, A.N., Da Silva Santos, V.L., 2006. Cultivo orgânico de cultivares de café a pleno sol e sombreado. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 41, 569–575. doi:10.1590/S0100-204X2006000400004
- Setkowitz, J.A., 2014. Evaluation of algorithms and tools for 3D modeling of laser scanning data.
- Torquebiau, E., Mary, F., Sibelet, N., 2002. Les associations agroforestières et leurs multiples enjeux. *Bois forêts des Trop.* 271, 23–35.
- Vaast, P., Kanten, R. van, Siles, P., Angrand, J., Aguilar, A., 2008. Biophysical interactions between timber trees and arabica coffee in suboptimal conditions of Central America, in:

- Nair, P.K.R. (Ed.), *Toward Agroforestry Design: A Ecological Approach*. Springer Science + Business Media B.V, Florida, p. 307.
- Valladares, F., Niinemets, Ü., 2008. Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 39, 237–257. doi:10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173506

Capítulo 2

MODELO DIGITAL DE RADIAÇÃO PARA SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CAFÉ

Resumo

O objetivo desse trabalho foi; considerando a formato e altura da copa das árvores de eritrina, elaborar o modelo digital de superfície (MDS, MDRad e MDsomb) radiação e sombreamento para o cultivo do café em sistema agroflorestal. Com isso também determinar o grau de sombreamento dos cafeeiros e posteriormente simular o modelo digital de radiação calibrado. A obtenção e elaboração dos três modelos digital de superfície (MDS) foi por meio do software ArcGIS. A porcentagem de sombreamento nos sistemas foi obtida por meio dos valores de radiação global medidos no sistema a pleno sol e foram relacionados com os valores de radiação em pontos pré determinados dentro do sistema agroflorestal. Os valores de precipitação foram obtidos por meio de pluviógrafo de balsa. A temperatura do ar foi obtida com sensores termistor. Os resultados demonstraram que foi possível elaborar o modelo digital de radiação de SAF a partir dos dados gerados no MDS. O modelo digital de radiação obteve adequada calibração, com R^2 de 0,957. Dentro do SAF foi possível observar redução da duração de radiação direta, se comparado com o SPS. No solstício de inverno alguns pontos do SAF apresentaram duração da radiação direta inferior a 1,5 horas, já no solstício de verão esses mesmo pontos foi superior à 4,5 horas. O modelo digital de sombra prevê melhor a luz do que a sombra. Tal modelo não leva em consideração a sombra abaixo da copa das árvores. No SAF houve redução do gradiente de temperatura do ar. As temperaturas máximas foram reduzidas, em média, em quase 2 °C, já as temperaturas mínimas foram elevadas em quase 1 °C ao compará-los com o SPS.

Termos para indexação: sombreamento; precipitação; temperatura; modelagem.

1 Introdução

Com o aquecimento global elevadas temperaturas e déficit hídrico são corriqueiros, afetando diretamente a produção vegetal. Nesses casos, buscar mecanismos que possam amenizar tais modificações é uma opção viável à ser utilizada, como por exemplo os sistemas agroflorestais. Os sistemas agroflorestais podem ser uma alternativa, pois além de proporcionarem a modificação do microclima (Lin, 2007; Muschler, 1999; Pezzopane et al., 2000), podem ser fonte de renda extra para os agricultores (Duarte et al., 2008; Mancuso et al., 2013; Neupane and Thapa, 2001).

Interferir na quantidade de radiação incidente na produção pode alterar também, valores de evapotranspiração, modificando o regime hídrico do sistema (Pezzopane et al., 2007, 2005), afetando também a umidade relativa do ar e a temperatura (Lin, 2007; López-Bravo et al., 2012). Modifica também processos fenológicos, interferindo diretamente no metabolismo das plantas (DaMatta and Ramalho, 2006), podendo ser positivos ou negativos, já que o sombreamento está diretamente ligado ao desenho proposto no sistema e espécies inseridas nele.

Desenhos de sistemas agroflorestais são propostos há décadas (Nair, 1993). Em alguns casos utiliza-se uma única espécie para os indivíduos arbóreos (Leal et al., 2006), em outros, trabalha-se com maior diversidade de espécies (Coelho et al., 2010). Alguns sistemas agrosilvipastoris são cultivados com clones de eucalipto (Nicodemo, 2011), e outros trabalhos em sistemas agroflorestais utilizando seringueiras em consórcio com café, ambos apresentando uniformidade em sua copa (Righi et al., 2011), assim como o mogno (Lunz, 2006) e cedro. Entretanto Charbonnier et al. (2013), salientam que existe desuniformidade no SAF. Essa desuniformidade interfere diretamente na radiação que chega aos outros estratos arbóreos, disponibilizando luz de forma heterogênea.

A modelagem da radiação pode simplificar variações de grandezas como a temperatura e a umidade relativa, já que estão diretamente ligadas. Vale lembrar que com o aquecimento global, áreas produtoras de café podem ser reduzidas, fazendo com que o cultivo migre de áreas de menor altitude para áreas de maior altitude, como maior risco de geadas e ventos fortes que podem prejudicar a cultura do cafeeiro.

Neste caso, devido à desuniformidade que pode ocorrer dentro de um sistema, ou até mesmo devido a condições da superfície terrestre, interpolar a radiação pode não ser viável. (Fu and Rich, 1999). Logo, elaborar modelos digitais para sistema produtivos, pode ser

considerado melhor para tal, já que levam em consideração formas do relevo, condições atmosféricas e épocas do ano.

Entretanto existe certa desconfiança ao sombrear café, devido a diferentes resultados, favoráveis ou desfavoráveis relativos à sua produção (Amaral et al., 2011; Jaramillo-Botero et al., 2006; Kobayashi, 2007; Salgado et al., 2004). Estudos são necessários para garantir a produção do cafeeiro mesmo em áreas com elevadas temperaturas, sendo o SAF uma ferramenta de manejo que garanta esse cultivo. Logo torna-se importante modelar esses sistemas a fim de projetar cenários futuros, de forma a garantir o cultivo ainda melhor e eficiente do ponto de vista agroecológico.

Nesse contexto, objetivou-se com o presente trabalho:

1. Elaborar o modelo digital de superfície (MDS) e modelo digital de radiação (MDRad) para o cultivo do café em sistema agroflorestal, levando em consideração a altura e formato da copa das árvores;
2. Determinar o grau de sombreamento dos cafeeiros dentro do sistema agroflorestal;
3. Simular o modelo digital de radiação calibrado, para períodos fenológicos do café relacionando com variáveis meteorológicas: precipitação, temperatura do ar e solo da área experimental.

2 Material e Métodos

2.1 Modelo digital de superfície (MDS)

A área experimental está localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa - UFV, no município de Viçosa, MG, com coordenadas geográficas: 20° 45' 23,28" S e 42° 50' 33,16" O; 20° 45' 22,75" S e 42° 50' 30,89" O; 20° 45' 22,82" S e 42° 50' 31,01" O; 20° 45' 21,91" S e 42° 50' 31,69" O, datum WGS84, e altitude média de 675 m. Nesta área há uma lavoura de 2.590 m² espaçados a 2,80 x 0,75 m, conduzido em sistema pleno sol (SPS) e consorciado com eritrina (*Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F.Cook).

Os cafeeiros foram plantados em novembro de 2007, já as eritrinas foram em março de 2008, estabelecendo assim, o sistema agroflorestal. No SAF, as eritrinas foram plantadas em linhas distantes 11,20 m, sendo que em cada linha, as eritrinas estão separadas por 2,80 m (maior densidade populacional), considerado como SAFa, ou 4,40 m (menor densidade populacional), considerado como SAFb. Existem quatro linhas de eritrina, sendo que em cada

uma delas foram plantadas duas linhas de café espaçadas a 1,40 e 4,20 m acima e abaixo da linha de eritrina, totalizando dezesseis linhas de café e quatro linhas de eritrina.

Para a elaboração do MDS selecionou-se a área de interesse (SAFa, SAFb e SPS). Após a filtragem para eliminar alguns pontos que não representavam a superfície do terreno os dados foram exportados para o software ArcGIS, onde foram obtidos os MDS, utilizando algoritmos interpoladores quais sejam: Average, IDW (Inverso da Distância Ponderada) e Maximum (Bandara et al., 2011).

Para a diferença entre os diferentes MDS foi realizado o cálculo do erro médio quadrático (RMSE) para os modelos elaborados, subtraindo um modelo do outro da seguinte forma: (Average – IDW); (Average – Maximum); e (Maximum – IDW), a diferença entre os modelos foram equacionadas segundo Willmott & Matsuura (2005). Foram gerados três mapas com pontos onde as diferenças foram maiores entre os interpoladores.

$$\text{RMSE} = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n |e_i|^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

RMSE é a raiz quadrática do erro (m), e_i a diferença da elevação de cada célula do par de modelos digitais analisados.

2.2 Modelo digital de radiação (MDRad)

Foi realizada calibração do piranômetro, instalando-o na área da estação meteorológica automática do INMET, localizada no campus da UFV. A resolução temporal usada na coleta de dados foi de leituras a cada minuto integralizadas para dados horários. Os dados foram processados utilizando o software R, ajustando modelo linear entre os valores observados na estação, e os aferidos com o piranômetro utilizado em campo.

De posse do MDS, foram realizados modelagens da radiação por meio da ferramenta Solar Analyst do ArcGIS, e calculada a radiação global da área utilizando os dados do relevo (Fu and Rich, 1999). Os parâmetros ajustados para calibrar o modelo foram a transmitância e a difusividade. Para realizar a calibração, foram comparados dados de leitura, utilizando o piranômetro, em área a pleno sol e os dados produzidos pelo modelo.

Para realizar o ajuste entre valores medidos no campo e modelados, os parâmetros de transmitância e difusividade variaram de 0,1 a 0,9, em intervalos de 0,1. A cada execução do modelo, o valor da transmitância foi incrementado em 0,1, ao passo que a difusividade permanecia fixa. Após o valor de transmitância alcançar o valor de 0,9 o valor da difusividade

foi incrementado em 0,1, até o valor de difusividade alcançar o valor 0,9. Com a variação de ambos os parâmetros nove vezes, foram gerados 81 arquivos matriciais (rasters) com informação de radiação global (RG) em Wh m^{-2} em suas células.

Valores de RG foram tomados a 1,5 m de altura do solo com o auxílio de piranômetro modelo Delta-T Device, que determina os valores de radiação total, global e difusa (Wh m^{-2}). Para calibração do modelo digital de radiação (MDRad) foi implantado na área de café a pleno sol (SPS) ponto georreferenciado. Neste local foram realizadas leituras de radiação solar com o piranômetro, que foram relacionados com valores de radiação simulados para o mesmo ponto utilizando o software ArcGIS. Foram realizadas seis leituras de radiação, em datas específicas (Tabela 6), preconizando dias sem nebulosidade.

Tabela 6 - Datas de leitura e horários de leitura de radiação global em campo

Datas	Hora
20/08/2015	15:29:00
24/08/2015	13:38:00
31/08/2015	13:09:00
18/09/2015	13:32:30
23/09/2015	13:40:00
20/01/2016	12:52:40
09/04/2016	13:26:26
25/04/2016	13:07:07

Realizou-se ainda a extração das informações dos rasters para o local do ponto georreferenciado, obtendo uma matriz 9x9. Após esse processo os valores de radiação obtidos em campo foram comparados aos valores extraídos dos modelos gerados. A combinação das variáveis transmitância e difusividade que mais se aproximou do valor real foi separada para ajuste fino. Foi feita a seleção dos valores mais próximos de transmitância e difusividade e o intervalo entre eles foi novamente dividido em 10 partes gerando um incremento de 0,01. Uma matriz 9x9 foi novamente criada e o modelo de radiação foi novamente executado para cada uma das combinações da matriz totalizado 81.

Após o ajuste dos valores, o melhor parâmetro ajustado foi escolhido para simular a radiação global para os outros dias em que a radiação foi medida em campo. Para aferir se a radiação manteve um comportamento uniforme ao longo das diferentes épocas do ano, foi ajustado um modelo de regressão linear entre valores preditos pelo modelo e valores medidos em campo.

Após a calibração do MDRad foram processadas simulações de sombreamento durante o dia, utilizando o software ArcGIS. Foram selecionadas datas importantes para fenologia do cafeeiro, 01 de agosto a 30 de setembro, período da florada; 01 de novembro a 31 de dezembro, que abrangem todo período de expansão rápida do fruto; 01 de fevereiro a 30 de março, maturação do grão. Foram realizadas também simulações para as datas de equinócio e solstícios de inverno e verão.

2.3 Modelo digital de sombra (MDSomb)

Em diferentes dias e horários (Tabela 7) foi observado a presença de sombreamento no topo de hastes de bambu instaladas nos sistemas (Figura 5). As hastes possuíam em média três metros, sendo maiores que os cafeeiros. Na Figura 6 pode ser observado o esquema de como as hastes de bambu foram instaladas.

Esses dados foram tabulados e correlacionados com os dados de sombreamento simulados após a calibração do modelo digital de radiação.

Tabela 7 - Data e horário de verificação de sombreamento nas hastes de bambu

Data	Hora
08/08/2015	07:07:00
08/08/2015	07:35:00
17/08/2015	10:20:00
17/08/2015	11:05:00
20/08/2015	17:18:00
24/08/2015	15:10:00
03/11/2015	15:00:00
10/11/2015	10:00:00

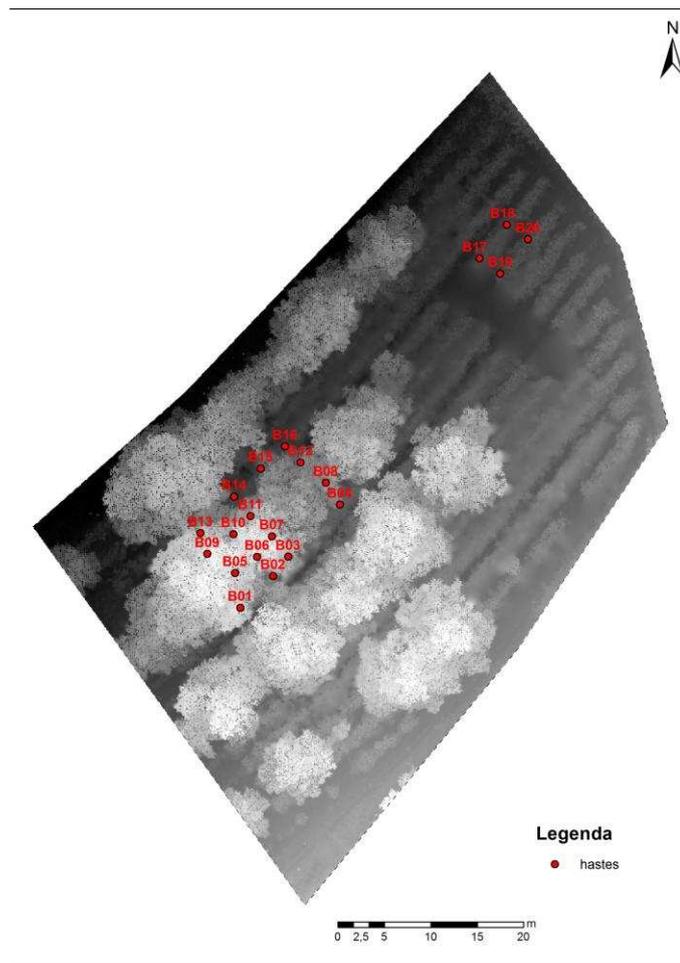


Figura 5 - Imagem superior da área de estudo com pontos em vermelho representando as 20 hastes de bambu.

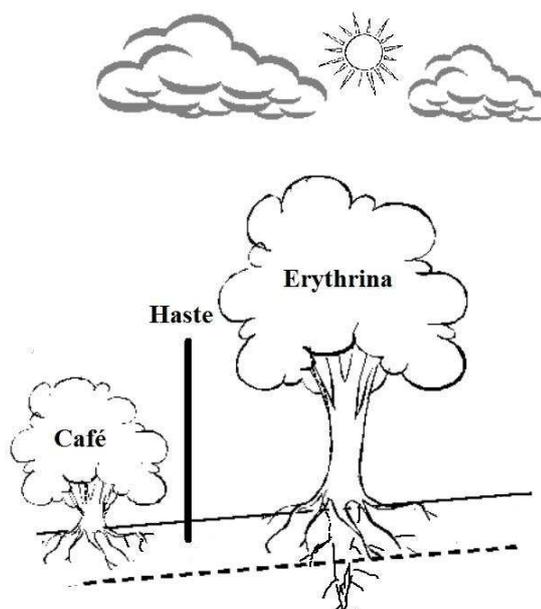


Figura 6 - Croqui da instalação da haste com altura média de 3 m.

Os dados produzidos pelo modelo digital de sombra foram binários (0, sombra e 1, luz). Foram criadas matrizes de confusão objetivando determinar a acurácia do modelo de sombras. Foram avaliadas as seguintes situações: 1. todas as hastes; 2. hastes dentro da projeção da copa da eritrina; 3. hastes fora da projeção da copa da eritrina e 4. hastes no SPS. A partir das matrizes de confusão foi calculado o índice Kappa, que avalia a concordância entre os valores modelados e observados em campo, utilizando o software R (Kuhn et al., 2012). Para seu cálculo foi utilizado a seguinte equação:

$$K = \frac{P_0 - P_C}{1 - P_C} \quad (4)$$

P_0 é a proporção de pontos de referência que concordam; e P_C o somatório do produto dos elementos das linhas e colunas marginais. P_C indica a proporção de elementos atribuídos a classe ao acaso.

2.4 Porcentagem de sombreamento do sistema

A fim de calcular a porcentagem de sombreamento nos sistemas, os valores de RG medidos no SPS foram relacionados com os valores de radiação em quatro pontos, dois implantados nas ruas do SAFa, a 2,80 e 5,60 m das linhas de eritrina e dois instalados no SAFb, também a 2,80 e 5,60 m das linhas de eritrina. Para o cálculo foi utilizada equação proposta por Coelho et al. (2010):

$$\% \text{ de sombreamento do sistema} = 100 - \left[\left(\frac{RG \text{ do SAF}}{RG} \right) \times 100 \right] \quad (5)$$

“RG do SAF” é a radiação global encontrado nos pontos dentro dos sistemas agroflorestais e RG a radiação global no sistema a pleno sol.

2.5 Avaliações microclimáticas

Valores de precipitação e temperatura do ar foram coletados automaticamente durante o período de novembro de 2015 a junho de 2016, um pluviógrafo de bscula TB4 (com resoluo de 0,254 mm de chuva, Campbell Scientific) foi utilizado para determinao da precipitao. A temperatura do ar foi obtida com sensores termistor (erro $\pm 0,2$ °C entre 0 °C e 60 °C, modelo 107, Campbell Scientific), instalados em abrigos na altura de 1,0 m na linha de plantio do caf. Os sensores foram acoplados e operados por equipamento de controle

e armazenagem de dados (datalogger modelo CR 1000, Campbell Scientific), configurados para o registro horário. Já a precipitação foi configurada para registro a cada 10 s e integralizados para dados horários.

Foi instalado sensor de temperatura do ar no SAF, realizou-se a comparação da temperatura no SAF e SPS durante o período de 23 de julho a 23 de novembro de 2015, período que coincide com repouso, florada e expansão dos frutos dos cafeeiros.

3 Resultados e Discussão

3.1 Modelos digitais de superfície (MDS)

Para o desenvolvimento do presente trabalho o MDS serviu de base para o cálculo do modelo digital de radiação. No MDS foram geradas as feições do relevo e árvores que diretamente interferem no modelo digital de radiação.

Para o início da modelagem digital de radiação foi necessário à obtenção do modelo digital de superfície, que melhor representava a área. De posse da nuvem de pontos foram elaboradas interpolações gerando modelos digitais de superfície.

A modelagem digital do SAF na simulação de desenhos desses sistemas, bem como avaliar o comportamento do sombreamento dentro do sistema auxiliando na compreensão antes de realizá-lo no campo. É importante também na simulação de podas e novos desenhos para o sistema.

Os modelos a partir da nuvem de pontos vêm sendo realizado em diversos trabalhos na área florestal (Buck et al., 2014, 2012). Possui vantagens, a fim de identificar o comportamento do fenômeno em locais ainda não amostrados, sendo assim a modelagem se justifica na simulação de interferências a partir de dados colhidos (Isaaks and Srivastava, 1989).

3.1.1 Análise RMSE dos modelos

Foram elaborados três MDS conforme Figura 7, sendo gerado pelo algoritmo Maximum. O que representou melhor as feições da copa foi o método de escolha de pontos Maximum, já que este seleciona a maior cota dentro das células.

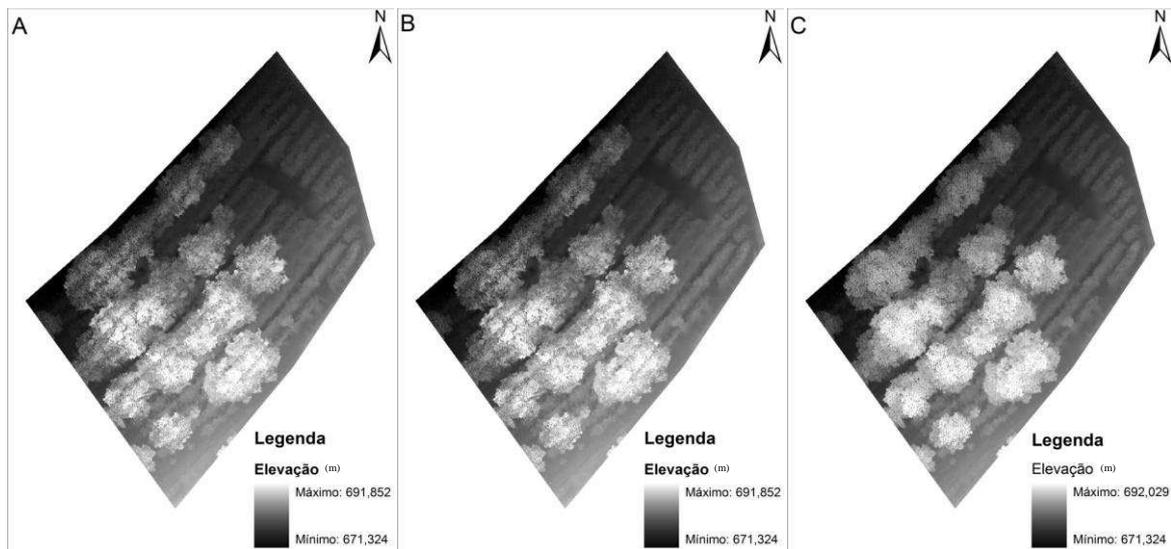


Figura 7 - Modelos digitais de superfície (MDS) da área de estudo. MDS elaborado através do método de escolha de ponto Average (A); IDW (B); e Maximum (C).

Para todos os métodos, o preenchimento de espaços vazios se deu através da interpolação do vizinho natural (Natural Neighbor). A escolha da interpolação do vizinho natural deve-se a identificação do elevado número de pontos encontrados na amostra, uma vez que esse método de estimação consegue trabalhar com qualquer número de pontos dentro da célula definida (Isaaks and Srivastava, 1989). Este apresenta também, ligeira melhora nos resultados se comparados com outros como: Splines e Topo to Raster (Bandara et al., 2011).

Observou-se pouca distinção entre os interpoladores Average e IDW, no entanto ao comparar ambos com o Maximum, o valor da maior cota cai em 0,40 m. Avaliando também as linhas de árvores observa-se ligeira rugosidade na copa das eritrinas utilizando interpoladores de média (Figura 7A e 7B).

Em ambos os casos foi possível identificar as linhas de árvores de eritrina e café dentro do sistema produtivo, embora para as Figuras 7A e 7B, os interpoladores não representaram com clareza a área de estudo.

O fato da reprodução (modelagem) da área ser melhor representada através do Maximum deve-se que este interpolador seleciona o máximo valor de elevação de cada célula, diferentemente do Average, que seleciona o valor médio em elevação dentro de célula, e do IDW que calcula o inverso do quadrado da distância para cada célula. Como o interpolador Maximum, seleciona o ponto de maior cota da área, os pontos de outras superfícies como as linhas de café que estavam abaixo da projeção da copa foram eliminados, fazendo com que as árvores apresentassem estrutura semelhante de relevos montanhosos, com projeção do dossel

até o solo, encobrindo o que havia abaixo. Projeções semelhantes foram encontradas por (Charbonnier et al., 2013).

Com a subtração dos modelos, foram encontrados valores de RMSE de 0,28 para subtração do Average menos o IDW, 1,32 para o Maximum menos o IDW e 1,28 para o Average menos o Maximum, confirmando a hipótese de similaridade entre os modelos Average e IDW, se comparado com Maximum. Na Figura 8 podem ser observados os pontos em que as diferenças são maiores.

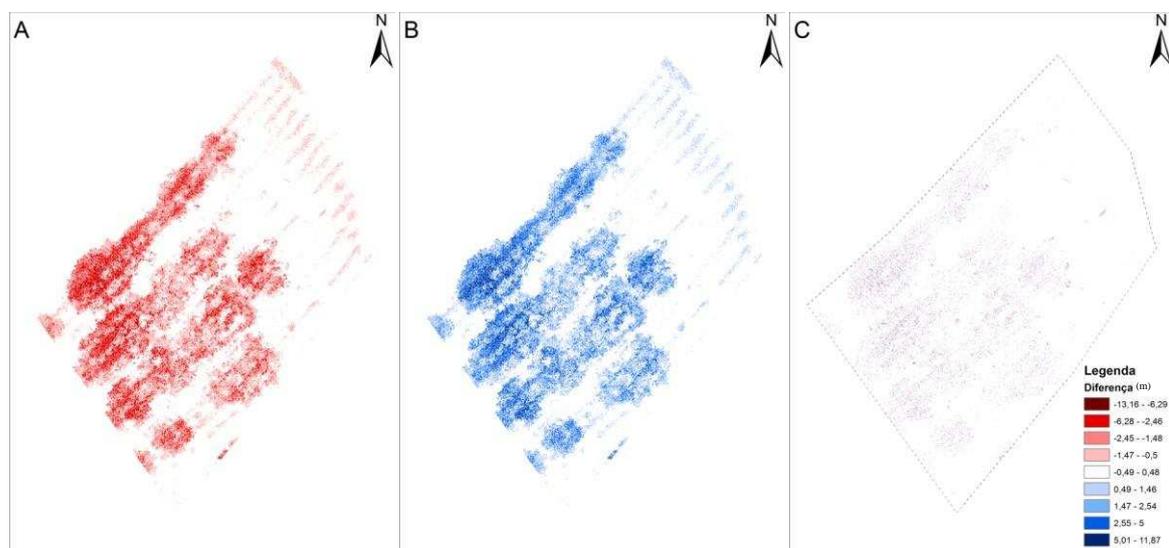


Figura 8 - Diferença entre os modelos digitais de elevação (MDS). Diferença entre Average e Maximum (A). Diferença entre Maximum e IDW (B). Diferença entre Average e IDW (C). As diferenças são representadas em metros (m).

Para as Figuras 8A e 8B, foram encontradas maiores diferenças em pontos das superfícies das copas de eritrinas e cafeeiros, sendo que para Figura 8A, as diferenças variaram entre 3,70 a -9,98 m em algumas células. Já para a Figura 8B, as diferenças não obtiveram valores negativos, sendo a diferença máxima de 10,55 m. Logo, os métodos Average e IDW, não representam com total exatidão a área, já que apresentam grande diferença da superfície quando comparados com os dados interpolados através do Maximum. Além do mais o interpolador Maximum seleciona os pontos de máxima cota dentro da célula.

3.2 Modelo digital de radiação (MDRad)

A regressão linear entre os dados verificados na área experimental, com auxílio de piranômetro, e os coletados na estação automática é representada na Figura 9. A escolha do ajuste linear foi feita já que os dados apresentaram comportamento linear, com correlação de

Pearson de 0,94, caracterizada como muito forte (Figueiredo Filho and Silva Júnior, 2009). Os dados coletados em campo foram então corrigidos utilizando a equação de ajuste linear.

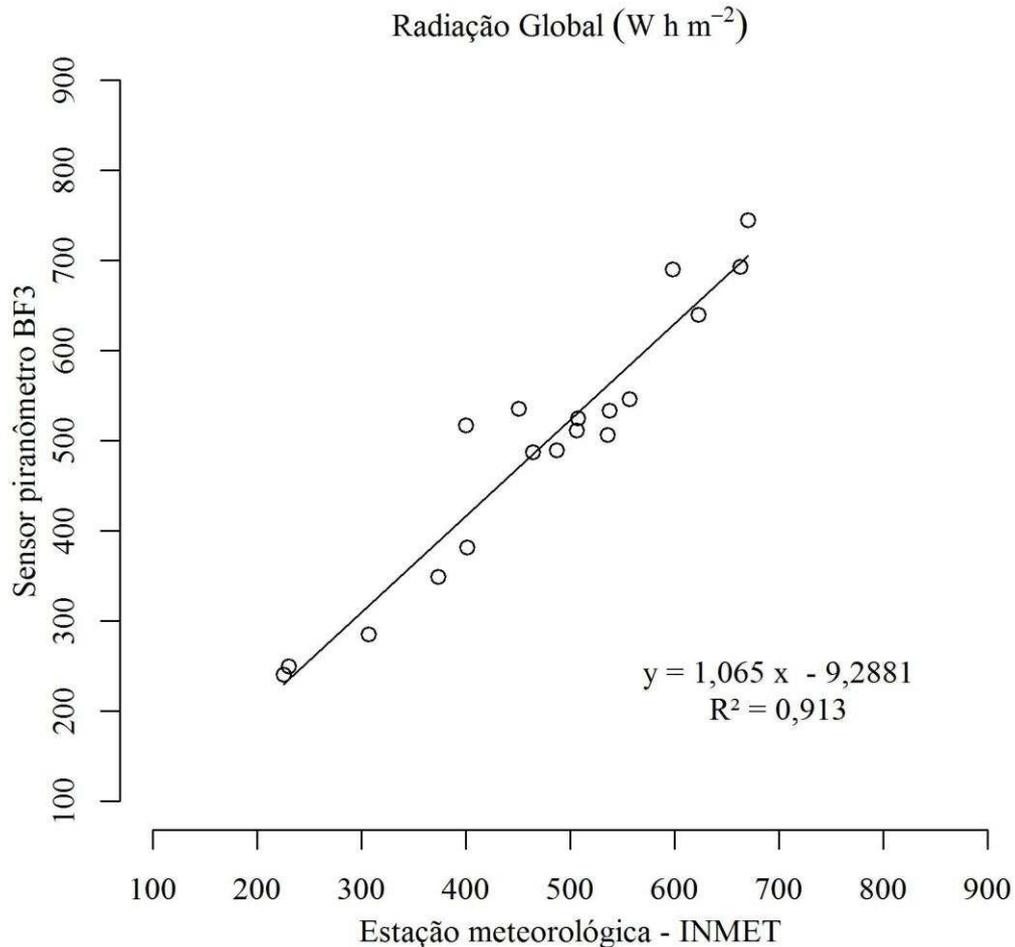


Figura 9 - Regressão linear dos dados disponibilizados pelo INMET em relação aos dados obtidos com o auxílio do piranômetro.

Após a calibração dos dados obtidos em campo, com auxílio do piranômetro, médias de RG obtidos no ponto do SPS em diferentes períodos do ano (Tabela 6) foram utilizadas para calibração do MDRad. Foi utilizado com base para o MDRad o MDS a partir do interpolador Maximum. Na Tabela 8 pode ser observado a variação da radiação global simulada ao variar os parâmetros de transmitância e difusividade.

Tabela 8 - Combinação de variáveis transmitância e difusividade para obtenção da matriz de calibração com valores de RG (Wh m^{-2}) extraídos do ponto de coleta

		Transmitância								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Difusividade	0,1	58,55	132,90	214,80	302,06	393,56	488,60	586,69	687,48	790,69
	0,2	59,69	135,51	219,03	308,03	401,35	498,28	598,33	701,13	815,04
	0,3	61,16	138,86	224,47	315,69	411,35	510,72	613,29	718,69	826,63
	0,4	63,11	143,32	231,71	325,91	424,70	527,32	633,24	742,10	853,58
	0,5	65,85	149,58	241,86	340,22	443,38	550,55	661,18	774,87	891,32
	0,6	69,96	158,96	257,08	361,68	497,03	585,39	703,08	824,03	947,92
	0,7	76,80	174,60	282,45	397,45	518,10	643,47	772,91	905,96	1042,26
	0,8	90,50	205,87	333,19	468,99	611,50	759,62	912,58	1069,83	1230,93
	0,9	131,57	299,70	485,40	683,60	891,70	1108,07	1331,58	1561,43	1796,95

Foi selecionado o valor de 854,87 Wh m^{-2} de RG obtido em campo, como valor de referência para a validação do modelo. O dado foi coletado no dia 23/09/2015, sendo que neste dia havia ausência de nebulosidade.

O valor de radiação global obtido a partir das combinações de transmitância e difusividade de 0,9 e 0,4 respectivamente foram as que mais se aproximaram do valor medido em campo para todas as datas avaliadas (Tabela 8). Com o refinamento desse intervalo, chegou-se à combinação de 0,85 para transmitância e 0,35 para difusividade (Tabela 9).

Tabela 9 - Combinação de variáveis transmitância e difusividade para obtenção da matriz de calibração com valores de RG (Wh m^{-2}) após o processo refinado.

		Transmitância								
		0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89
Difusividade	0,31	757,85	768,97	780,12	791,29	802,49	813,72	824,96	836,24	847,33
	0,32	759,98	771,13	782,31	793,52	819,92	816,00	827,28	838,59	849,91
	0,33	762,17	773,36	784,56	795,81	807,07	818,36	829,67	841,01	852,37
	0,34	764,43	775,65	786,89	798,16	809,46	820,78	832,13	843,49	854,89
	0,35	766,76	778,01	789,76	800,59	811,92	823,86	834,66	846,07	857,49
	0,36	769,16	780,45	791,76	803,10	814,46	825,86	837,28	848,72	860,19
	0,37	771,64	782,96	794,31	805,69	817,09	828,52	839,97	851,45	862,96
	0,38	774,19	785,55	796,94	808,36	819,79	831,26	842,76	854,28	865,82
	0,39	776,83	788,23	799,66	811,12	822,59	834,10	845,63	857,19	868,77

Avaliando a influência da cobertura do céu, Alves et al. (2013) encontraram parâmetros de transmitância de 0,68 a 0,13 e difusividade em 0,20 a 0,77 em Cuiabá/MT. Considerando para dias de céu claro sem a presença de nuvens a combinação de 0,20 para difusividade e 0,68 para transmitância.

Na Figura 10 a regressão linear entre os valores calculados no modelo e os valores mensurados em campo para outros dias de avaliação mencionados na Tabela 6. Para o cálculo do modelo manteve-se o valor padrão de 0,85 para transmitância e 0,35 para a difusividade para todos os dias de verificação da RG. O coeficiente de determinação linear ajustado (R^2) elevado, confirma que a escolha dos parâmetros foram os melhores para efeito de comparação entre diferentes dias e épocas do ano. Valores de R^2 de 0,98 foram encontrados por Alves et al. (2013) também para condições de céu claro.

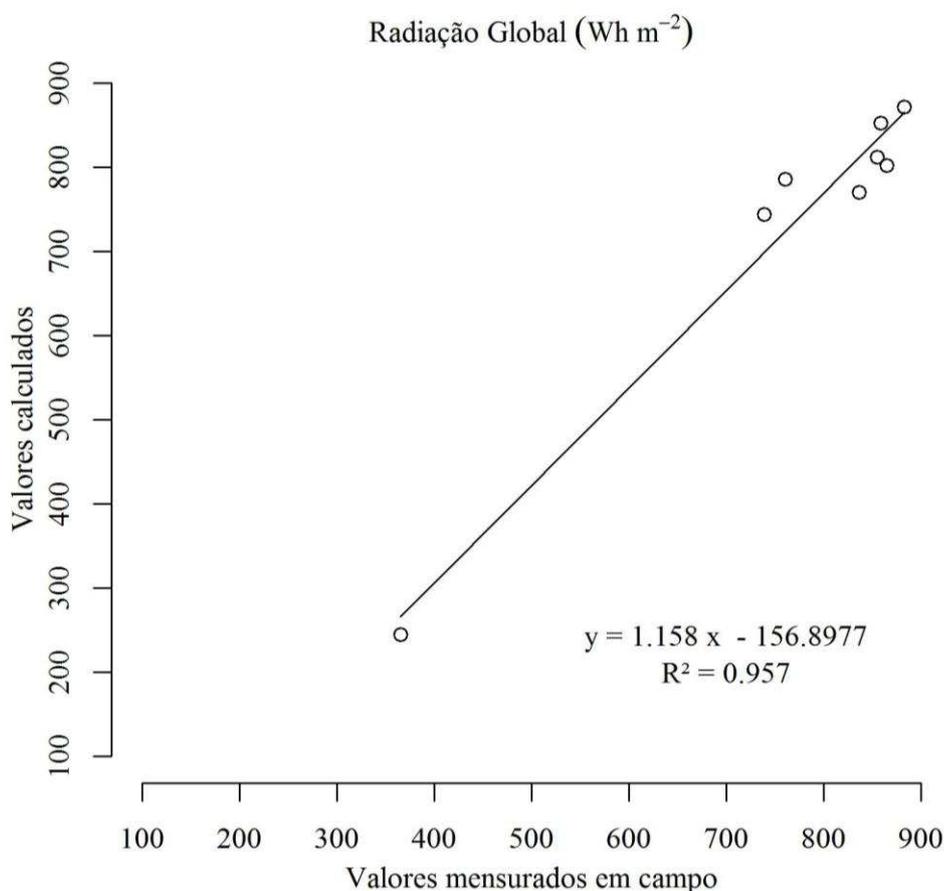


Figura 10 - Regressão linear dos dados simulados através do modelo em período de agosto de 2015 a abril de 2016. Eixo x representa os valores de radiação aferidos em campo utilizando o piranômetro sunshine BF3 Delta-T Devices. Eixo y representa os valores simulados para esse mesmo período.

As simulações de tempo de duração de radiação direta realizadas para períodos de solstício de inverno, equinócio e solstício de verão são apresentadas nas Figuras 11A; 11B e 11C, respectivamente.

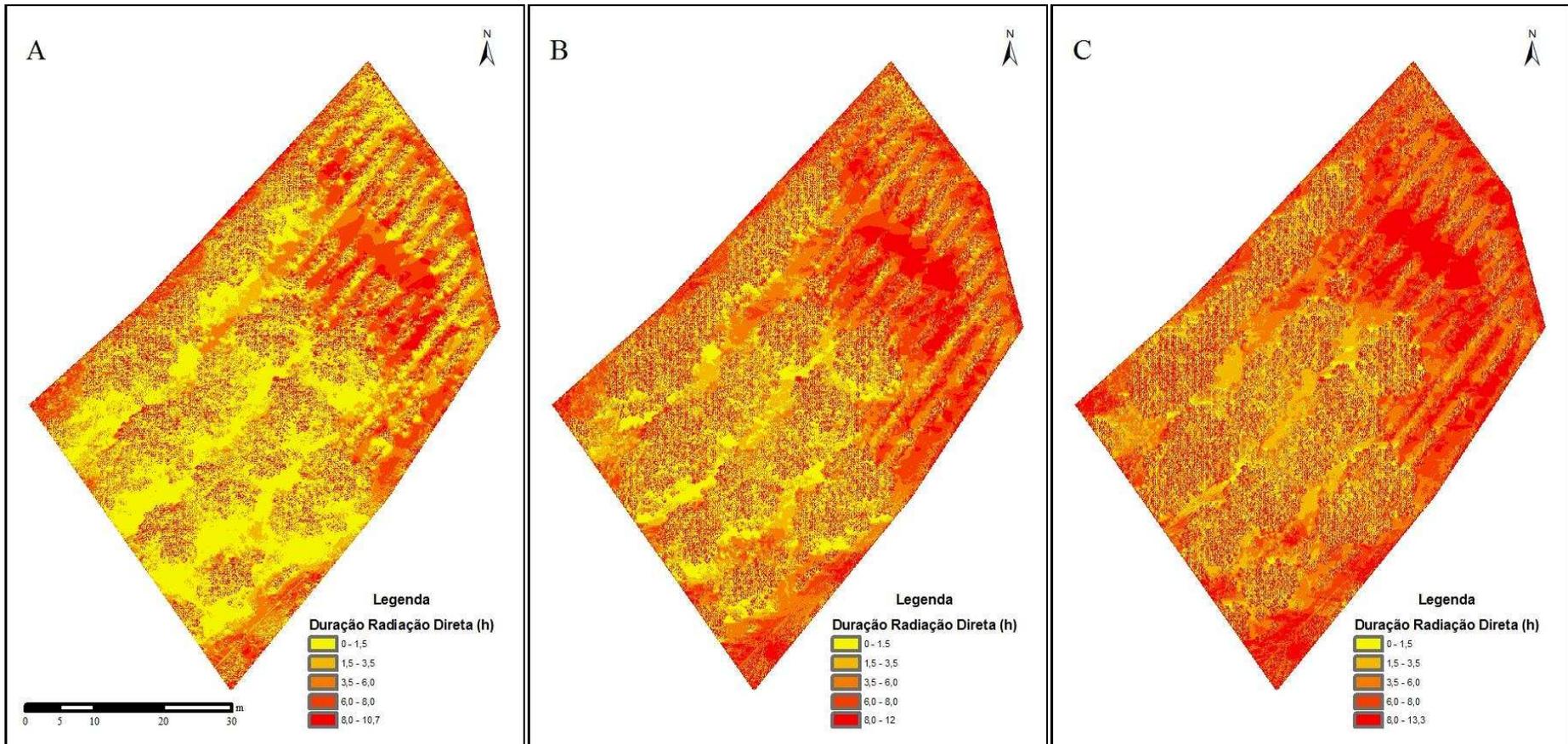


Figura 11 - Duração de radiação direta em horas para o solstício de inverno (A); equinócio (B) e solstício de verão (C).

Avaliando as figuras, durante todas as três datas (Figura 11) a duração de radiação direta foi menor nas áreas do SAF se comparadas às áreas do SPS. Entre as linhas de eritrina a incidência de radiação direta foi menor que 1,5 horas no solstício de inverno, chegando a 3,5 no solstício de verão. Avaliando as três figuras percebe-se a influência das árvores no SAF, alterando a incidência de radiação direta, nas diferentes épocas do ano.

A duração da radiação direta aumenta nas áreas sombreadas à medida que a data do solstício de verão (21 de dezembro) se aproxima. Tal fato se deve a marcha diária aparente do sol que durante o período do verão apresentam maior duração ao longo do dia (Matheus and Lopes, 2000; Pezzopane et al., 2005; Varejão-Silva, 2000).

No solstício de inverno, do Hemisfério Sul, ocorre o dia mais curto do ano, já no solstício de verão ocorre o oposto. Desta forma, a disponibilização de energia para a superfície terrestre segue esse regime.

Na Figura 12 pode ser observada a atenuação da duração de radiação direta durante todo o período da florada (01 de agosto a 30 de setembro). O valor máximo de duração de radiação direta foi de 700 horas em 61 dias, ou seja, em um dia 11,48 horas de incidência de radiação direta por dia. Esses valores são observados nas copas das árvores de eritrinas e cafeeiros a pleno sol. Em geral entre as linhas das eritrinas os valores observados não ultrapassaram 7,70 horas diárias de incidência de radiação solar direta.

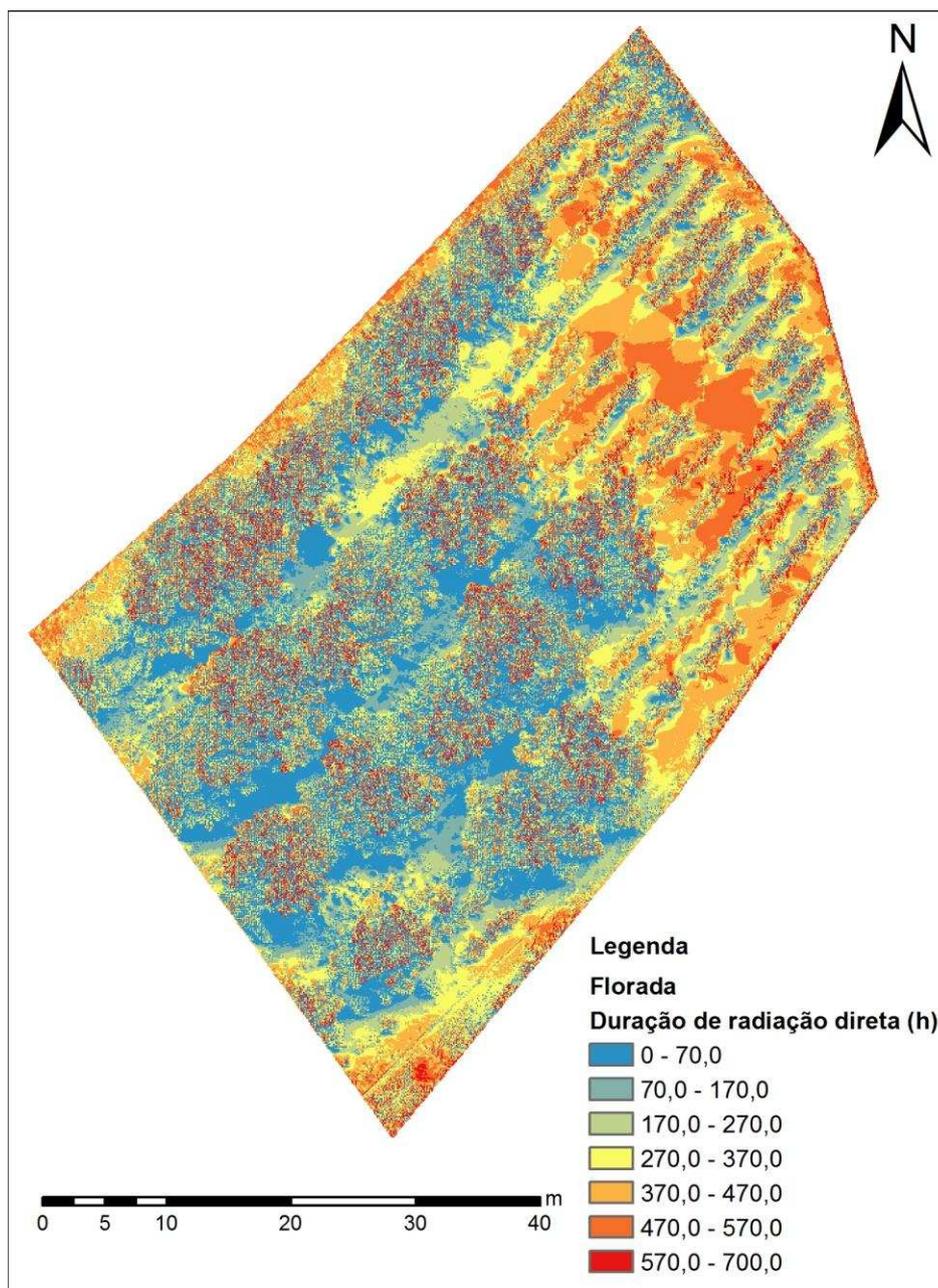


Figura 12 - Duração da radiação direta em horas durante o período da florada (01 de agosto a 30 de setembro).

A incidência de radiação direta é considerada a força motriz para elevação das temperaturas (Soares et al., 2015). Ao se tratar de cafeeiros, temperaturas elevadas no período da florada podem provocar o abortamento das flores (Camargo and Camargo, 2001; Morais et al., 2006). Já que a interceptação de 50% da radiação direta não altera o crescimento e desenvolvimento do fruto (Morais et al., 2009).

Avaliando especificamente esse mês a duração da radiação direta máxima foi inferior a 11,4 horas por dia, o que representa menor incidência de radiação ao longo do dia, podendo

proporcionar uma redução da temperatura. Valores de duração da radiação direta, mais elevado (9,3 até 11,4 horas por dia) foram identificados próximos aos cafeeiros no SPS. Em cafeeiros plantados no SAF com copas abertas foram observados valores de 7,7 horas por dia de radiação direta, embora onde as copas das eritrinas são mais fechadas a duração de radiação direta sobre os cafeeiros foi de 1,1 horas por dia.

Durante o período de expansão rápida do fruto (Figura 13), foram observados elevação na duração da radiação direta dentro do SAF. Em locais onde a copa é mais aberta valores de 9,0 horas por dia de radiação direta foram observados, enquanto que em áreas fechadas esse valor passou para 5,7 horas por dia. Na copa dos cafeeiros a pleno sol os valores de radiação foram de 12,90 horas.

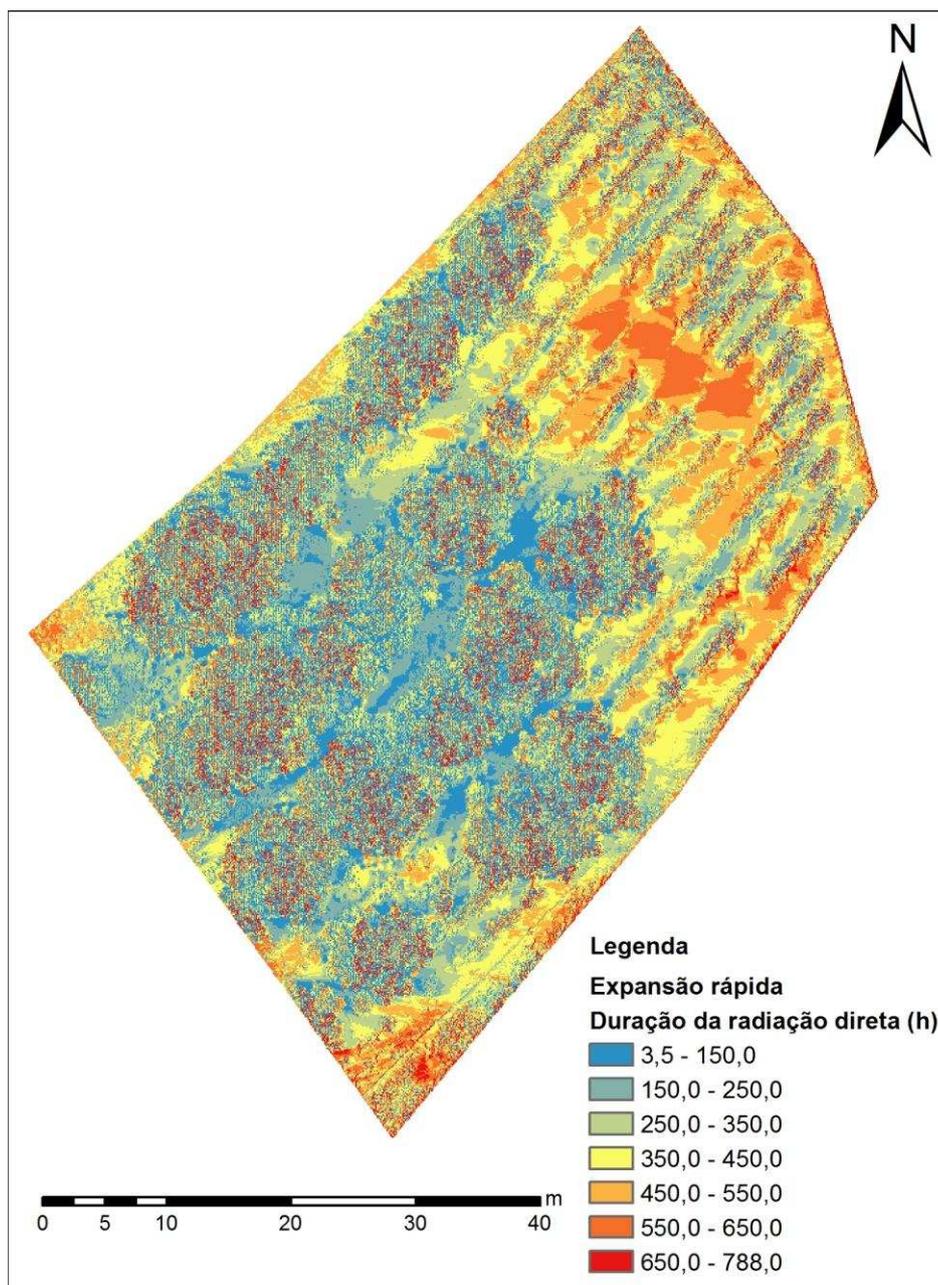


Figura 13 - Duração da radiação direta em horas durante a expansão rápida do fruto (01 de novembro a 31 de dezembro).

Foi simulada também a duração de radiação direta para o período de maturação dos grãos de café (Figura 14). Durante o período de dois meses (abril a junho de 2015) a duração foi em torno de 11,9 horas, para pontos nas copas das eritrinas e cafeeiros presentes no SPS. Nas áreas do SAF a duração não ultrapassou 6,6 horas por dia.

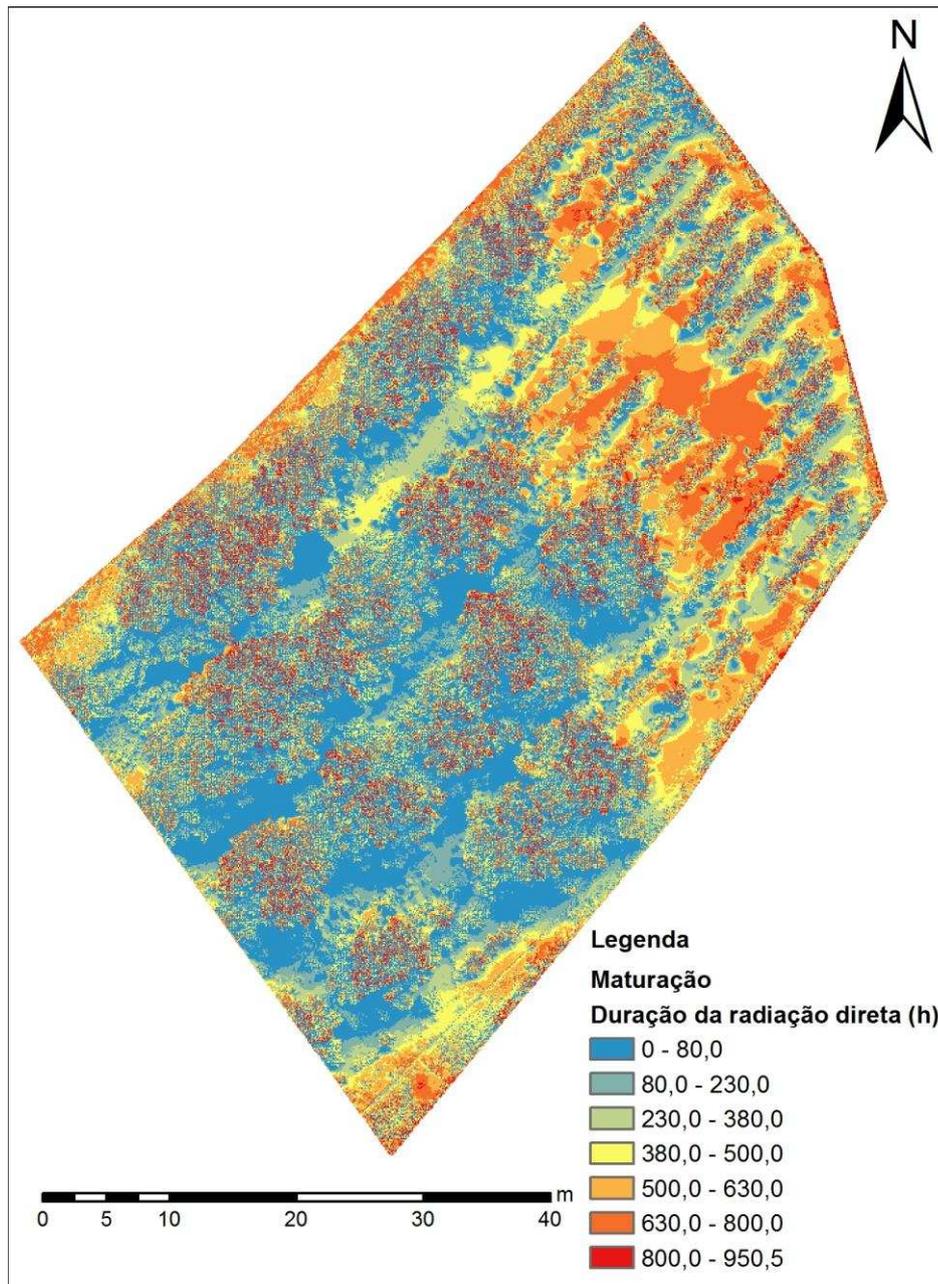


Figura 14 - Duração da radiação direta em horas durante o período de maturação dos grãos de café (01 de abril a 31 de junho).

Segundo Fagan et al. (2011) e Lunz (2006) a redução da incidência da radiação direta pode reduzir o estresse do cafeeiro em temperaturas do ar elevadas favorecendo a boa qualidade da bebida. Entretanto não só a temperatura como também o déficit hídrico estão associados ao período de maturação dos grãos (Camargo and Camargo, 2001; Fagan et al., 2011).

3.3 Modelo digital de sombra (MDSomb)

Para o modelo digital de sombra (MDSomb) as simulações foram realizadas para todas as hastes, que foram divididas em hastes abaixo da copa da eritrina, haste fora da copa da eritrina e hastes no SPS (Tabela 10).

Tabela 10 - Exatidão global e índice Kappa para predições realizadas nos sistemas

Hastes	Exatidão global	Índice Kappa
Todas as hastes	0,706	0,344
Dentro da área de projeção da copa	0,644	0,200
Fora da área de projeção da copa	0,821	0,607
SPS	0,875	0,674

Ao avaliar as hastes que estavam dentro da área de projeção da copa da eritrina o MDSomb apresentou índice Kappa inferior quando comparados aos resultados com hastes fora da projeção da copa. Comparando o índice Kappa das hastes no SPS (0,674), com hastes dentro do SAF fora da projeção da copa (0,607), a exatidão global e o índice Kappa foram praticamente similares. O modelo possui limitações quando as hastes estão sob a projeção da copa das eritrinas, já que a copa das árvores são projetadas ao solo encobrindo a haste que esteja dentro da área de sua projeção.

Avaliando as matrizes de confusão elaboradas (Tabela 11), a diagonal principal apresenta os acertos entre dados referência e dados preditos. Foi identificado que para todas as matrizes o maior erro ocorreu na simulação da sombra, se comparado à simulação da luz.

Tabela 11 - Matrizes de confusão elaboradas a partir dos dados observados nas hastes ao longo do período de avaliação (agosto a novembro de 2015)

		Todas as hastes		Fora da copa	
		Referência		Referência	
Predito		sombra	luz	sombra	luz
	sombra	30	18	14	2
luz	29	83	8	32	
		Dentro da copa		SPS	
		Referência		Referência	
Predito		sombra	luz	sombra	luz
	sombra	16	16	6	0
luz	21	51	4	22	

3.4 Porcentagem de sombreamento do sistema

Para a avaliação do sombreamento, as densidades populacionais de eritrina foram separadas em SAFa e SAFb. Foram encontrados variação de sombreamento dentro dos sistemas, e também ao longo das datas avaliadas (Tabela 12). Tal variabilidade de sombreamento vem da heterogeneidade das copas das eritrinas e a dominância por parte de alguns indivíduos tanto no SAFa quanto no SAFb.

Tabela 12 - Porcentagem de sombreamento medida em campo para diferentes distâncias e diferentes densidades de copas de eritrinas

Distância	Sombreamento (%)				Desvio Padrão	C.V. (%)
	31/08/2015	18/09/2015	23/09/2015	Média		
SAFa						
2,8 m	76,11	40,31	18,57	45,00	29,05	64,56
5,6 m	28,45	57,54	15,89	33,96	21,37	62,92
SAFb						
2,8 m	17,59	6,95	7,73	10,76	5,93	55,16
5,6 m	34,84	94,35	11,10	46,76	42,89	91,72

Alguns trabalhos que avaliaram o sombreamento em sistemas agroflorestais foram encontrados valores de sombra elevados e com grande variação dentro do sistema. Em cultivo de café com vinhático, valores de 93,3 e 37,5% foram identificados, em cultivo de café com abacateiro e ingazeiro o sombreamento foi de 82,3 e 89,5% (Coelho et al., 2010). Já Moreira (2015) encontrou valores de 51,8 e 47,4% de sombreamento em SAF de cafeeiros com macaúbas a 1,4 m, e 30,1% a 4,2 m.

Esses valores de sombreamento superaram os propostos para a fenologia do café sombreado em torno de 20 a 30% (DaMatta, 2004; Pinto Neto et al., 2014). Logo, o manejo de poda das copas pode ser uma alternativa para trazer maior uniformidade na incidência de radiação dentro do sistema.

3.5 Avaliações microclimáticas

Em janeiro de 2016 os valores de precipitação registrados no experimento e na estação meteorológica foram duas vezes o observado na normal climatológica para a cidade de Viçosa. Já em fevereiro de 2016 o valor observado na estação meteorológica foi duas vezes inferior a normal, enquanto o observado no experimento foi cinco vezes inferior. Essa variação pode estar relacionada à variabilidade espacial da chuva.

Pode-se observar na Figura 15 que a precipitação no período do experimento, no geral, teve comportamento próximo da Normal Climatológica, com a exceção dos meses de janeiro e fevereiro de 2016. Em janeiro de 2016 o total de precipitação correspondeu ao dobro da chuva esperada pela Normal Climatológica para o mês de janeiro, enquanto que em fevereiro de 2016 o total precipitado foi abaixo do esperado, chegando a uma redução de cerca de 43% na estação meteorológica de Viçosa e de 83% na região do experimento.

Para todo o período do experimento as temperaturas máximas medidas em Viçosa estiveram em média cerca de 1,7 °C acima da Normal Climatológica, com valores mais extremos nos meses de novembro e dezembro de 2015, cerca de 3,6 °C e 3,1 °C respectivamente. O mesmo ocorreu para as temperaturas máximas coletadas no experimento, porém com valores em média de 3,2 °C acima da Normal Climatológica, com destaque para os meses de novembro, dezembro de 2015 e abril de 2016 em que a temperatura foi 5,0 °C acima do esperado. O comportamento das temperaturas mínimas também foi acima da Normal Climatológica, cerca de 1 °C em Viçosa e 0,6 °C no local do experimento.

O comportamento dos elementos meteorológicos indica que no período do experimento houve condição atípica em termos de precipitação e temperaturas do ar máxima e mínima. O excesso de chuva verificado no mês de janeiro pode trazer impactos para a produtividade do café, já a escassez de chuva observada no mês de fevereiro pode ter tido um impacto menor para o café, pois veio antecedida de um período de bastante chuva, onde se espera que o solo esteja abastecido de água.

Em termos de temperaturas máxima e mínima, foi observado para todo o período do experimento valores acima do esperado (Normal Climatológica) o que não favorece o café, visto que o mesmo é bastante sensível a temperaturas altas podendo levar ao abortamento de flores (Camargo and Camargo, 2001).

A variação da temperatura do sistema altera diretamente a umidade relativa do ar (Soares et al., 2015). Tal fato possibilita ocorrer maior perda de umidade pelas plantas, devido ao processo de abertura e fechamento estomático (Marenco and Lopes, 2013). Entretanto, cafeeiros apresentam mecanismos que evitam a perda de água quando há elevadas temperaturas, com o fechamento dos estômatos, reduzindo sua transpiração (DaMatta, 2004).

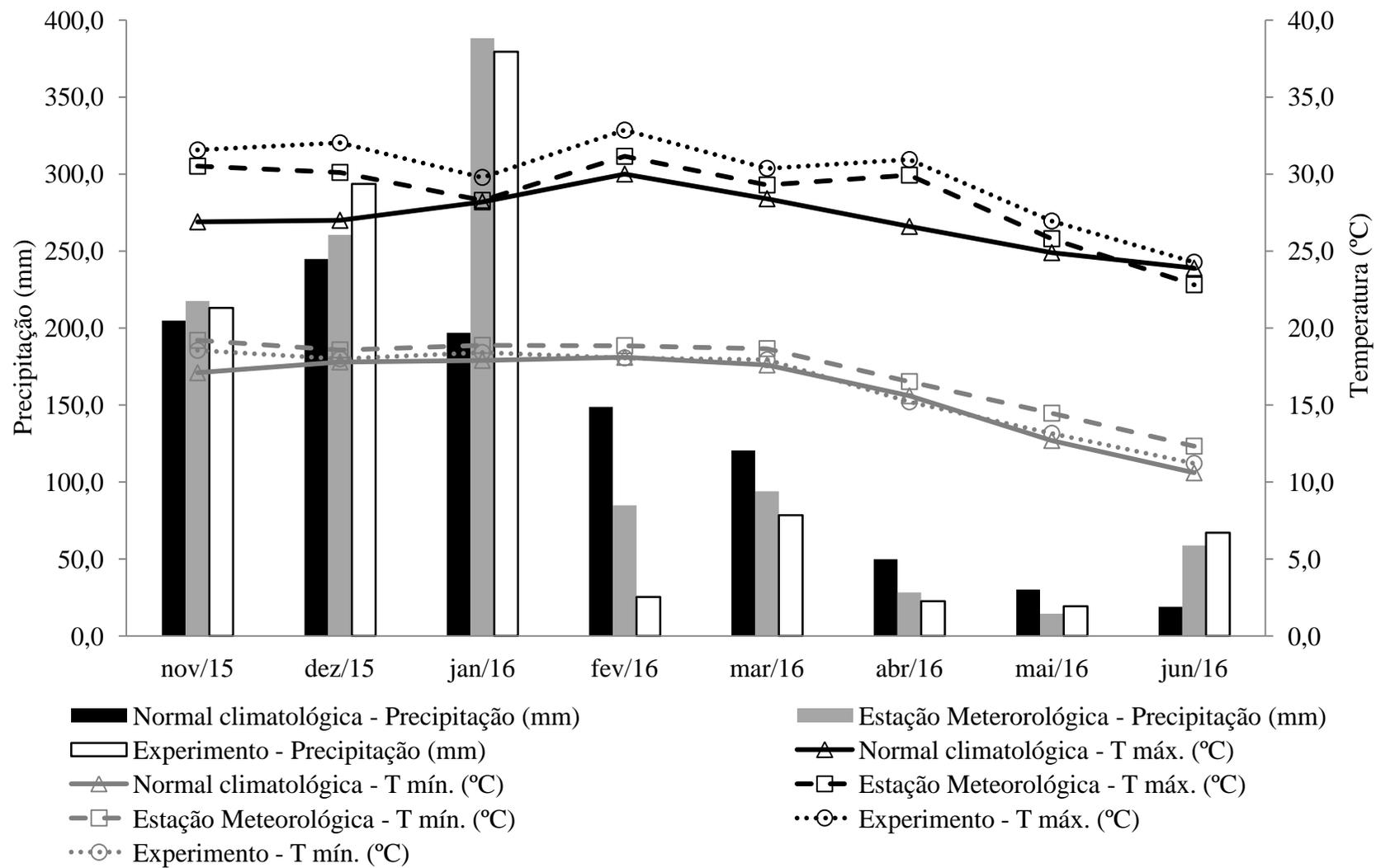


Figura 15 - Comparação de variáveis meteorológicas durante o período de investigação.

Na Figura 16 é possível observar a atenuação da temperatura do ar no SAF em quase todo período avaliado, os períodos foram separados em Figura 16A que antecede a florada e Figura 16B que corresponde ao início do processo de expansão do fruto. Foi possível identificar também menor intervalo de temperatura no SAF se comparado como SPS.

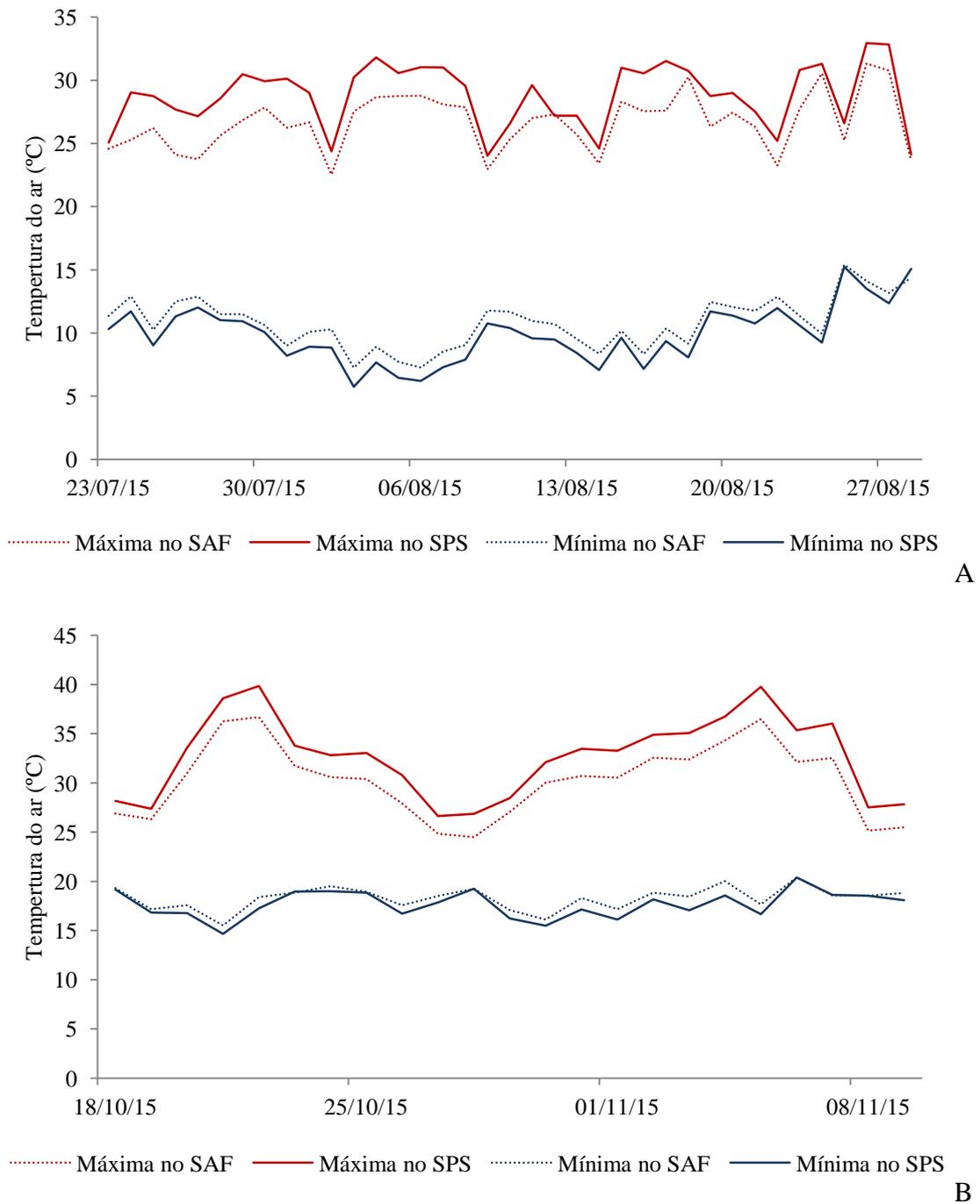


Figura 16 - Temperaturas do ar (°C) diárias: máximas (linhas vermelhas) e mínimas (linhas azuis) no SPS e SAF.

Redução de quase 3°C da temperatura máxima diária foi observada no SAF em relação ao SPS. Valores semelhantes foram observados por Valentini et al. (2010), em SAF de seringueira e coqueiro-anão.

Nos SAF ocorreu a elevação das temperaturas mínimas em quase todo período, sendo que essa diferença foi mais nítida no período do inverno (Figura 16B), chegando ao aumento de quase 1°C. Em outros SAF foram encontrados valores de elevação da temperatura do ar de quase 2°C no período do inverno (Valentini et al., 2010). Os baixos valores averiguados podem ser atribuídos à atenuação da radiação solar pela copa da árvore. A interceptação da energia solar nesse local faz com que menor quantidade de energia chegue aos estratos mais baixos do sistema, reduzindo o aquecimento nesses pontos e no referido período sazonal.

No período que compreende ao início da expansão do fruto (Figura 16 B) temperaturas mais elevadas foram encontradas no SPS (média de 32,7 °C) quando comparados ao SAF (média de 30,3 °C).

4 Conclusões

Foi possível obter o modelo digital de superfície (MDS) a partir da utilização de dados laser, sendo que o interpolador Maximum foi o que melhor representou a área.

Foi possível elaborar o modelo digital de radiação (MDRad) do SAF a partir dos dados gerados no MDS.

O modelo digital de radiação obteve adequada calibração, com R^2 de 0,957.

Dentro do SAF foi possível observar redução da duração de radiação direta, se comparado com o SPS. No solstício de inverno alguns pontos do SAF apresentaram duração da radiação direta inferior a 1,5 horas, já no solstício de verão para esses mesmos pontos foi superior a 4,5 horas.

O modelo digital de sombra prevê melhor a luz do que a sombra. Tal modelo não leva em consideração a sombra abaixo da copa das árvores.

Foi observado elevada variabilidade da sombra dentro dos SAF não distinguindo a diferença de densidade de plantio de eritrina.

No SAF as temperaturas máximas foram reduzidas, em média, em quase 2 °C, já as temperaturas mínimas foram elevadas em quase 1 °C ao compará-los com o SPS.

Houve redução da radiação e temperatura máxima no SAF, durante o período que corresponde ao início de expansão e maturação do cafeeiro.

Referências

- Alves, M.D.C., Sanches, L., Nogueira, J.D.S., Augusto, V., Silva, M., 2013. Effects of sky conditions measured by the clearness index on the estimation of solar radiation using a digital elevation model. *Atmos. Clim. Sci.* 618–626. doi:http://dx.doi.org/10.4236/acs.2013.34064
- Amaral, J.F.T. do, Martinez, H.E.P., Laviola, B.G., Tomaz, M.A., Fernandes Filho, E.I., Cruz, C.D., 2011. Produtividade e eficiência de uso de nutrientes por cultivares de cafeeiro. *Coffee Sci.* 6, 65–74. doi:10.1590/S0103-84782011005000027
- Bandara, K.R.M.U., Samarakoon, L., Shrestha, R.P., Kamiya, Y., 2011. Automated generation of digital terrain model using point clouds of digital surface model in forest area. *Remote Sens.* 3, 845–858. doi:10.3390/rs3050845
- Buck, A.L.B., Silva, M.N., Lingnau, C., Machado, Á.M.L., Martins Neto, R.P., 2014. Um algoritmo para filtragem do tronco em nuvem de pontos laser terrestre de árvores de *Pinus* spp. *Bol. Ciencias Geod.* 20, 806–829. doi:10.1590/S1982-21702014000400046
- Buck, A.L.B., Silva, M.N., Lingnau, C., Machado, Á.M.L., Martins Neto, R.P., Pescck, V.A., 2012. Avaliação da modelagem tridimensional do tronco de *Pinus elliottii* a partir de dados laser terrestre. *Ambiência* 8, 549–557. doi:10.5777/ambiencia.2012.04.09
- Camargo, Â.P. de, Camargo, M.B.P. de, 2001. Definição e Esquematização das Fases Fenológicas do Cafeeiro Arábica nas Condições Tropicais do Brasil. *Bragantia* 60, 65–68. doi:10.1590/S0006-87052001000100008
- Charbonnier, F., le Maire, G., Dreyer, E., Casanoves, F., Christina, M., Dauzat, J., Eitel, J.U.H., Vaast, P., Vierling, L.A., Roupsard, O., 2013. Competition for light in heterogeneous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system. *Agric. For. Meteorol.* 181, 152–169. doi:10.1016/j.agrformet.2013.07.010
- Coelho, R.A., Matsumoto, S.N., Lemos, C.L., Souza, F.A. De, 2010. Nível de sombreamento, umidade do solo e morfologia do cafeeiro em sistemas agroflorestais. *Rev. Ceres* 57, 95–102. doi:10.1590/S0034-737X2010000100016
- DaMatta, F.M., 2004. Fisiologia dos cafeeiros em sistemas arborizados, in: UESB (Ed.), *Arborização de Cafezais*. Matsumoto, Sylvana Naomi, Vitória da Conquista, p. 212.
- DaMatta, F.M., Ramalho, J.D.C., 2006. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: A review. *Brazilian J. Plant Physiol.* 18, 55–81. doi:10.1590/S1677-04202006000100006
- Duarte, E.M.G., Cardoso, I.M., Fávero, C., 2008. Terra Forte. *Agriculturas* 5, 11–15.
- Fagan, E.B., de Souza, C.H.E., Pereira, N.M.B., Machado, V.J., 2011. Efeito do tempo de formação do grão de café (*Coffea* sp.) na qualidade da bebida. *Biosci. J.* 27, 729–738.
- Figueiredo Filho, D.B., Silva Júnior, J.A., 2009. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). *Rev. Política Hoje* 18, 115–146.
- Fu, P., Rich, P.M., 1999. Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. 19th Annu. ESRI User Conf. 1–24.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Jaramillo-Botero, C., Martinez, H.E.P., Santos, R.H.S., 2006. Características do café (*Coffea arabica* L.) sombreado no norte da América Latina e no Brasil: análise comparativa. *Coffee Sci.* 1, 94–102.
- Kobayashi, E.S., 2007. Consumo de água e produtividade de cafeeiros arábica na região de Mococa, SP.
- Kuhn, M., Wing, J., Weston, S., Williams, A., Keefer, C., Engelhardt, A., 2012. Caret:

- Classification and Regression Training [WWW Document]. <https://Cran.R-Project.Org/Package=Caret>.
- Leal, A.C., Caramori, P.H., Androciol Filho, A., Pereira, J. da P., 2006. Consórcio agroflorestal café x seringueira em Londrina (PR): efeito na produtividade e na temperatura de folhas de café. *Iapar* 1, 2–6.
- Lin, B.B., 2007. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agric. For. Meteorol.* 144, 85–94. doi:10.1016/j.agrformet.2006.12.009
- López-Bravo, D.F., Virginio-Filho, E. de M., Avelino, J., 2012. Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions. *Crop Prot.* 38, 21–29. doi:10.1016/j.cropro.2012.03.011
- Lunz, A.M.P., 2006. Crescimento e produtividade do cafeeiro sombreado e a pleno sol. Universidade de São Paulo.
- Mancuso, M.A.C., Soratto, R.P., Perdoná, M.J., 2013. Produção de café sombreado. *Colloq. Agrar.* 9, 31–44. doi:10.5747/ca.2013.v09.n1.a087
- Marenco, R.A., Lopes, N.F., 2013. *Fisiologia Vegetal*. Editora UFV, Viçosa.
- Matheus, M.T., Lopes, J.C., 2000. Morfologia de frutos, sementes e plântulas e germinação de sementes de *Erythrina variegata* L. *Rev. Bras. Sementes* 22, 64–73.
- Morais, H., Caramori, P.H., De Arruda Ribeiro, A.M., Gomes, J.C., Koguish, M.S., 2006. Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 41, 763–770. doi:10.1590/S0100-204X2006000500007
- Morais, H., Caramori, P.H., Koguish, M.S., Gomes, J.C., Ribeiro, A.M.D.A., 2009. Sombreamento de cafeeiros durante o desenvolvimento das gemas florais e seus efeitos sobre a frutificação e produção. *Ciência Rural* 39, 400–406. doi:10.1590/S0103-84782009000200013
- Moreira, S.L.S., 2015. Produtividade, qualidade do solo e aspectos microclimáticos em sistema agroflorestal de cafeeiro e macaúba. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Muschler, R., 1999. *Arboles en cafetales*. Clección Módulos Enseñanza Agrofor.
- Nair, P.K.R., 1993. An introduction to agroforestry. doi:10.1016/0378-1127(95)90008-X
- Neupane, R.P., Thapa, G.B., 2001. Impact of agroforestry intervention on farm income under the subsistence farming system of the middle hills, Nepal. *Agrofor. Syst.* 53, 31–37. doi:10.1023/A:1012296803189
- Nicodemo, M.L.F., 2011. Dinâmica da água em sistemas agroflorestais 36.
- Pezzopane, J.E.M., Reis, G.G. dos, Reis, M. das G.F., Costa, J.M.N. da, Higuchi, P., 2000. Balanço de radiação no interior de uma floresta estacional semidecidual secundária no domínio da mata atlântica, in: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. pp. 200–206.
- Pezzopane, J.R.M., Pedro Júnior, M.J., Gallo, P.B., 2007. Balanço de energia em cultivo de café a pleno sol e consorciado com banana “Prata Anã”. *Rev. Bras. Agrometeorol.* 15, 169–177. doi:10.1590/S0006-87052005000300019
- Pezzopane, J.R.M., Pedro Júnior, M.J., Gallo, P.B., 2005. Radiação solar e saldo de radiação em cultivo de café a pleno sol e consorciado com banana “Prata Anã.” *Bragantia* 64, 485–497. doi:10.1590/S0006-87052005000300019
- Pinto Neto, J.N., Alvarenga, M.I.N., Corrêa, M. de P., de Oliveira, C.C., 2014. Efeito das variáveis ambientais na produção de café em um sistema agroflorestal. *Coffee Sci.* 9, 187–195.
- Righi, C.A., Bernardes, M.S., Lunz, A.M.P., Pereira, C.R., Camargo, F.T. De, 2011. Competição por água em um sistema agroflorestal de seringueira e cafeeiro 1–6.
- Salgado, B.G., Luiz, R., Macedo, G., Venturin, N., Carvalho, V.L. De, 2004. Produtividade de cafeeiros arborizados com ingazeiro e. *Agrossilvicultura* 1, 155–162.

- Soares, R.V., Batista, A.C., Tetto, A.F., 2015. Meteorologia e climatologia florestal. Curitiba.
- Valentini, L.S. de P., Camargo, M.B.P. de, Rolim, G. de S., Souza, P.S., Gallo, P.B., 2010. Temperatura do ar em sistemas de produção de café arábica em monocultivo e arborizados com seringueira e coqueiro-anão na região de Mococa, SP. *Bragantia* 69, 1005–1010. doi:10.1590/S0006-87052010000400028
- Varejão-Silva, M., 2000. Meteorologia e climatologia. Vasa 449.
- Willmott, C.J., Matsuura, K., 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Clim. Res.* 30, 79–82. doi:10.3354/cr030079

Capítulo 3

MOVIMENTO DE ÁGUA NO SOLO EM SISTEMA AGROFLORESTAL DE CAFÉ E ERITRINA

Resumo

O objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento da água nos sistemas sombreados (SAFa e SAFb) e a pleno sol (SPS), a condutividade hidráulica não saturada e identificar os períodos em que houve excesso ou déficit de umidade no solo, correlacionando com períodos fenológicos do cafeeiro. Para tanto, com auxílio de trado tipo Uhland foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo nas camadas 0,00 a 0,10 e 0,40 a 0,50 m de profundidade nos pontos onde foram também instalados sensores TDR (Time Domain Reflectometry) de umidade. Os sensores foram acoplados e operados por datalogger modelo CR 1000, Campbell Scientific, configurados para registro a cada hora. Posteriormente determinou-se a densidade do solo (Ds) e microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e macroporosidade (Ma). Com as amostras deformadas determinou-se densidade de partícula, análise de textura e análise química de rotina. Os dados de umidade foram calibrados através do método gravimétrico. Para avaliar o conteúdo de água disponível no solo, foi quantificado o número de dias em que a umidade avaliada foi superior à CC e inferior ao PMP ao longo dos meses. A avaliação da velocidade de infiltração da água no solo em momentos de chuva foi executada por sensores de umidade configurados para realização de leituras a cada 10 segundos. Posteriormente, foi calculada a condutividade hidráulica não saturada (CHns) em campo. Os resultados demonstram que o SAF foi o local onde se constatou maior fertilidade, evidenciados pelos maiores teores de P, Ca²⁺ e Mg²⁺. Os maiores valores de condutividade hidráulica não saturada foram observados no SAF e foi registrado déficit de água no SAF, não observado déficit no SPS. Em geral valores maiores de consumo de água foram identificados nos SAF quando comparados com os SPS.

Termos para indexação: umidade do solo; TDR; consumo de água; condutividade hidráulica não saturada.

1 Introdução

Os sistemas agroflorestais (SAF) são sistemas complexos, onde ocorrem diversas interações que podem modificar o regime hídrico no solo. Muito tem se falado na capacidade desses sistemas de manejo em apresentarem maior eficiência no uso da água (Neves et al., 2007) já que um sistema de manejo é mais eficiente quando as perdas por drenagem, evaporação ou escoamento superficial são reduzidas. Logo, no contexto de aquecimento global armazenar água e utilizá-la com eficiência é de suma importância (Nicodemo, 2011).

A água disponível no solo em forma de umidade é aspecto relevante na sobrevivência da espécie *Coffea arabica* L., especificamente nos períodos de granação do fruto, quando a falta de água no solo pode provocar seu chochamento (Camargo and Camargo, 2001; Kobayashi, 2007). Desta forma, deve-se levar em conta além da competição por sombreamento a disponibilidade de água no solo para as plantas.

DaMatta & Rodríguez (2007), afirmam que o sistema agroflorestal permite melhor eficiência de água, reduzindo a transpiração dos cultivares nesse sistema. No entanto, ao avaliar a perda de água Righi et al. (2008), relatam que as plantas sombreadas perdiam mais água do que as estabelecidas a pleno sol.

Várias são as influências das árvores sobre as plantas de café e é importante ressaltar que a utilização de árvores que possuem sistema radicular pouco profundo pode competir com o sistema radicular das plantas de café.

Ao avaliar cafeeiro em diferentes arranjos espaciais, Ronchi et al. (2015) verificaram maior quantidade de raiz na camada de 0,10 se comparado à camada de 0,40 m. Em sua maioria considerada como raízes finas, entretanto, modificações físicas e químicas do solo, além das condições locais podem interferir na estruturação do sistema radicular do cafeeiro (Franco and Inforzato, 1946).

Mudas de eritrinas produzidas por sementes podem alcançar maior profundidade das raízes se comparadas com mudas produzidas por estaquia. *Erythrina poeppigiana* avaliadas em cultivo de café sombreado na Costa Rica, apresentam densidade de comprimento de raízes finas em torno de $0,18 \text{ cm cm}^{-3}$, embora apresentem elevada variabilidade (Mora and Beer, 2013).

Alguns trabalhos referentes à distribuição lateral das raízes das plantas foram revisados por Nicodemo (2011), foi levantado que grevíleas conseguiam absorver água em um raio de 1,9 m do tronco. Tal grau de arranjo dos sistemas radiculares pode interferir na demanda hídrica desses sistemas, sendo essa outra dificuldade ao se estabelecer os sistemas

agroflorestais. Logo, uma vez conhecida à estrutura dos sistemas radiculares pode ser amenizada a competição por água nos diferentes estratos (Nicodemo, 2011).

Nesse contexto, objetivou-se com o presente trabalho:

1. Avaliar o comportamento da água nos sistemas sombreados (SAFa e SAFb) e a pleno sol (SPS);
2. avaliar a condutividade hidráulica não saturada;
3. identificar os períodos em que houve excesso ou déficit de umidade no solo, correlacionando com períodos fenológicos do cafeeiro.

2 Material e Métodos

A área experimental está localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa - UFV, no município de Viçosa, MG, com coordenadas geográficas: 20° 45' 23,28" S e 42° 50' 33,16" O; 20° 45' 22,75" S e 42° 50' 30,89" O; 20° 45' 22,82" S e 42° 50' 31,01" O; 20° 45' 21,91" S e 42° 50' 31,69" O, datum WGS84, e altitude média de 675 m. Nesta área há uma lavoura de 2.590 m² espaçados a 2,80 x 0,75 m, conduzido em sistema pleno sol (SPS) e consorciado com eritrina (*Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F.Cook).

Os cafeeiros foram plantados em novembro de 2007, já as eritrinas foram em março de 2008, estabelecendo assim, o sistema agroflorestal. No SAF, as eritrinas foram plantadas em linhas distantes 11,20 m, sendo que em cada linha, as eritrinas estão separadas por 2,80 m (maior densidade populacional), considerado como SAFa, ou 4,40 m (menor densidade populacional), considerado como SAFb. Existem quatro linhas de eritrina, sendo que em cada uma delas foram plantadas duas linhas de café espaçadas a 1,40 e 4,20 m acima e abaixo da linha de eritrina, totalizando dezesseis linhas de café e quatro linhas de eritrina.

Para o estudo foram selecionadas três áreas, duas no cultivo de eritrina (SAFa e SAFb) e outra no SPS. O solo das áreas apresentava estrutura em bloco subangular e foi classificado, segundo (EMBRAPA, 2013), como LATOSSOLO Vermelho Amarelo distrófico argissólico.

Desde a implantação do experimento, em novembro de 2007, todos os cafeeiros receberam tratamentos culturais semelhantes e fertilizantes químicos N P K, de formulação 20-5-20. O controle de plantas espontâneas foi periódico, com utilização de roçagem mecânica deixando os resíduos sobre o solo (Moreira, 2015).

Amostras indeformadas foram coletadas nas camadas 0,00 a 0,10 e 0,40 a 0,50 m de profundidade nos pontos onde foram instalados sensores de umidade. Para retirada das

amostras foi utilizado trado tipo Uhland, que foram posteriormente analisadas determinando a densidade do solo (Ds) e microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e macroporosidade (Ma). Amostras deformadas foram retiradas para densidade de partícula, análise de textura e análise química de rotina nas duas profundidades (0,00 a 0,10 e 0,40 a 0,50 m) (EMBRAPA, 2011).

2.1 Água no solo

A umidade do solo foi avaliada utilizando sensores TDR (Time Domain Reflectometry), com precisão $\pm 0,5\%$ de umidade volumétrica em solo seco e $\pm 1,5\%$ de umidade volumétrica em solo saturado, modelo CS 616, Campbell Scientific. Foram utilizados conjuntos de dois sensores, instalados na linha de café nas profundidades de 0,10 e 0,50 m em parede de trincheira cavada no solo e posteriormente preenchidas com solo retirado do mesmo local. Os sensores foram acoplados e operados por datalogger modelo CR 1000, Campbell Scientific, configurados para registro a cada hora.

Os dados de umidade aferidos em campo foram calibrados através do método gravimétrico (Campbell Scientific, 2015; Foltran et al., 2009; Mittelbach et al., 2012; Yeoh et al., 2008). Com auxílio do software R (R Development Core Team, 2011) foram elaboradas regressões lineares dos pares de dados e obtidos as equações de calibração e coeficientes de determinação corrigido (R^2).

Para elaboração da curva característica de retenção de água no solo foi tomado como base a tensão de -10 kPa para capacidade de campo (CC), já para ponto de murcha permanente (PMP) tensão de -1500 kPa, (Richards et al., 1954). Curvas de retenção de água no solo foram elaboradas seguindo a equação proposta por Van Genuchten (1980), por meio do software SWRC (Dourado-Neto et al., 2000).

Para avaliar o conteúdo de água disponível no solo, foi quantificado o número de dias em que a umidade avaliada foi superior à CC e inferior ao PMP ao longo dos meses. Esses dados foram relacionados com os períodos fenológicos dos cafeeiros.

2.2 Avaliação da condutividade hidráulica não saturada

A fim de avaliar a velocidade de infiltração da água no solo em momentos de chuva, os sensores de umidade foram configurados para realização de leituras a cada 10 segundos.

Posteriormente, foi calculada a condutividade hidráulica não saturada (CHns) em campo. Para isso foi utilizada a seguinte fórmula:

$$CHns = \frac{d}{t} \quad (6)$$

CHns é a condutividade hidráulica não saturada; d a distância entre os dois sensores e t o tempo necessário para frente de molhamento percorrer a distância entre os dois sensores (0,40 m).

Para a o estudo da secagem do solo, foi escolhido o período de 21 à 24/12/2015, devido ao fato de ter havido chuva em data próxima (11/12/2015). Para o cálculo do consumo de água no solo foram selecionados dois períodos: maior consumo (6:00 às 14:00 horas) e de menor consumo de água (14:00 às 6:00 horas). Para calcular o consumo foi feita a subtração da umidade no início do período com a umidade no final do período, conforme mostrado na formula abaixo.

$$\text{consumo} = u_0 - u \quad (7)$$

u_0 representa o valor da umidade no início do período e u a umidade no final do período.

3 Resultados e Discussão

De acordo com os dados (Tabela 13) não foi identificado gradiente textural entre as profundidades de 0,10 e 0,50 m, porém observou-se grande quantidade de areia nas camadas superficiais, especialmente nos SPS e SAFa (Tabela 13). A quantidade da fração areia pode estar associada ao fato de que a área em estudo grada entre Argissolo e Latossolo. Porém não apresentou gradiente textural suficiente para ser classificado com B textural e por exclusão foi classificado como B Latossólico. A presença de areia permite a drenagem livre da água por possuírem grande espaço poroso.

Os Latossolos apresentam microagregados de alta estabilidade, que lhe conferem propriedades físicas semelhantes a solos arenosos em termos de porosidade e drenagem (Donagemma et al., 2003). As argilas são capazes de absorver relativamente grande quantidade de água e os microporos são capazes de retê-la contra a força da gravidade (Carter, 1991; Freire et al., 2003).

Os valores de macro e microporosidade em que no ponto 3 do SAFa, na profundidade de 0,50 m há uma grande quantidade de microporos (Figura 17). De maneira

geral os valores de microporos foi maior em todos os pontos avaliados relacionadas à textura mais argilosa do solo. Os macroporos tem mais influência na drenagem direta da água enquanto os microporos desempenham a função de manutenção da umidade do solo.

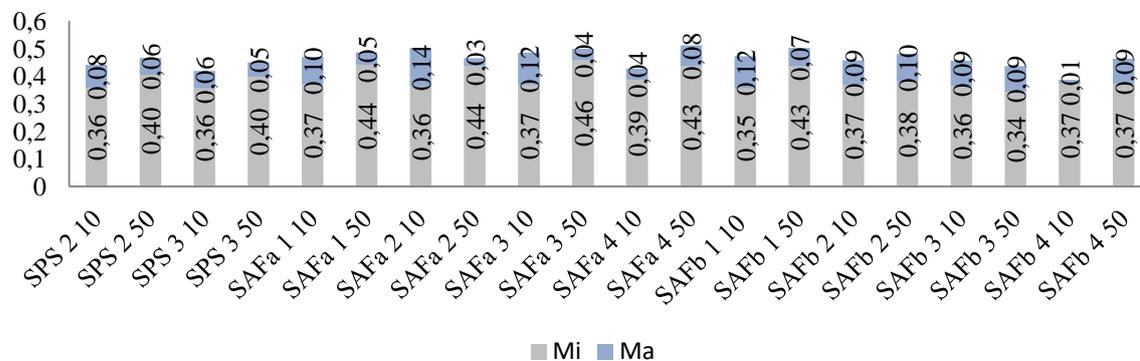


Figura 17 - Porosidade total, macroporosidade e microporosidade ($m^3 m^{-3}$) dos pontos onde foram instalados os sensores de umidade.

Carvalho et al. (2004) esclarece que em SAF devido ao maior agregação do solo em função da maior presença de organismos e maiores teores de matéria orgânica a porosidade nesses solos é maior que em solos manejados de maneira convencional. Segundo Pezarico et al. (2013) os SAF em geral apresentam os índices de qualidade do solo mais próximos à área de vegetação nativa (Mata) e isto é importante por se desejar solos menos perturbados e mais estáveis do ponto de vista químico, físico e biológico.

Tabela 13 - Análise textural, densidade do solo e partícula de amostras de solos retiradas na área experimental

Ponto	Profundidade (m)	Areia			Silte	Argila	Densidade	
		Grossa	Fina				Solo	Partícula
		----- kg kg ⁻¹ -----			---- kg dm ⁻³ ----			
Sistema a Pleno Sol (SPS)								
2	0,10	0,25	0,18	0,07	0,50	1,45	2,83	
2	0,50	0,17	0,13	0,07	0,63	1,40	2,65	
3	0,10	0,29	0,22	0,07	0,42	1,51	2,87	
3	0,50	0,19	0,14	0,06	0,60	1,40	2,57	
Sistema Agroflorestal a (SAFa)								
1	0,10	0,27	0,17	0,12	0,43	1,50	2,82	
1	0,50	0,19	0,11	0,11	0,60	1,37	2,83	
2	0,10	0,28	0,18	0,12	0,43	1,43	2,54	
2	0,50	0,18	0,12	0,14	0,56	1,38	2,64	
3	0,10	0,31	0,17	0,12	0,40	1,45	2,63	
3	0,50	0,17	0,13	0,13	0,57	1,42	2,57	
4	0,10	0,22	0,16	0,15	0,46	1,46	2,70	
4	0,50	0,15	0,12	0,14	0,59	1,29	2,71	
Sistema Agroflorestal b (SAFb)								
1	0,10	0,29	0,17	0,12	0,42	1,39	2,60	
1	0,50	0,15	0,09	0,13	0,64	1,32	2,49	
2	0,10	0,29	0,17	0,12	0,43	1,43	2,40	
2	0,50	0,26	0,16	0,13	0,45	1,41	2,56	
3	0,10	0,29	0,17	0,12	0,42	1,42	2,60	
3	0,50	0,26	0,16	0,13	0,46	1,41	2,62	
4	0,10	0,28	0,16	0,12	0,44	1,47	2,60	
4	0,50	0,28	0,13	0,06	0,53	1,38	2,54	

A Tabela 14 é apresentado os valores da análise química do solo coletados nos pontos de instalação dos sensores TDR. Pelos valores apresentados observa-se que, a camada superficial do SAF apresentou maiores concentrações dos nutrientes P, Ca²⁺, e Mg²⁺, quando comparados ao SPS. Apresentou também valores elevados de matéria orgânica e maior Capacidade de Troca Catiônica (CTC). Esse comportamento pode ser associado à grande quantidade de matéria seca (grande volume de galhos, folhas, sementes e flores) depositada pelas árvores de eritrina. O processo de decomposição e ciclagem da matéria, mineraliza esses nutrientes tornando-os disponíveis na solução de solo. Estudos desenvolvidos por Toma et al. (2013) constataram que o SAF avaliado no período de abril de 2009 a janeiro de 2011 apresentou altos valores de matéria orgânica em avaliação feita na profundidade de 0,0 a 0,20 m. Os autores ressaltaram que os altos valores de matéria orgânica encontrados proporcionam

ao solo menor densidade e elevados valores de porosidade, incorrendo em maior condutividade de água no solo.

Os valores de CTC observados no SAF também foram maiores do que os apresentados pelo SPS. Segundo Barreto et al. (2006), os elevados teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} contribuem para o aumento da CTC. Iwata et al. (2012) relatam que a característica de SAF apresentarem solos mais eficientes nas reações de troca de cargas (CTC) deve-se à atuação das raízes das árvores durante o processo de ciclagem de nutrientes.

Menores teores de alumínio trocável foram observados nas amostras avaliadas no SAF. Resultados semelhantes foram encontrados por Campanha et al. (2007), em que nas avaliações de café sob SAF ocorreu redução do alumínio solúvel no solo, pelos valores baixos de acidez trocável (Al^{3+}) e índice de saturação de alumínio (m) encontrados nesse SAF.

O aporte de serapilheira é importante no incremento da matéria orgânica do solo em SAF (Paula et al., 2015), na manutenção da ciclagem de nutrientes (Alves et al., 2014), da umidade do solo e da mesofauna edáfica (Vilela and Mendonça, 2013). A mesofauna tem sua principal função na degradação da matéria orgânica e em alguns estudos, o controle da população de microrganismos (Höfer et al., 2001).

Em trabalho desenvolvido por Vilela and Mendonça (2013) em modelos de simulação ambiental para compreensão do comportamento da matéria orgânica do solo em SAF, foi constatado que o sistema agroflorestal não foi capaz de recuperar os estoques de C e N do solo por meio da matéria orgânica do solo (MOS). Os autores evidenciam as variações da dinâmica inerentes à MOS em sistemas de cultivo e áreas de recuperação. No entanto, há experiências em que o aporte desse material favorece o aporte de nutrientes e a vida no solo relacionada à mesofauna edáfica.

Tabela 14 - Análise química de cada ponto onde foram instalados os sensores TDR

Ponto	Sistema	Profundidade (m)	pH H ₂ O	P ---mg dm ⁻³ ---	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	t	T	V -----%-----	m	MO dag kg ⁻¹	P-Rem mg L ⁻¹
				-----cmol dm ⁻³ -----												
2	Pleno Sol (SPS)	0,10	5,05	0,70	81,00	0,83	0,23	0,30	3,00	1,27	1,57	4,27	29,70	19,10	1,03	24,60
2		0,50	5,37	0,10	10,00	1,19	0,36	0,00	2,10	1,58	1,58	3,68	42,90	0,00	0,65	17,20
3		0,10	5,39	5,30	116,00	1,10	0,42	0,20	4,60	1,82	2,02	6,42	28,30	9,90	1,81	30,80
3		0,50	5,06	0,40	29,00	0,91	0,32	0,10	2,80	1,30	1,40	4,10	31,70	7,10	0,78	19,00
1	Agroflorestal a (SAFa)	0,10	5,08	2,30	67,00	1,74	0,68	0,00	4,00	2,59	2,59	6,59	39,30	0,00	2,07	30,30
1		0,50	5,11	0,60	13,00	1,20	0,44	0,00	2,80	1,67	1,67	4,47	37,40	0,00	0,90	14,70
2		0,10	5,18	1,00	73,00	1,22	0,40	0,10	3,50	1,81	1,91	5,31	34,10	5,20	1,68	26,60
2		0,50	5,37	0,30	14,00	1,43	0,45	0,00	2,60	1,92	1,92	4,52	42,50	0,00	0,90	16,70
3		0,10	5,19	1,90	51,00	1,76	0,62	0,10	3,80	2,51	2,61	6,31	39,80	3,80	2,07	29,90
3		0,50	5,22	0,30	16,00	1,62	0,62	0,00	2,30	2,28	2,28	4,58	49,80	0,00	1,16	21,00
4		0,10	6,08	2,60	81,00	2,15	0,81	0,00	2,30	3,17	3,17	5,47	58,00	0,00	2,07	34,90
4		0,50	5,74	0,30	18,00	1,69	0,63	0,00	2,00	2,37	2,37	4,37	54,20	0,00	1,03	18,00
1	Agroflorestal b (SAFb)	0,10	5,59	1,50	51,00	1,48	0,65	0,10	4,50	2,26	2,36	6,76	33,40	4,20	2,45	33,20
1		0,50	5,61	0,20	8,00	1,46	0,41	0,00	2,00	1,89	1,89	3,89	48,60	0,00	1,03	18,80
2		0,10	5,15	5,50	64,00	1,63	0,54	0,20	4,30	2,33	2,53	6,63	35,10	7,90	2,84	37,40
2		0,50	5,25	0,40	29,00	1,10	0,36	0,00	2,30	1,53	1,53	3,83	39,90	0,00	1,42	29,10
3		0,10	4,95	1,40	24,00	1,18	0,49	0,30	4,80	1,73	2,03	6,53	26,50	14,80	2,97	31,20
3		0,50	5,09	0,50	11,00	1,00	0,27	0,30	3,10	1,30	1,60	4,40	29,50	18,70	0,90	26,20
4		0,10	5,37	1,40	68,00	1,56	0,57	0,10	4,50	2,30	2,40	6,80	33,80	4,20	2,07	31,20
4		0,50	5,20	0,10	13,00	1,34	0,44	0,00	2,30	1,81	1,81	4,11	44,00	0,00	0,78	23,50

pH: Potencial Hidrogeniônico; P: Fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Al: Alumínio; H+Al: Acidez Potencial; SB: Soma de Bases; t: Capacidade de Troca de Cátions Efetiva; T: Capacidade de Troca de Cátions a pH 7,0; V: Percentagem por Saturação de Bases; m: Saturação por Alumínio; MO: Matéria Orgânica; P-Rem: Fósforo Remanescente.

3.1 Água no solo

Foi realizada a calibração dos sensores TDR, ajustando curvas de regressão linear para os sensores instalados a pleno sol (SPS) e no sistema sombreado (SAF). O coeficiente de determinação (R^2) das equações foram de 98% para os solos a 10 cm de profundidade 99% para solos a 50 cm, indicando que a calibração foi eficiente (Figura 18).

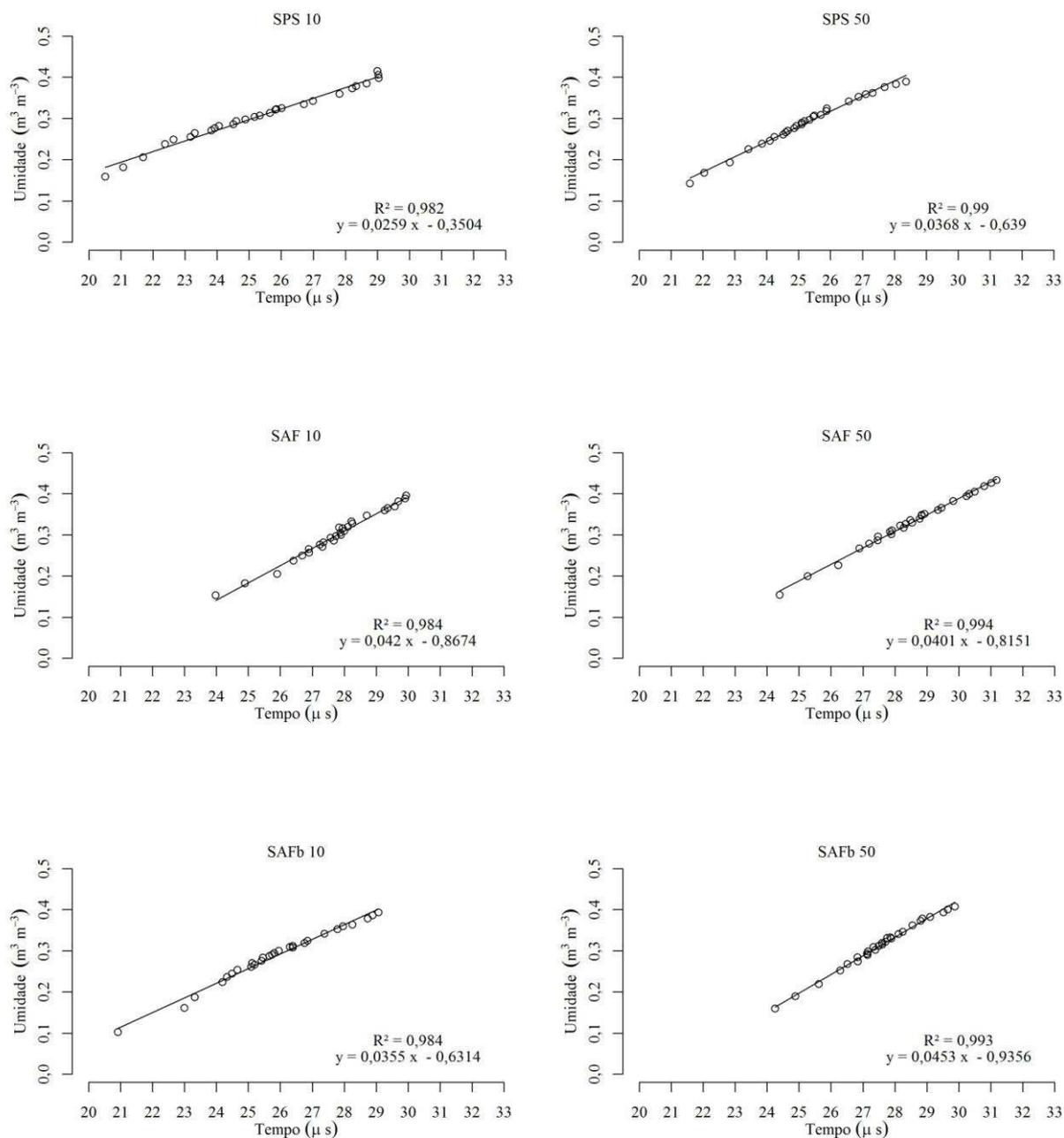


Figura 18 - Calibração dos sensores utilizando solo de diferentes manejos e diferentes profundidades.

Foltran et al., (2009) ao realizarem a calibração de TDR utilizou também solo em diferentes profundidades, encontrando diferenças das equações para cada profundidade. Tal fato pode ser considerado devido à variação do teor de argila em cada profundidade. Foram encontrados valores de incremento de argila em torno de 0,15 kg kg⁻¹.

Na Tabela 15, de modo geral os valores de Capacidade de Campo (CC) e Ponto de Murcha Permanente (PMP) foram semelhantes. Os valores de CC e PMP na camada de 0 a 0,10 m são ligeiramente maiores nos SAF do que no SPS. Na profundidade de 0,50 m o SAFa e b apresentaram comportamentos diferentes e ambos de modo geral diferem do SPS tanto para CC quanto para PMP. Para os pontos 2, 3 e 4, dentro do SAFb a capacidade de campo apresentou valores semelhantes nas camadas de 0,10 m e 0,50 m de profundidade, relacionado a semelhança nos teores de argila, silte e areia desses pontos.

Tabela 15 - Capacidade de Campo (m³ m⁻³) e Ponto de Murcha Permanente (m³ m⁻³) dos pontos onde foram instalados sensores de umidade TDR

	Tensão (KPa)	SPS 2	SPS 3	SAFa 1	SAFa 2	SAFa 3	SAFa 4	SAFb 1	SAFb 2	SAFb 3	SAFb 4
		----- Profundidade 0,10 m -----									
CC	-10	0,347	0,350	0,368	0,354	0,372	0,383	0,336	0,358	0,354	0,355
PMP	-1500	0,169	0,169	0,173	0,184	0,180	0,187	0,169	0,186	0,183	0,139
		----- Profundidade 0,50 m -----									
CC	-10	0,404	0,404	0,444	0,459	0,451	0,441	0,438	0,385	0,343	0,357
PMP	-1500	0,249	0,260	0,257	0,285	0,294	0,267	0,296	0,224	0,203	0,211

Foram encontrados valores de umidade do solo acima da CC (excesso) e abaixo do PMP (déficit). Apenas houve déficit de umidade no solo nos pontos SAFa 2 10 e SAFa 1 50, para outros pontos não houve déficit durante avaliação (Figura 19). No ponto SAFa 2 10, durante todo mês de outubro de 2015 a umidade esteve abaixo do PMP. Isso pode significar maior consumo nesse ponto.

No SPS não houve déficit podendo indicar menor consumo no sistema, possivelmente porque não existe o componente arbóreo na área. Durante os períodos de janeiro a março de 2016, meses que coincidem com o enchimento do grão de café, não houve déficit nos pontos avaliados para os três sistemas.

O comportamento dos elementos meteorológicos indica que no período do experimento ocorreu condição de variação ambiental em termos de precipitação e temperaturas máxima e mínima.

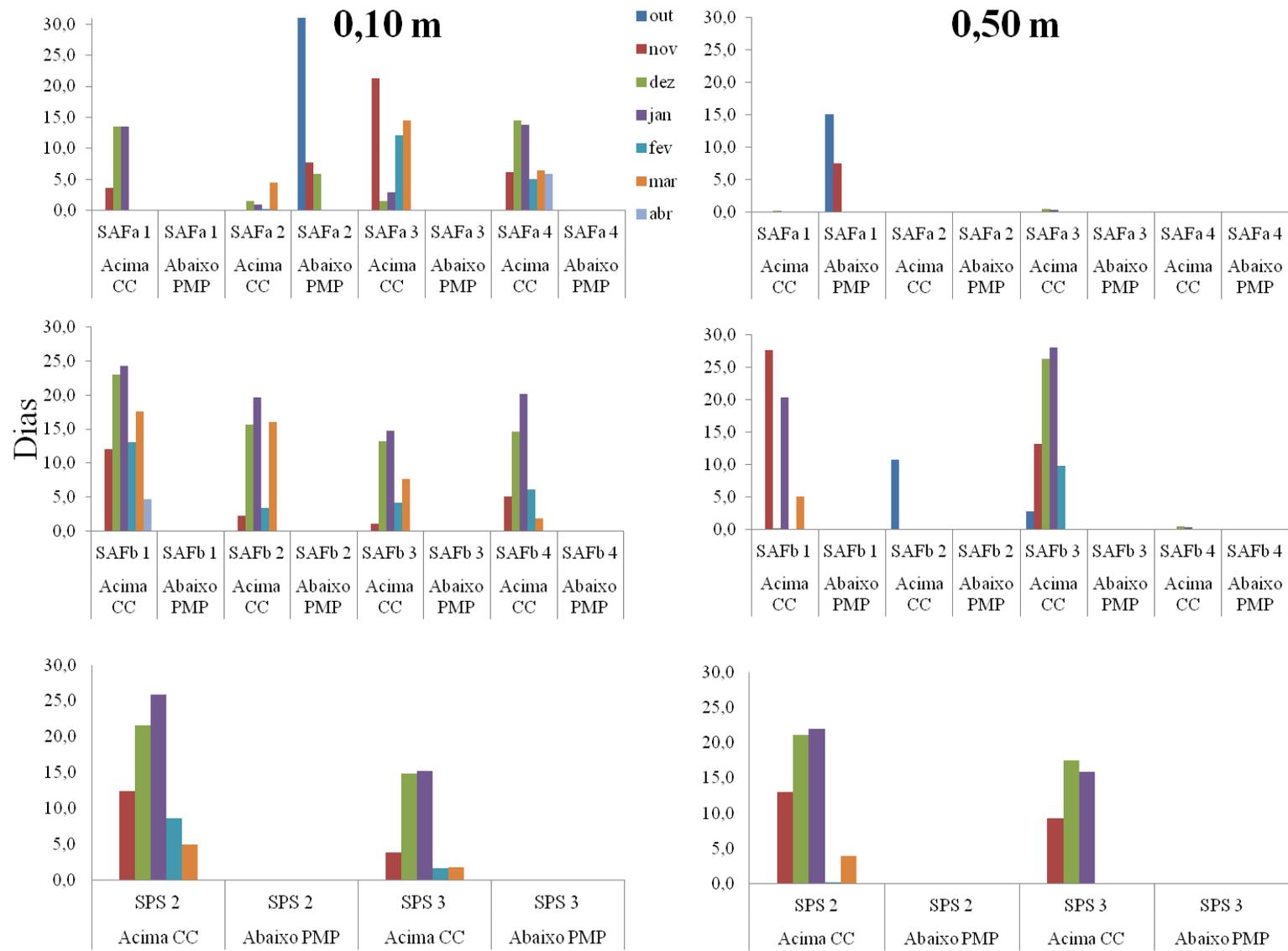


Figura 19 - Dias de déficit e excesso hídrico nos três sistemas de cultivos de café, SAFa, SAFb e SPS em Viçosa-MG.

3.2 Avaliação da condutividade hidráulica não saturada

Grande variabilidade foi encontrada para valores de condutividade hidráulica não saturada (Tabela 16). Volumes de chuvas semelhantes em 19/11/2015, 10/12/2015 e 16/01/2016, resultaram em valores de condutividade até doze vezes maior como é o caso do ponto SPS 2. Entretanto os pontos no SPS apresentaram variabilidade menor se comparados com os valores do SAFa e SAFb. Tal fato pode ser explicado devido à interceptação de água nas copas das árvores (Carvalho, 2011). Como os valores de precipitação efetiva variam para cada uso e manejo do solo, compará-los pode ser mais complexo. Pontos mais distantes das copas das árvores (SAFa 1 e 4) obtiveram valores semelhantes aos identificados no SPS.

Tabela 16 - Condutividade hidráulica não saturada para pontos onde foram instalados sensores TDR

Data	Condutividade hidráulica não saturada (cm h ⁻¹)								
	17/11/15	19/11/15	07/12/15	10/12/15	11/12/15	03/01/16	12/01/16	16/01/16	21/01/16
Precipitação (mm)	75,7	32,3	67,1	30,2	46,2	46,7	100,1	36,1	79,8
SPS 2	30,9	145,5	102,1	334,9	134,6	14,4	19,5	27,1	82,8
SPS 3	30,7	135,8	122,0	202,8	36,5	14,1	15,1	71,3	41,7
SAFa 1	22,3	93,5	105,1	192,0	37,5	13,8	13,8	29,6	37,2
SAFa 2	36,3	107,5	109,1	197,3	37,7	13,0	13,2	37,8	53,1
SAFa 3	139,8	141,2	175,6	576,0	847,1	16,2	13,2	24,7	88,9
SAFa 4	38,0	121,0	126,3	197,3	54,3	14,0	73,8	113,4	71,6
SAFb 1	389,2	351,2	118,0	86,7	197,3	119,0	15,0	30,6	202,8
SAFb 2	31,8	128,6	84,7	119,0	31,8	9,6	13,6	27,4	42,6
SAFb 3	130,7	135,8	123,1	369,2	232,3	120,0	13,0	14,2	100,7
SAFb 4	39,9	104,3	104,3	130,9	60,8	81,8	14,5	28,7	43,9

Foram encontrados maiores valores de condutividade hidráulica nos pontos do SAF se comparado com o SPS. Valores de infiltração mais elevados também foram verificados por Cannavo et al. (2011) ao avaliar associação de café com Ingá na Costa Rica.

A relação microrganismos e estrutura do solo é uma relação direta, visto que a decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos influencia na conformação dos agregados do solo, no acúmulo de C pelo solo.

Em estudo desenvolvido por Costa et al. (2016) os microrganismos que se desenvolvem nos solos sofrem influência da porosidade intra e inter agregados. O estudo constatou maior porosidade inter agregados do que intra agregados.

Freitas et al. (2016) avaliando os impactos do uso do solo nos estoques de carbono do solo constataram que o SAF gerou maior volume de serapilheira e estocou maior volume de carbono no solo em período seco. Os autores ressaltam que o fator recalcitrância também mais elevados.

Estudo desenvolvido por Linhares et al. (2016) na Amazônia constatou os maiores valores de carbono no solo de 21,02 Mg C ha⁻¹ e 18,86 Mg C ha⁻¹ na camada avaliada de 0 a 0,1 m. Os autores relatam que SAF com maior tempo de implantação aumentam o acúmulo de C no solo.

Avaliando os sistemas com eritrinas (SAF), para períodos diários de maior consumo, foram encontrados maiores valores de consumo de água nos pontos SAFb 1 e 2 à 0,10 m. Valores de quase 5,00 L m⁻³ a mais se comparado com o SPS, entretanto valores de consumo menores também foram observados um exemplo é o ponto SAFb 3 (Tabela 17). Avaliando as camadas mais profundas foi identificado valores de consumo superiores apenas no ponto SAFa 3 se comparados com o SPS.

Este maior consumo pode ser atribuído à presença de árvores no sistema. Nicodemo (2011) afirma que estudos quanto à distribuição horizontal da raiz em SAF devem ser realizados para entender as consequências práticas desse sistema. Uma hipótese para os SAF quanto à estruturação da raiz é que os sistemas radiculares ocorreram em diferentes estratos dos solos para as diferentes espécies utilizadas. Canto and Schneider (2004); Oliveira (2001) relatam que espécies arbóreas possuem raízes do tipo pivotantes responsáveis por dar sustentação às árvores. Estes mesmos autores afirmam que esse tipo de raiz não interfere no consumo de água. Já que as raízes finas ficam na função de absorver os nutrientes e água da solução de solo.

O sistema radicular da eritrina é pivotante possuindo raízes terciárias e secundárias (Oliveira, 2001). No trabalho realizado por Alpizar et al. (1986) foi encontrado que 66% da biomassa da raiz de eritrina com cinco anos de idade possui diâmetro menor que 5 mm.

Ao avaliar o período de menor consumo (Tabela 18) foi observado em alguns casos incremento de umidade no ponto do SAFb 2. Entretanto tal incremento pode representar variação da leitura do sensor, já que está bem próximo ao seu erro de leitura do equipamento de $\pm 0,5\%$ de umidade volumétrica.

Tabela 17 - Períodos diários de maior consumo (6:00 às 14:00) em três dias de avaliação de secagem do solo

Ponto	Profundidade (m)	Umidade do solo		Consumo (L m ⁻³)	Umidade do solo		Consumo (L m ⁻³)	Umidade do solo		Consumo (L m ⁻³)
		Inicial (U ₀)	Final (U)	21/12/2015	Inicial (U ₀)	Final (U)	22/12/2015	Inicial (U ₀)	Final (U)	23/12/2015
SPS 2	0,10	0,3476	0,3424	5,20	0,3408	0,3356	5,20	0,3328	0,3270	5,80
SPS 3	0,10	0,3005	0,2927	7,80	0,2922	0,2867	5,50	0,2857	0,2818	3,90
SAFa 1	0,10	0,3197	0,3140	5,70	0,3107	0,3054	5,30	0,3015	0,2960	5,50
SAFa 2	0,10	0,2133	0,2053	8,00	0,2049	0,1986	6,30	0,1973	0,1914	5,90
SAFa 3	0,10	0,3330	0,3263	6,70	0,3227	0,3173	5,40	0,314	0,3086	5,40
SAFa 4	0,10	0,3141	0,3082	5,90	0,3082	0,3031	5,10	0,3029	0,2985	4,40
SAFb 1	0,10	0,3573	0,3473	10,00	0,3454	0,3364	9,00	0,3346	0,3270	7,60
SAFb 2	0,10	0,3076	0,2994	8,20	0,2973	0,2898	7,50	0,2884	0,2820	6,40
SAFb 3	0,10	0,2781	0,2742	3,90	0,2735	0,2699	3,60	0,2696	0,2668	2,80
SAFb 4	0,10	0,3199	0,3129	7,00	0,3122	0,3057	6,50	0,3049	0,2986	6,30
SPS 2	0,50	0,4046	0,4021	2,50	0,4016	0,398	3,60	0,3973	0,3936	3,70
SPS 3	0,50	0,3910	0,3869	4,10	0,3866	0,3824	4,20	0,3818	0,3769	4,90
SAFa 1	0,50	0,3278	0,3263	1,50	0,3249	0,3233	1,60	0,3221	0,3205	1,60
SAFa 2	0,50	0,3961	0,3936	2,50	0,3926	0,3903	2,30	0,3890	0,3859	3,10
SAFa 3	0,50	0,3955	0,391	4,50	0,3910	0,3860	5,00	0,3854	0,3807	4,70
SAFa 4	0,50	0,3843	0,3815	2,80	0,3803	0,3775	2,80	0,3759	0,3726	3,30
SAFb 1	0,50	0,4337	0,4302	3,50	0,4302	0,4266	3,60	0,4266	0,4226	4,00
SAFb 2	0,50	0,4351	0,4329	2,20	0,4334	0,4302	3,20	0,4294	0,4268	2,60
SAFb 3	0,50	0,3650	0,3613	3,70	0,3604	0,3564	4,00	0,3555	0,3524	3,10
SAFb 4	0,50	0,4254	0,4234	2,00	0,4230	0,4211	1,90	0,4202	0,4184	1,80

Tabela 18 - Períodos diários de menor consumo (14:00 às 6:00) em três dias de avaliação de secagem do solo

Ponto	Profundidade (m)	Umidade do solo		Consumo (L m ⁻³)	Umidade do solo		Consumo (L m ⁻³)	Umidade do solo		Consumo (L m ⁻³)
		Inicial (U ₀)	Final (U)	21 a 22/12/2015	Inicial (U ₀)	Final (U)	22 a 23/12/2015	Inicial (U ₀)	Final (U)	23 a 24/12/2015
SPS 2	0,10	0,3424	0,3408	1,60	0,3356	0,3328	2,80	0,3270	0,3251	1,90
SPS 3	0,10	0,2927	0,2922	0,50	0,2867	0,2857	1,00	0,2818	0,2815	0,30
SAFa 1	0,10	0,3140	0,3107	3,30	0,3054	0,3015	3,90	0,2960	0,2946	1,40
SAFa 2	0,10	0,2053	0,2049	0,40	0,1986	0,1973	1,30	0,1914	0,1910	0,40
SAFa 3	0,10	0,3263	0,3227	3,60	0,3173	0,3140	3,30	0,3086	0,3062	2,40
SAFa 4	0,10	0,3082	0,3082	0,00	0,3031	0,3029	0,20	0,2985	0,2985	0,00
SAFb 1	0,10	0,3473	0,3454	1,90	0,3364	0,3346	1,80	0,3270	0,3250	2,00
SAFb 2	0,10	0,2994	0,2973	2,10	0,2898	0,2884	1,40	0,2820	0,2810	1,00
SAFb 3	0,10	0,2742	0,2735	0,70	0,2699	0,2696	0,30	0,2668	0,2668	0,00
SAFb 4	0,10	0,3129	0,3122	0,70	0,3057	0,3049	0,80	0,2986	0,2974	1,20
SPS 2	0,50	0,4021	0,4016	0,50	0,398	0,3973	0,70	0,3936	0,3927	0,90
SPS 3	0,50	0,3869	0,3866	0,30	0,3824	0,3818	0,60	0,3769	0,3767	0,20
SAFa 1	0,50	0,3263	0,3249	1,40	0,3233	0,3221	1,20	0,3205	0,319	1,50
SAFa 2	0,50	0,3936	0,3926	1,00	0,3903	0,3890	1,30	0,3859	0,3851	0,80
SAFa 3	0,50	0,3910	0,3910	0,00	0,3860	0,3854	0,60	0,3807	0,3803	0,40
SAFa 4	0,50	0,3815	0,3803	1,20	0,3775	0,3759	1,60	0,3726	0,3719	0,70
SAFb 1	0,50	0,4302	0,4302	0,00	0,4266	0,4266	0,00	0,4226	0,4225	0,10
SAFb 2	0,50	0,4329	0,4334	-0,50	0,4302	0,4294	0,80	0,4268	0,4266	0,20
SAFb 3	0,50	0,3613	0,3604	0,90	0,3564	0,3555	0,90	0,3524	0,3509	1,50
SAFb 4	0,50	0,4234	0,423	0,40	0,4211	0,4202	0,90	0,4184	0,4175	0,90

4 Conclusões

O SAF foi o local onde se constatou maior fertilidade, evidenciados pelos maiores teores de P, Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Maiores valores de condutividade hidráulica não saturada foram observadas nos SAF. Foi registrado valores de umidade abaixo do ponto de murcha permanente no SAF.

No período que compreende a expansão do fruto do cafeeiro, foi observado valores abaixo do ponto de murcha permanente no ponto 2 do SAFa a 0,10 m e no ponto 1 do SAFa a 0,50 m.

Em geral valores maiores de consumo de água foram identificados nos SAF se comparado com os SPS.

Referências

- Alpizar, L., Fassbender, H.W., Heuvelpod, J., Fölster, H., Enríquez, G., 1986. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) Materials and methods The Studies were carried out at the Central Experiment of the Department. *Agrofor. Syst.* 4, 175–189.
- Alves, J.M., Martins, R.C., Freitas, R.A. De, Barrella, T.P., Campos, A.N. da R., 2014. Efeito da adubação verde com espécies herbáceas e arbóreas na micorrização do cafeeiro. *Rev. Bras. Agropecuária Sustentável* 4, 11–16.
- Barreto, A.C., Lima, F.H.S., Freire, M.B., Araujo, Q.R. de, Freire, F.J., 2006. Características químicas e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia. *Caatinga* 19, 415–425.
- Camargo, Â.P. de, Camargo, M.B.P. de, 2001. Definição e Esquematização das Fases Fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia* 60, 65–68. doi:10.1590/S0006-87052001000100008
- Campanha, M.M., Santos, R.H.S., Freitas, G.B., Martinez, H.E.P., Jaramillo-Botero, C., Garcia, S.L., 2007. Análise comparativa das características da serrapilheira e do solo em cafezais (*Coffea arabica* L.) cultivados em sistema agroflorestal e em monocultura, na Zona da Mata MG. *Rev. Árvore* 31, 805–812. doi:10.1590/s0100-67622007000500004
- Campbell Scientific, 2015. CS616 and CS625 water content reflectometers, Instruction manual. Edmonton, Alberta. Utah.
- Cannavo, P., Sansoulet, J., Harmand, J.M., Siles, P., Dreyer, E., Vaast, P., 2011. Agroforestry associating coffee and *Inga densiflora* results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140, 1–13. doi:10.1016/j.agee.2010.11.005
- Canto, J.L. do, Schneider, P.R., 2004. Na depressão central do Rio Grande do Sul, Brasil. *Ciência Florest.* 14, 29–35.
- Carter, M.R., 1991. The influence of tillage on the proportion of organic carbon and nitrogen in the microbial biomass of medium-textured soils in a humid climate. *Biol. Fertil. Soils* 11, 135–139. doi:10.1007/BF00336378
- Carvalho, R., Goedert, W.J., Armando, M.S., 2004. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 39, 1153–1155. doi:10.1590/S0100-204X2004001100015
- Carvalho, A.F. de, 2011. Água e radiação em sistemas agroflorestais com café no território da Serra do Brigadeiro – MG.
- Costa, L.F., Antonino, A.C.D., Heck, R.J., Coutinho, A.P., Mendonça Pimentel, R.M., Vasconcelos, T.C., Machado, C.B., 2016. Espaço poroso em solos brasileiros usando tomografia computadorizada de raios-X. *Rev. Bras. Geogr. Física* 9.
- Damatta, F., Rodr, N., 2007. Producción sostenible de cafetales en sistemas agroflorestales del Neotrópico: una visión agronómica y ecofisiológica. *Agron. Colomb.* 25, 113–123.
- Donagemma, G.K., Ruiz, H.A., Fontes, M.P.F., Ker, J.C., Schaffer, C.E.G.R., 2003. Dispersão de Latossolos em resposta à utilização de pré-tratamentos na análise textural. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 27, 765–772. doi:10.1590/S0100-06832003000400021
- Dourado-Neto, D., Nielsen, D.R., Hopmans, W., Reichardt, K., Oliveira, O., 2000. Software to model soil water retention curves (SWRC), version Nota. doi:10.1590/S0103-90162000000100031
- EMBRAPA, E.B. de P.A., 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos.
- EMBRAPA, E.B. de P.A., 2011. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro.
- Foltran, E.C., Silva, E., Campoe, O.C., Stape, J.L., Laclau, J., 2009. Calibração de sensores TDR (Time Domain Reflectometer) para solos de textura média, in: XVIII Simpósio

- Internacional de Iniciação Científica E Tecnológica Da USP. p. 1.
- Franco, C.M., Inforzato, R., 1946. O sistema radicular do cafeeiro nos principais tipos de solo do estado de São Paulo. *Bragantia* 6, 443–478. doi:10.1590/S0006-87051946000900001
- Freire, A.C., Arnates, E.M., Lamas, F.M., Ramalho, F.S., Andrade, F.P., Melo Filho, G.A., Ferreira, G.B., Santana, J.C.F., Amaral, J.M.B., Medeiros, J.C., Bezerra, J.R.C., Pereira, J.R., Silva, K.L., Staut, L.A., Silva, L.C., Chitarra, L.G., Barros, M.A.L., Carvalho, M.C.S., Luz, M.J.S., Beltrão, N.E.M., Suassuna, N.D., Silva, O.R.R.F., Ferreira, P.F., Santos, R.F., Fonseca, R.G., 2003. A cultura do algodão no Cerrado, Sistemas de Produção Embrapa Algodão.
- Freitas, I.C., Santos, F.C. V., Custódio Filho, R.O., Correchel, V., 2016. Carbono no solo, acúmulo e qualidade da serapilheira em sistemas de produção familiar. *Floresta* 46, 31–38.
- Höfer, H., Hanagarth, W., Garcia, M., Martius, C., Franklin, E., Römcke, J., Beck, L., 2001. Structure and function of soil fauna communities in Amazonian anthropogenic and natural ecosystems. *Eur. J. Soil Biol.* 37, 229–235. doi:10.1016/S1164-5563(01)01089-5
- Iwata, B.D., Leite, L.F.C., Araujo, a S.F., Nunes, L. a P.L., Gehring, C., Campos, L.P., 2012. Agroforestry systems and its effects on chemical attributes of an Ultisol in the “Cerrado” of Piauí State, Brazil. *Rev. Bras. Eng. Agric. E Ambient.* 16, 730–738. doi:10.1590/S1415-43662012000700005
- Kobayashi, E.S., 2007. Consumo de água e produtividade de cafeeiros arábica na região de Mococa, SP.
- Linhares, J.M., Bastos, W.R., Silva, D.P.L., Silva Junior, R.F., Oliveira, L.C.S., 2016. Variabilidade de atributos físico-químicos e dos estoques de carbono orgânico em Argissolo Vermelho sob sistemas agroflorestais no assentamento Umari sul do Amazonas. *Rev. Geográfica Acadêmica* 10, 93–117.
- Mittelbach, H., Lehner, I., Seneviratne, S.I., 2012. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *J. Hydrol.* 430–431, 39–49. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.041
- Mora, A., Beer, J., 2013. Geostatistical modeling of the spatial variability of coffee fine roots under *Erythrina* shade trees and contrasting soil management. *Agrofor. Syst.* 87, 365–376. doi:10.1007/s10457-012-9557-x
- Moreira, S.L.S., 2015. Produtividade, qualidade do solo e aspectos microclimáticos em sistema agroflorestal de cafeeiro e macaúba. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Neves, Y.P., Martinez, H.E.P., Souza, C.M. De, Cecon, P.R., 2007. Teor de água e fertilidade do solo com cafeeiros cultivados em sistemas agroflorestais. *Rev. Árvore* 31, 575–588. doi:10.1590/S0100-67622007000400002
- Nicodemo, M.L.F., 2011. Dinâmica da água em sistemas agroflorestais 36.
- Oliveira, D.M.T., 2001. Morfologia comparada de plântulas e plantas jovens de leguminosas arbóreas nativas: espécies de Phaseoleae, Sophoreae, Swartzieae e Tephrosieae. *Rev. Bras. Botânica* 24, 85–97. doi:10.1590/S0100-84042001000100010
- Paula, P.D. de, Campello, E.F.C., Guerra, J.G.M., Santos, G.D.A., Resende, A.S. de, 2015. Decomposição das podas das leguminosas arbóreas *Gliricidia sepium* e *Acacia angustissima* em um sistema agroflorestal. *Ciência Florest.* 25, 791–800. doi:10.5902/1980509819696
- Pezarico, C.R., Vitorino, A.C.T., Mercante, F.M., Daniel, O., 2013. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. *Amaz. J. Agric. Environ. Sci.* 56, 40–47.
- R Development Core Team, 2011. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Richards, L.A., Allison, L.E., Bernstein, L., Brown, J.W., Fireman, M., Hayward, H.E., Pearson, G.A., Wilcox, L. V., Bower, C.A., Hatcher, J.T., Reeve, R.C., 1954. Diagnosis

- and improvement of saline and alkaline soils, *Soil Science Society of America Journal*. Washington. doi:10.2136/sssaj1954.03615995001800030032x
- Righi, C.A., Lunz, A.M.P., Bernardes, M.S., Pereira, C.R., Teramoto, E.R., Favarin, J.L., 2008. Coffee water use in agroforestry system with rubber trees. *Rev. Arvore* 32, 781–792. doi:10.1590/S0100-67622008000500001
- Ronchi, C.P., Sousa Júnior, J.M. de, Almeida, W.L. de, Souza, D.S., Silva, N.O., Oliveira, L.B. de, Guerra, A.M.N. de M., Ferreira, P.A., 2015. Morfologia radicular de cultivares de café arábica submetidas a diferentes arranjos espaciais. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 50, 187–195. doi:10.1590/S0100-204X2015000300001
- Toma, R.S., Cooper, M., Tavares, M.F., Carvalho, C.C.D., Teato, A.C., 2013. Evolução temporal do comportamento físico-hídrico do solo de um sistema agroflorestal no Vale do Ribeira–SP. *Sci. For.* 41, 237–248.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- Vilela, E.F., Mendonça, E.S., 2013. Impacto de sistemas agroflorestais sobre a matéria orgânica do solo: Modelagem de carbono e nitrogênio. *Coffee Sci.* 8, 354–363.
- Yeoh, N., Walker, J., Young, R., Rüdiger, C., Smith, A., Ellett, K., Pipunic, R., Western, A., 2008. Calibration of the murrumbidgee monitoring network CS616 soil moisture sensors 19.

Considerações Gerais

Os dados obtidos com a ferramenta laser scanner podem auxiliar na leitura de variáveis dendrométricas de SAF de forma não destrutiva.

A modelagem digital de cafeeiros para encontro de variáveis com IAF foi satisfatória, entretanto cuidados devem ser levados em consideração ao avaliar o IAF sob projeção dos cafeeiros.

Foi possível a modelagem digital de radiação e sombra dos sistemas. A modelagem pode ser eficiente na tomada de decisão para o manejo de SAF.

O sistema a pleno sol foi melhor ajustado enquanto que para o sistema agroflorestal é preciso realizar posteriores ajustes de calibração do modelo já que a copa das árvores são projetadas ao solo.

Foi possível identificar a condutividade hidráulica não saturada utilizando a diferença entre o tempo de chegada da frente de umidade de um sensor para o outro.

Também foi possível identificar o consumo de água do solo utilizando os dados observados nas leituras dos TDR.