



MAYRA ALEJANDRA TORO HERRERA

**MODELAGEM DA ALOCAÇÃO DE BIOMASSA EM
CAFEIROS EM RESPOSTA À VARIABILIDADE
CLIMÁTICA**

**LAVRAS – MG
2018**

MAYRA ALEJANDRA TORO HERRERA

**MODELAGEM DA ALOCAÇÃO DE BIOMASSA EM CAFEEIROS EM
RESPOSTA À VARIABILIDADE CLIMÁTICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal para obtenção do título de mestre.

Prof. Dr. João Paulo Rodrigues Delfino Alves Barbosa
Orientador

Profa. Dra. Ana Carolina Maioli Campos Barbosa
Coorientadora

**Lavras – MG
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Toro Herrera, Mayra Alejandra.

Modelagem da alocação de biomassa em cafeeiros em resposta
à variabilidade climática / Mayra Alejandra Toro Herrera. - 2018.
62 p.

Orientador(a): João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa.

Coorientador(a): Ana Carolina Maioli Campos Barbosa.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Cafeeiro. 2. Alocação de carbono. 3. Variação climática. I.
Delfino Barbosa, João Paulo Rodrigues Alves. II. Campos Barbosa,
Ana Carolina Maioli. III. Título.

MAYRA ALEJANDRA TORO HERRERA

**MODELAGEM DA ALOCAÇÃO DE BIOMASSA EM CAFEEIROS EM
RESPOSTA À VARIABILIDADE CLIMÁTICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal para obtenção do título de mestre.

APROVADO em 28 de fevereiro de 2018

Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato

Dr. José Donizeti Alves

EPAMIG

UFLA

Prof. Dr. João Paulo Rodrigues Delfino Alves Barbosa
Orientador

Profa. Dra. Ana Carolina Maioli Campos Barbosa
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2018**

*A mis padres y mi hermano a quienes debo lo que soy
Dedico*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir a conclusão de mais uma etapa da minha vida acadêmica.

A mi familia por apoyarme siempre en cada uno de mis sueños y por estar siempre a mi lado, inclusive en la distancia. Cada logro de mi vida es para ustedes.

À Universidade Federal de Lavras e ao Setor de Fisiologia Vegetal, pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa.

Ao meu orientador, o professor João Paulo Rodrigues Delfino Alves Barbosa, pela orientação, paciência, disponibilidade constante e pelos ensinamentos durante todo o mestrado. Agradeço imensamente por ter contribuído com minha formação e crescimento profissional e pessoal.

À professora Ana Carolina Maioli Campos Barbosa pela orientação durante o desenvolvimento do projeto e pelo apoio durante o processamento das amostras.

Aos professores do Setor de Fisiologia Vegetal, pelos ensinamentos que auxiliaram no meu processo de formação.

Ao Consórcio Pesquisa Café e à Fundação Procafé pelo apoio durante o desenvolvimento do projeto.

À Lissa Vasconcellos Vilas Boas pelo apoio com a coleta das amostras da fazenda da Fundação Procafé e pela boa disposição para me ajudar.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Ecofisiologia Vegetal da UFLA pelos momentos de auxílio, de estudo e de amizade.

Aos amigos estrangeiros por ser minha família em Lavras e pelos momentos de estudo e amizade.

Muito obrigada!

RESUMO

O cafeeiro está sujeito durante todo ano a adversidades decorrentes de eventos climáticos que podem prejudicar o desenvolvimento e a produtividade da cultura, sendo a instabilidade na quantidade e distribuição das chuvas e o aumento na temperatura, os casos mais preocupantes para a produção de café no Brasil. Embora exista grande incerteza sobre como cada região produtora pode ser afetada, é possível prever algumas respostas nos padrões típicos de alocação de carbono e crescimento secundário dos cafeeiros. Neste trabalho, buscou-se avaliar a influência das condições climáticas no crescimento secundário de cafeeiros em condições de campo, além de verificar como a alocação é afetada em seus diferentes níveis (folhas, frutos e caule) frente a variações ambientais. O trabalho foi conduzido nas regiões de Lavras e Varginha, Minas Gerais, utilizando-se a espécie *Coffea arabica* L., cultivares Mundo Novo e Arara, avaliados no período de 2010 a 2017; empregando a análise da estrutura dos anéis de crescimento das plantas através de métodos dendrocronológicos, para determinar as taxas de crescimento radial anual das árvores e correlacioná-las com as características climáticas da região, usando uma análise de correlação estatística de Pearson. Foi ajustado um modelo polinomial de segundo grau para descrever a relação entre incremento radial e as principais variáveis climáticas (precipitação e temperatura), além do modelo de regressão logístico para descrever a relação entre o incremento em altura e o incremento radial. Com os resultados pode-se concluir que no período e regiões avaliadas, o incremento na temperatura mínima foi o fator que teve a maior influência no aumento na taxa de crescimento secundário anual dos cafeeiros, além que é preciso um melhor conjunto de dados para estabelecer uma relação direta entre o crescimento secundário e a alocação de carbono, que permita avaliar as mudanças nos padrões de alocação nos cafeeiros em seus diferentes níveis em anos com mudanças climáticas.

Palavras-chave: Cafeeiro. Alocação diferencial. Crescimento radial. Temperatura mínima. Variação climática.

ABSTRACT

Coffee plant is subject to climatic adversities throughout the year, which can affect the development and productivity of the crop. The instability in the amount and distribution of rainfall and the greater occurrence of periods of drought are the most worrying cases for the coffee production in Brazil. Although there is great uncertainty about how each producing region can be affected, it is possible to predict some responses in the typical patterns of carbon allocation and secondary growth of coffee trees. In this work, we sought to assess the influence of climatic conditions in the secondary growth of coffee plants under field conditions, as well as see how the allocation is affected at different levels (leaves, fruit and stems) in the face of environmental variations. The work was conducted in the regions of Lavras and Varginha, Minas Gerais, using the *Coffea arabica* L. specie, cultivars Mundo Novo and Arara, evaluated in the 2010-2017 period; employing the analysis of the structure of plant growth rings through dendrochronological methods to determine the radial annual growth rate of trees and correlate them with the climatic characteristics of the region, using a statistical correlation analysis of Pearson. A quadratic polynomial model was adjusted to describe the relationship between radial increment and the main climate variables (precipitation and temperature), and the logistic regression model to describe the relationship between the increment in height and radial increment. With the results it can be concluded that in the period and regions evaluated, the increase in minimum temperature was the factor that had the greatest influence on the increase in the annual secondary growth rate of coffee trees. A better data set is needed to establish a direct relationship between secondary growth and carbon allocation, which allows for the evaluation of changes in the allocation patterns in coffee trees at different levels in years with climatic changes.

Keywords: Coffea. Differential allocation. Radial growth. Minimum temperature. Climatic variation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área experimental da UFLA – Fonte: Google Maps (2018).....	11
Figura 2 - Localização da Fazenda Experimental da Fundação Procafé – Fonte: Google Earth (2018).....	12
Figura 3 - (A) Árvore de café mostrando seções de amostragem para análise de anéis de crescimento (B) Seção transversal da base da árvore após a preparação da superfície revelando os anéis (C) Anéis de crescimento visualizados no microscópio (0.67X).....	14
Figura 4 - Precipitação anual e temperaturas máxima e mínima durante o período de estudo – Informação da estação meteorológica de Lavras – MG (INMET, 2017).....	18
Figura 5 - Variação intra-anual da precipitação e temperaturas máxima e mínima durante o período de estudo (PE), comparadas com os valores da normal climatológica (NC) de 1961-1990 – Informação da estação meteorológica de Lavras – MG (INMET, 2017).....	19
Figura 6 - Balanço hídrico do período em estudo –Informação da estação meteorológica de Lavras – MG (INMET, 2017).....	20
Figura 7 - Área acumulada dos anéis de crescimento na UFLA/cultivar Mundo Novo (A) e em Varginha/cultivar Arara (B) - Valores para cada unidade amostral (linhas contínuas) e a média (linha com símbolos)	21
Figura 8 - Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da temperatura mínima (Tmin) – Cultivar Mundo Novo, UFLA.....	24
Figura 9 - Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da média de temperaturas mínimas (MTmin) – Cultivar Mundo Novo, UFLA	25
Figura 10 - Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da temperatura máxima do mês mais quente (TMMQ) – Cultivar Mundo Novo, UFLA	25

Figura 11 - Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da temperatura máxima (Tmax) – Cultivar Arara, VARGINHA.....	26
Figura 12 - Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da média das temperaturas máximas (MTmax) – Cultivar Arara, VARGINHA.....	27
Figura 13 - Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da temperatura mínima do mês mais frio (TMMF) – Cultivar Arara, VARGINHA.....	27
Figura 14 - Ajuste do modelo Logístico aos dados de área total de anéis em função da altura da planta - Área experimental da UFLA.....	30
Figura 15 - Ajuste do modelo Logístico aos dados de área total de anéis em função da altura da planta - Fazenda Fundação Procafé	31
Figura 16 - Distribuição de massa seca em relação à dinâmica climática na Fazenda Experimental em Varginha – Dez 2016/ Out 2017	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equação polinomial e do modelo de regressão não linear Logístico	17
Tabela 2 - Correlações de Pearson entre a área de anéis e os parâmetros climáticos - UFLA	22
Tabela 3 - Correlações de Pearson entre a área de anéis e os parâmetros climáticos - Varginha	23
Tabela 4 - Estimativas dos parâmetros do modelo polinomial para as médias da variável área de anéis em relação às variáveis climáticas	23
Tabela 5 - Correlações de Pearson entre a área de anéis e os parâmetros climáticos do ano anterior	28
Tabela 6 - Correlações de Pearson entre a área total de anéis e variáveis alométricas - Área experimental da UFLA	29
Tabela 7 - Correlações de Pearson entre a área total de anéis e variáveis alométricas - Fazenda Fundação Procafé	29
Tabela 8 - Estimativas dos parâmetros do modelo Logístico para as variáveis de área total de anéis e altura total da planta.....	30
Tabela 9 - Correlações de Pearson entre a área total de anéis e biomassa - Área experimental da UFLA	33
Tabela 10 - Correlações de Pearson entre a área total de anéis e biomassa - Fazenda Fundação Procafé.....	33

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1	Mudanças climáticas e cafeicultura	4
2.2	Teorias de alocação de carbono.....	6
2.3	Dendrocronologia	9
3.	METODOLOGIA.....	11
3.1	Área de Estudo.....	11
3.2	Material Vegetal.....	12
3.3	Seleção das Amostras	12
3.4	Medições de Anéis de Crescimento	13
3.5	Dados Climáticos	15
3.6	Análise de Dados.....	15
3.6.1	Correlação entre crescimento e variáveis climáticas.....	15
3.6.2	Alometria	16
3.6.3	Biomassa	16
3.6.4	Análise estatística.....	16
4.	RESULTADOS	18
4.1	Dados climáticos.....	18
4.2	Análise dendrocronológica.....	21
4.3	Correlação entre crescimento e variáveis climáticas.....	22
4.4	Relações alométricas.....	29
4.5	Correlação entre crescimento e biomassa	31
5.	DISCUSSÃO	34
5.1	Análise climatológica	34
5.2	Análise dendrocronológica.....	35
5.3	Correlação entre crescimento e variáveis climáticas.....	36
5.4	Correlação entre crescimento e alometria.....	39
5.5	Correlação entre crescimento e biomassa	40
6.	CONCLUSÕES.....	43
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

1. INTRODUÇÃO

O gênero *Coffea* pertence à família Rubiaceae, contendo aproximadamente 100 espécies identificadas com origem nas florestas tropicais Africanas e Asiáticas. Entre essas espécies, *C. arabica* L. (cafeeiro arábica) e o *C. canephora* Pierre ex A. Froehner (cafeeiro robusta) dominam economicamente o comércio mundial de café, respondendo por cerca de 99% da produção mundial (BRIDSON; VERDCOURT, 1988; ICC, 2009).

O café é um produto de grande importância mundial, sendo cultivado em mais de 80 países e atingindo no ano de 2017, produção superior a 154 milhões de sacas. No Brasil, o cafeeiro é cultivado desde 1727 e é uma das mais importantes culturas agrícolas do país, ocupando dentre os países produtores a primeira posição, com uma produção de 44,97 milhões de sacas de 60 quilos em 2017. De acordo com o primeiro levantamento de safra para café do ano 2018 realizado pela CONAB, o café arábica representa 81% da produção total de café do país com cerca de 1,78 milhões de hectares plantados, dos quais 15% estão em formação e o 85% estão em produção. A primeira estimativa para a produção da safra cafeeira em 2018 indica que o país deverá colher entre 41,74 e 44,55 milhões de sacas de 60 quilos de café beneficiado (CONAB, 2018), caso as condições climáticas sejam favoráveis.

A relação entre condições climáticas e a produção agrícola é muito importante porque os fatores ambientais afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas de formas distintas durante as fases fenológicas do cultivo. As alterações na produtividade estão relacionadas com mudanças na temperatura do ar, a radiação solar e a umidade relativa, mas julga-se que as condições térmicas e pluviométricas são os fatores mais importantes na definição da produtividade potencial (ICC, 2009).

A produtividade das principais regiões cafeeicultoras no Brasil e no mundo está diretamente relacionada com as condições climáticas favoráveis presentes nesses locais, de modo que as mudanças climáticas têm recebido atenção especial dado seu potencial de provocar grandes perdas e redução nas áreas consideradas tradicionalmente aptas para o cultivo do cafeeiro, o que afetaria a um grande número de pequenos agricultores cuja principal fonte de renda é o café, de forma que redução nas áreas aptas teria repercussão em seu principal meio de subsistência (SCHROTH et al., 2014; TCI, 2016).

O Brasil com sua dimensão continental possui uma considerável heterogeneidade climática, tipos de solo e topografia, de modo que, cada região produtora poder ser afetada de forma diferenciada, com regiões que poderiam se tornar desfavoráveis e outras que passariam a apresentar condições favoráveis para o desenvolvimento da cultura. Além disso, o aumento da temperatura previsto para as próximas décadas poderia afetar a velocidade de maturação dos frutos com efeitos na qualidade da bebida, interferindo na produtividade e rendimento (ASSAD et al., 2004; ICC, 2009; PEREIRA et al., 2009; CAMARGO, 2010; OVALLE et al., 2015; TCI, 2016).

Essas condições de mudança climática podem afetar os estoques e fluxos de carbono entre as plantas e a atmosfera impactando nos processos de crescimento e manutenção da planta e alterando a partição/alocação de carbono para processos de produção de frutos e crescimento vegetativo. Para entender as respostas da planta individualmente e à escala do ecossistema, levando à prevenção de mudanças vegetais futuras, os efeitos combinados da mudança climática têm que ser quantificados. Para isso, podem ser utilizados modelos ecofisiológicos baseados nos principais processos metabólicos das plantas para descrever o crescimento e produção sob influência do ambiente (LEMONS, 2012; SEVANTO; DICKMAN, 2015).

Para verificar como ocorre o crescimento vegetativo do cafeeiro pode se utilizar da análise de anéis de crescimento. Essa técnica permite a avaliação indireta, mas em longo prazo, da alocação de biomassa para crescimento secundário e que por sua vez, pode ser utilizada como proxy, relacionando as características e taxas de crescimento anual e produção com as características de sazonalidade climática. Desta maneira, a modelagem da alocação de carbono através da análise de anéis de crescimento, permite a avaliação indireta da sua alocação em diferentes partes da planta (SEVANTO; DICKMAN, 2015).

Partindo da premissa de que as plantas preferencialmente alocam carbono para adquirir o recurso que mais limita seu crescimento, através dessa modelagem, seria possível desvendar os mecanismos do investimento diferencial do carbono em cafeeiros em condições de campo. Já que as temperaturas crescentes e os extremos climáticos mais frequentes aumentam a possibilidade de secas prolongadas e severas (o que está relacionado com deficiências hídricas que prejudicam o transporte de água e carbono afetando a fotossíntese

líquida); as árvores tem várias maneiras de se adaptar à seca e contrapor os efeitos negativos, através de adaptações e mudanças no balanço e alocação de carbono entre as partes acima e abaixo do solo. Portanto, árvores afetadas pela seca que são propensas a um crescimento reduzido, modificam seu padrão de alocação, apresentando uma maior alocação de matéria às raízes e algumas estruturas vegetativas em relação a estruturas reprodutivas (BLOOM et al., 1985; MUND et al., 2010; AALTONEN et al., 2016).

Assim, partindo da hipótese de que em anos com menor disponibilidade de água ou de maior temperatura há maior alocação de biomassa para estruturas lenhosas, com menor investimento em folhas e produção de frutos; o objetivo do trabalho foi determinar a influência dessas variáveis climáticas no crescimento secundário de cafeeiros, além de verificar como a alocação de carbono é afetada em condições de campo, em seus diferentes níveis (folhas, frutos e caule) frente a variações ambientais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Mudanças climáticas e cafeicultura

As mudanças climáticas são variações estatisticamente significantes em de uma variável climática, que persiste num período extenso. Essas alterações geram impactos negativos no meio ambiente afetando vários setores econômicos que reúnem diversos sistemas produtivos, sendo a vulnerabilidade desses sistemas descrita de acordo com a combinação da exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação (IPPC, 2014; BACA et al., 2014).

A vulnerabilidade está associada à incapacidade do sistema de enfrentar os efeitos adversos das mudanças climáticas e depende da natureza, magnitude e taxa de mudança. A exposição é a natureza e extensão das mudanças que o clima de um lugar está sujeito, enquanto que a sensibilidade mede como o sistema pode ser afetado pela mudança em termos de custo ou rendimento. Em contrapartida, a capacidade do sistema de se adaptar às mudanças climáticas para reduzir ou mitigar os possíveis danos, é definida como a capacidade adaptativa (BACA et al., 2014).

Assim, as mudanças impõem uma série de desafios para os setores econômicos mais vulneráveis, dentre os quais o agrícola, devido a variações que se tornam menos previsíveis, eventos climáticos extremos mais frequentes e intensos, anos mais secos e com temperaturas que excedem o ótimo para o crescimento e o desenvolvimento das culturas (SCHROTH et al., 2014). O cafeeiro tem sido uma das primeiras espécies avaliadas no que se refere aos efeitos das mudanças climáticas, uma vez que as condições climáticas determinam fortemente seu rendimento, além da sua importância socioeconômica, o que justifica a pesquisa sobre a adaptação da cultura às mudanças climáticas (BUNN et al., 2014; VERHAGE; ANTEN; SENTELHAS, 2017).

Embora exista grande incerteza sobre como cada região produtora de café pode ser afetada pelas mudanças climáticas, é possível prever algumas possíveis respostas. Por exemplo, o aumento da temperatura previsto para as próximas décadas poderia afetar o limite inferior de altitude para a cultura, levando a mudanças nas condições adequadas de crescimento e desenvolvimento com efeitos na velocidade de maturação (qualidade da

bebida), ciclos de floração, fotossíntese, respiração, etc., os quais por sua vez, afetam negativamente a produtividade e rendimento. Além disso, temperaturas mais altas poderiam gerar mudanças nos ciclos de pragas e doenças com a proliferação e dispersão a regiões onde antes elas não ocorriam; e a alta variabilidade da precipitação poderia afetar os processos de evapotranspiração levando à necessidade de implementar infraestruturas de irrigação (ICC, 2009; PEREIRA et al., 2009; CAMARGO, 2010; TCI, 2016).

Assim, a dependência da produção de café arábica, principal fonte de café de alta qualidade, em climas específicos determinados através de zoneamento agroecológico, mostram uma redução da área apropriada para o cultivo de até 50%, afetando diferencialmente a cada país produtor, sendo que, países como Indonésia e México, poderiam apresentar produções maiores; enquanto que, países como Haiti, Quênia, Nicarágua, Porto Rico, Tanzânia, Uganda, entre outros, apresentariam produções menores, afetando socioeconomicamente a um grande número de pequenos agricultores que depende do café como principal fonte de renda nessas regiões (SCHROTH et al., 2014; LADERACH et al. 2017; VERHAGE; ANTEN; SENTELHAS, 2017).

Avaliar os efeitos das mudanças climáticas na agricultura é possível através de modelos que estabelecem cenários atuais e futuros permitindo analisar o impacto na produção e rendimento em relação a variações em latitude, altitude, regiões e classes de uso do solo. As plantas de café são particularmente suscetíveis a mudanças no clima, pois podem ser produtivas e têm uma vida útil média de 30 anos, experimentando muitas das mudanças climáticas previstas pelos modelos. Assim, estes modelos usam três métodos para avaliar o impacto das mudanças climáticas na produção global de café: o uso de zoneamento agroecológico, o uso de denominadores comuns de adequação climática para mapear áreas de risco e o uso da variabilidade temporal ou espacial na produção (BUNN et al., 2014; LADERACH et al. 2017).

Inicialmente, esses métodos usaram modelagem de nicho com base em dados climáticos históricos e locais de áreas de cultivo de café, através de software de distribuição de espécies, mas apresentaram representações tendenciosas de climas adequados, surgindo a necessidade de modelos mais robustos com dados confiáveis que permitam calibrar os parâmetros de forma correta. Atualmente, são usados resultados de um conjunto multi-

modelo, que fornecem uma avaliação mais robusta, melhorando a habilidade de predição climática atual e futura para a produção de café em escala global (BUNN et al., 2014; OVALLE et al., 2015).

Já que uma das implicações das mudanças climáticas está associada a variações nas dinâmicas do carbono entre as plantas e a atmosfera, esses conjuntos de modelos permitiriam avaliar o impacto nos processos e fatores que controlam o crescimento e desenvolvimento das árvores e as dinâmicas de alocação de carbono, em diferentes níveis e escalas de tempo e espaço. Aproximações que usam vínculos estatísticos entre medidas alométricas e dendrocronológicas e o clima passado e presente, tem sido usadas para identificar os determinantes climáticos do crescimento das árvores e antecipar a vulnerabilidade destas sob as projeções de mudanças climáticas. Essas aproximações apresentam a vantagem de poder ser aplicadas com relativamente pouca informação ecológica e fisiológica da espécie, embora dependendo da gama de condições ambientais usadas para sua parametrização, diminua sua capacidade preditiva (LEMPEREUR et al., 2015).

Variações dos padrões de alocação biomassa devido a condições bióticas e abióticas permitem que as plantas mantenham relações funcionais entre folhas, caule e raízes. De tal modo, a modelagem da alocação de carbono e sua relação com o clima, permite determinar os mecanismos de investimento diferencial do carbono pelo qual as plantas podem se adaptar às mudanças no ambiente (SLOT et al., 2012; SEVANTO; DICKMAN, 2015).

2.2 Teorias de alocação de carbono

O termo “alocação” tem sido usado para descrever a quantidade relativa de biomassa presente nos vários órgãos da planta, a dinâmica de carbono em diferentes escalas dentro de um ecossistema, o fluxo de carbono para uma determinada componente vegetal, e até a distribuição do fluxo de carbono como uma fração da fotossíntese bruta. Consiste de três componentes que são a biomassa (a quantidade de material presente), o fluxo (fluxo de carbono para um determinado componente por unidade de tempo), e a partição (fração da produtividade primária bruta usada por um determinado componente) (CHAPIN et al., 1990; LITTON et al., 2007).

A alocação de carbono é um processo fisiológico crítico em que os produtos da fotossíntese são deslocados entre a respiração e a produção de biomassa, sendo que, teoricamente as plantas preferencialmente alocam carbono para adquirir o recurso que mais limita seu crescimento, o que representa um dos mais importantes processos de mitigação para reduzir os impactos de ambientes desfavoráveis. De tal modo, o ajuste na alocação corresponde a uma resposta homeostática aos desequilíbrios na disponibilidade de recursos (MOONEY; WINNER; PELL, 1991).

Assim, em ambientes com diferenças na disponibilidade de recursos há plantas com diferentes padrões de alocação, sendo que, um padrão flexível de alocação permite que uma planta se adapte às limitações de recursos causadas por vizinhos, estresses ambientais ou mudanças climáticas. Por exemplo, tem sido reportado que limitações de luz e carbono resultam em aumento na biomassa dos caules em relação à biomassa da raiz, assim como limitações hídricas ou de nutrientes poderiam aumentar a alocação na raiz (BLOOM et al., 1985; MOONEY; WINNER; PELL, 1991; LACOINTE, 2000).

Os efeitos da mudança climática sobre a alocação são variados e dependem do impacto de fatores como a espécie e o habitat, a fase do ciclo de vida, a elevação, a severidade da seca o da elevação da temperatura, dentre outros. Para modelar as mudanças de alocação mecanisticamente, é preciso entender que os componentes da alocação de carbono são resultado da interação de muitos processos e relações de causa e resposta (SEVANTO; DICKMAN, 2015). Existe atualmente uma gama de abordagens para prever a alocação em modelos e as principais estão baseadas em aproximações empíricas, alometria, teorias de equilíbrio funcional e da evolução (FRANKLIN et al., 2012).

As aproximações empíricas assumem que uma fração fixa do carbono assimilado na fotossíntese é alocado a cada órgão independente do status individual e as condições ambientais, sendo usadas em perspectivas de larga escala para calcular a variabilidade espacial dos fatores ambientais e seus efeitos na alocação, mas com a limitação da falta de resposta ao nível individual e a mudanças ambientais como a elevação de CO₂ atmosférico. Assim, surgem abordagens alométricas que consideram a variação da alocação com o tamanho e idade das árvores (ontogenia), e descrevem este padrão de alocação intrínseco com relações de escala alométricas baseadas em dados empíricos ou na teoria alométrica,

fornecendo uma maneira simples de derivar o comportamento típico e as propriedades estruturais e funcionais ao nível da população (FRANKLIN et al., 2012).

Nas abordagens de equilíbrio funcional, a alocação é impulsionada por respostas de baixo para cima (balanço funcional entre raiz e parte aérea), para manter uma relação de status dos recursos internos ótima, por exemplo, na relação C:N (o total de nitrogênio absorvido pela raiz é sempre uma porcentagem do total de carbono assimilado pela parte aérea). Assim, as plantas alocam sua biomassa em um padrão ótimo se todos os recursos acima e abaixo do solo que uma planta necessita estão limitando o crescimento em uma extensão igual (crescimento equilibrado). Também são levadas em consideração as aproximações na teoria da coordenação que afirma que a planta busca equalizar os efeitos limitantes de diferentes recursos, através da alocação preferencial de carbono ao órgão responsável pela aquisição do recurso mais limitante em cada tempo (REYNOLDS; CHEN, 1996; POORTER et al., 2011; FRANKLIN et al., 2012).

As aproximações baseadas numa abordagem evolutiva surgem do fato de que a alocação assim como todos os processos biológicos, é um produto da evolução. Desta forma, seu entendimento está ligado à modelagem do processo evolutivo subjacente. Nesta abordagem, a alocação está relacionada com os outros processos fisiológicos e o comportamento integrado da planta inteira é submetido à seleção ou otimização. Devido à complexidade do processo evolutivo, seus efeitos devem ser simplificados para evidenciar as consequências para a alocação em uma forma que pode ser aplicada para fins preditivos, por exemplo, para prever a plasticidade da alocação em resposta a variáveis ambientais. Esta forma de derivar a alocação elimina a necessidade de estimativa empírica dos fatores de alocação e as dificuldades e incertezas associadas (FRANKLIN et al., 2012).

Estudos desenvolvidos com modelos na abordagem alométrica têm usado dados de campo para estimar a biomassa ao longo do tempo e estabelecer relações empíricas precisas entre registros climáticos e acúmulo de biomassa, mas essas aproximações resultam numa incerteza considerável. A busca por outras abordagens para o entendimento da relação entre acúmulo de biomassa e clima em conexão com fatores ecológicos, aponta para o potencial da estrutura do anel das árvores por meio dos métodos dendrocronológicos (WORBES, 1995; MBOW et al., 2013).

2.3 Dendrocronologia

As árvores possuem, além do crescimento primário, o crescimento secundário que está associado ao aumento do seu diâmetro em um determinado período de tempo e é influenciado por fatores internos (fisiológicos) e fatores externos (ecológicos). O aumento em diâmetro depende da atividade cambial da árvore no período vegetativo e de repouso fisiológico da espécie, de modo que, a atividade do câmbio vai acrescentando ano a ano camadas concêntricas justapostas que irão estruturar o material lenhoso, formando os anéis de crescimento. Os anéis são reconhecidamente um dos principais arquivos biológicos das condições climáticas e ambientais do passado, pois estão diretamente relacionados com as condições de crescimento da árvore, regimes de temperatura e precipitação, concentrações atmosféricas de CO₂ e O₂ e períodos de seca ou inundações (IMAÑA; FERNANDES; RODRIGUES; 2005; GASPAR et al., 2016; LÜTTGE, 2017)

A dendrocronologia é definida como o estudo dos anéis de crescimento que possibilita a determinação da idade das árvores, além de se apresentar como um método de datação e registro de climas passados, podendo ser utilizado para estudos ambientais e históricos. A análise retrospectiva dos padrões de crescimento das árvores não só proporciona acesso direto à idade, mas permite reconstruir os efeitos passados do meio ambiente sobre a fisiologia das árvores em décadas. Assim, é possível determinar o controle do crescimento das árvores pelas variações climáticas, as mudanças de longo prazo na produtividade das florestas, os impactos das mudanças globais no crescimento e desenvolvimento das árvores, entre outros (PONTON et al., 2015).

A formação dos anéis de crescimento requer períodos com condições ambientais limitantes de crescimento que induzem períodos de dormência cambial. Nas regiões temperadas a formação dos anéis fica bem definida devido a períodos específicos e claramente marcados de verão e inverno ou de chuvas e secas, de forma que o crescimento das árvores está condicionado a essas características. Em contraste, nos trópicos onde as mudanças sazonais são geralmente baixas e a ocorrência de geadas é limitada a áreas de elevação mais elevadas, as estações de crescimento são principalmente definidas através de mudanças de precipitação (seca em áreas secas e inundações em planícies de inundação) (IMAÑA; FERNANDES; RODRIGUES; 2005; GEBREKIRSTOS et al., 2014).

A dendrocronologia tem sido testada em vários ecossistemas para determinar a produtividade da madeira de espécies individuais e o impacto das variáveis climáticas, relacionando as características e taxas de crescimento anual das árvores com as características de sazonalidade climática do local; de modo que essas análises podem ser usadas para desenvolver modelos precisos para estimar o armazenamento de carbono a partir de registros climáticos em cada localidade. Nesse sentido, a aplicação da dendrocronologia na avaliação das tendências da produção de biomassa pode se dar através dos dados dos anéis de crescimento de árvores individuais aplicados em modelos alométricos em vários tamanhos de crescimento para estimar o incremento de biomassa durante o tempo de vida da árvore (MBOW et al., 2013; GEBREKIRSTOS et al., 2014).

No crescimento das árvores de café, se a temperatura é favorável, o crescimento das plantas apresenta uma periodicidade que acompanha de perto a distribuição das chuvas, com uma dinâmica de crescimento lento durante a estação seca e fria, e rápida na estação chuvosa e quente (nas condições de clima presentes na zona de Minas Gerais), formando anéis de crescimento devido à dormência cambial que experimentam nos períodos secos (MAESTRI; BARROS, 1975; DaMATTA et al., 2007).

Instabilidade na distribuição de chuvas ou maior ocorrência de períodos de seca alteram os padrões típicos de alocação de C em plantas lenhosas, caracterizados por uma distribuição e direcionamento específica dos assimilados em função das diferentes estações de crescimento e fases de latência, alterando a partição de C para processos de produção de frutos e crescimento vegetativo ao aumentar a proporção de biomassa alocada nas raízes e caules com menor investimento em folhas; o que pode ser avaliado através da estrutura dos anéis (FRIEND et al., 1994; POORTER et al., 2011).

Desta maneira, a modelagem da alocação de carbono através de informação alométrica e dendrocronológica, permite avaliar de forma indireta os padrões de alocação de biomassa em diferentes partes da planta, permitindo desvendar os mecanismos do investimento diferencial do carbono em cafeeiros em condições de campo (SEVANTO; DICKMAN, 2015).

3. METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

As atividades referentes ao projeto foram realizadas em dois locais. O primeiro, na área experimental da Universidade Federal de Lavras-UFLA (Figura 1), Lavras, Minas Gerais (21°13' S e 44°57' O, altitude 960 m), com área útil de 4216 m², solo classificado como Latossolo Vermelho distroférico e segundo a classificação climática de Köppen, temperatura média anual de 19,6°C e precipitação média anual de 1530 mm. O segundo, na Fazenda Experimental da Fundação Procafé (Figura 2) em Varginha, Minas Gerais (21°34' S e 45°24' O, altitude 1000m), com área útil de 60 ha, solo com textura argilo arenosa, estrutura granular e boa profundidade; e segundo a classificação climática de Köppen, temperatura média anual de 19,5°C (KOTTEK et al., 2006; ALVARES et al., 2014).



Figura 1. Localização da área experimental da UFLA – Fonte: Google Maps (2018)



Figura 2. Localização da Fazenda Experimental da Fundação Procafé – Fonte: Google Earth (2018)

3.2 Material Vegetal

Na UFLA a espécie utilizada foi *Coffea arabica* L., cultivar Mundo Novo, onde o cafeeiro foi plantado em janeiro de 2011 com espaçamento de 4m x 1m. A cultivar caracteriza-se por possuir alta capacidade de adaptação com elevada produtividade em quase todas as regiões cafeeiras do Brasil, apresentando porte alto, elevado vigor vegetativo, frutos vermelhos e de maturação média (IAC, 2017).

Na Fazenda Experimental da Fundação Procafé, a espécie utilizada foi *Coffea arabica* L., cultivar Arara, onde o cafeeiro foi plantado em março de 2013, com espaçamento de 3,5m x 0,5m. A cultivar caracteriza-se por apresentar alta produtividade, alto vigor, copa mais compacta e de diâmetro maior com ramagem grossa e bifurcada e maturação tardia dos frutos, sendo estes amarelos e com sementes de formato oblongo (IAC, 2017).

3.3 Seleção das Amostras

Na UFLA foram selecionadas um total de 24 indivíduos aleatoriamente na área experimental, dos quais 8 foram coletados durante a etapa final de maturação do fruto em

maio de 2016 e 16 foram selecionados em outubro de 2017. Na Fazenda Experimental da Fundação Procafé foram coletados quatro indivíduos a cada mês durante o período de dezembro de 2016 a outubro de 2017, com um recesso no mês de maio e nos meses de julho e agosto devido ao período de repouso no desenvolvimento das plantas.

Em ambos os locais, a amostragem dos cafeeiros foi feita de forma destrutiva a fim de determinar alocação em cada uma das partes (tronco, folhas e frutos). Cada uma das partes da planta foi separada e levada à estufa a 70°C, até a obtenção de peso constante, para a determinação da massa seca. Além disso, foram coletados dados de altura da planta, número de folhas e área foliar.

3.4 Medições de Anéis de Crescimento

Cada um dos ramos ortotrópicos (ramos principais) das árvores escolhidas foram divididos em três terços ou seções (inferior, médio e superior) (Figura 3 - A), sendo a seção inferior a selecionada para a análise dendrocronológica. Os ramos do terço inferior foram cortados para obter amostras de menor tamanho e posteriormente foram processados de acordo com técnicas dendrocronológicas padrão. Inicialmente foi realizada a preparação da superfície para aumentar a visibilidade das zonas de crescimento tanto quanto possível, através de métodos de lixamento usando lixas com grades progressivamente mais finas (até 600 grit); para posteriormente identificar sob lupa estereomicroscópica os anéis formados.

Cada seção foi dividida em três eixos para verificar os limites entre anéis circunferencialmente, além de contar com três repetições das medições feitas. Tradicionalmente, a detecção entre os limites dos anéis e a medição da largura destes é realizada usando equipamentos compostos por um estereoscópio, mesa móvel e um gravador de dados (FABIJANSKA et al., 2017), assim como foi feito usando o positiômetro digital LINTAB e o software TSAPWin; já que é um método preciso e confiável. No entanto, além do dado da largura de cada anel, foi determinada a área basal de crescimento, pois é uma variável que pode ser melhor correlacionada com a biomassa e carbono acumulado em cada seção de caule no tempo de estudo.

Para isso, as seções de caule foram escaneadas no escâner MUSTEK modelo SE A3 (Figura 3 - B), em diferentes resoluções de imagem (600, 1200 e 2400 dpi) com o objetivo

de encontrar a melhor resolução suportada pelo software de análise de imagem conhecido como ImageJ, sendo que embora as imagens de 2400 dpi sejam as melhores, o software suporta apenas as imagens de 600 dpi.

Em seguida, a escala no software foi calibrada a partir de uma medida de longitude conhecida para garantir valores corretos de área. Além disso, a área também foi calculada através dos valores de largura de cada um dos anéis (raio), com a finalidade de correlacionar os valores calculados matematicamente dos valores determinados a través do software. Já que foi obtida uma alta correlação ($R^2=0.96$), foram usados os dados calculados matematicamente.

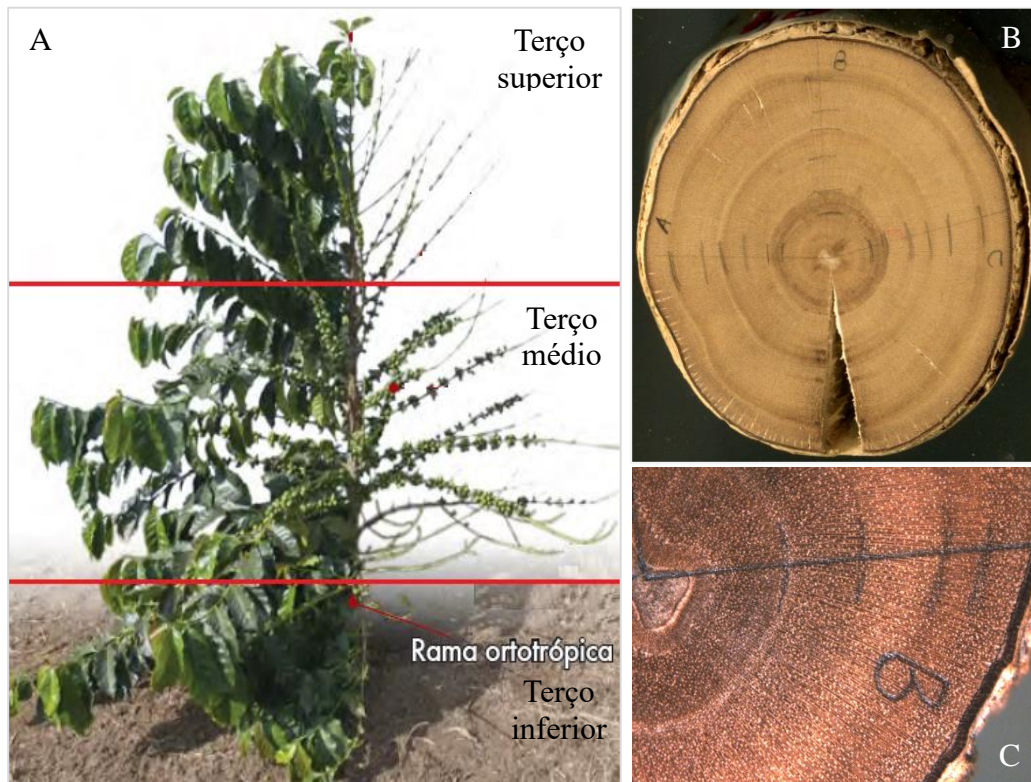


Figura 3. (A) Árvore de café mostrando seções de amostragem para análise de anéis de crescimento (B) Seção transversal da base da árvore após a preparação da superfície revelando os anéis (C) Anéis de crescimento visualizados no microscópio (0.67X)

3.5 Dados Climáticos

Os dados climáticos foram obtidos das estações agrometeorológicas da Universidade Federal de Lavras, da Fazenda Experimental da Fundação Procafé e do banco de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2017) do qual foram usados os dados da estação número 83687 de Lavras-MG para expressar a climatologia da região sul de Minas. Foram considerados os dados de precipitação, temperatura mínima, temperatura média, temperatura máxima, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Com esses dados, foi calculada a evapotranspiração a partir do software ETo Calculator, para obter o balanço hídrico dos anos em estudo.

ETo Calculator foi desenvolvido pela Divisão de Terra e Água da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação - FAO. Sua principal função é calcular a evapotranspiração de referência (ETo) de acordo com os padrões da FAO, a partir de dados meteorológicos por meio da equação de Penman-Monteith. Este método foi selecionado como referência porque se aproxima à taxa de evapotranspiração da superfície de referência e incorpora explicitamente parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos (FAO, 2018).

3.6 Análise de Dados

3.6.1 Correlação entre crescimento e variáveis climáticas

Usando o software estatístico R (V 3.4.3), foram realizadas correlações entre os dados de crescimento secundário e as variáveis climáticas a fim de encontrar as relações que melhor explicam essas interações. Foi calculada a correlação de Pearson com um nível de significância de 0.05 entre os dados de área e os dados proporcionados pelas estações agrometeorológicas, além dos dados de temperatura máxima do mês mais quente e temperatura mínima do mês mais frio, calculados a partir dos iniciais. Adicionalmente, foi feita uma correlação temporal “time lag”, com a finalidade de estabelecer a influência do clima na estação de crescimento do ano seguinte, calculando a mesma correlação entre os dados de crescimento com os dados climáticos do ano anterior.

3.6.2 Alometria

A partir dos dados de incremento anual em área dos anéis de crescimento, e os dados de altura da planta e altura da copa; foi calculada a correlação entre crescimento primário e secundário. Adicionalmente calculou-se correlações com os dados de índice de área foliar e número de folhas. Posteriormente, foi estabelecida uma relação matemática que relaciona o crescimento primário e secundário das árvores.

3.6.3 Biomassa

Foi calculada a distribuição de matéria seca nas duas localidades ao longo dos anos em estudo. Posteriormente foi calculada a correlação de Pearson entre os dados de crescimento secundário e os dados de matéria seca da planta e cada uma das suas partes (ramos, folhas e frutos). A frequência de amostragem na Fazenda Experimental da Fundação Procafé, permitiu estabelecer o padrão de alocação/partição dos assimilados durante quase um ano (dezembro de 2016 a outubro de 2017), a partir dos dados de peso seco da planta e cada uma das suas partes, acompanhando a dinâmica de crescimento e fenologia das árvores em função da dinâmica climática da região.

A partir dos dados de diâmetro dos anéis de crescimento e de altura da planta, foi calculado o volume, a fim de correlaciona-lo com a área basal e pela sua vez com a massa seca e as variáveis climáticas. Devido à ausência de dados de altura em vários pontos ao longo dos ramos e sendo a forma que mais tem erro associado, o volume do caule foi calculado a partir dos dados de diâmetro dos anéis de crescimento e de altura da planta, usando a equação de um cilindro. Os dados de volume foram correlacionados com os dados de área basal e de massa seca de todas as partes da planta.

3.6.4 Análise estatística

Modelos de regressão linear e não linear são frequentemente utilizados para avaliar processos biológicos como o crescimento ao longo do tempo. Foram avaliados alguns modelos a fim de verificar qual deles apresenta melhor ajuste e permite identificar as principais variáveis climáticas associadas ao crescimento secundário e descreve-lo por meio de curvas de crescimento.

Principalmente foram utilizados modelos polinomiais e o modelo de crescimento não linear Logístico para relacionar algumas das variáveis climáticas com o incremento em área basal e o crescimento em altura, respectivamente. A equação de cada um dos modelos se apresenta na Tabela 1.

Foi ajustada a regressão entre os dados de área dos anéis de crescimento e as series climáticas, estabelecendo uma curva para cada combinação de dados (área/temperatura mínima, área/temperatura máxima, área/precipitação, etc.). Os coeficientes (a, b e c) de cada modelo foram calculados através do software Sigmaplot.

Tabela 1. Equação polinomial e do modelo de regressão não linear Logístico

Polinomial	$y=ax^2 + bx + c$
Logístico	$a/(1 + b*e^{(-cx)})$

No caso da equação polinomial de segundo grau, a forma geral da equação apresenta x como a variável, sendo a, b e c constantes, com $a \neq 0$ (caso contrário, a equação torna-se linear). O parâmetro a representa o coeficiente quadrático que determina mudanças na orientação; o parâmetro b representa o coeficiente linear que determina o ponto de viragem da parábola e o parâmetro c que representa o coeficiente constante e determina mudanças verticais no gráfico (y-intercepto).

No modelo não linear Logístico, o parâmetro a é o valor máximo esperado para a resposta, ou assíntota; o parâmetro b está relacionado com o intercepto e o parâmetro c está relacionado com a taxa média de crescimento da curva (PRUDENTE, 2009). Os parâmetros dos modelos foram avaliados estatisticamente pelos critérios de erro padrão, coeficiente de determinação e coeficiente de variação.

4. RESULTADOS

4.1 Dados climáticos

Foram considerados os dados de precipitação, temperatura mínima, temperatura média, temperatura máxima, umidade relativa do ar e velocidade do vento para o período de tempo entre 2009 e 2017, levando em consideração os anos desde que foram plantadas as árvores de café, até a época em que foram coletadas as amostras. Durante esse período, a temperatura mínima média foi de 15,9 °C com variações de $\pm 1,3$ °C, a temperatura máxima média foi de 27,6 °C com variações de $\pm 1,1$ °C, e a precipitação média foi de 1320 mm, sendo os anos de 2009 e 2011 os de maior precipitação e o período de 2016-2017 o de menor precipitação (Figura 4).

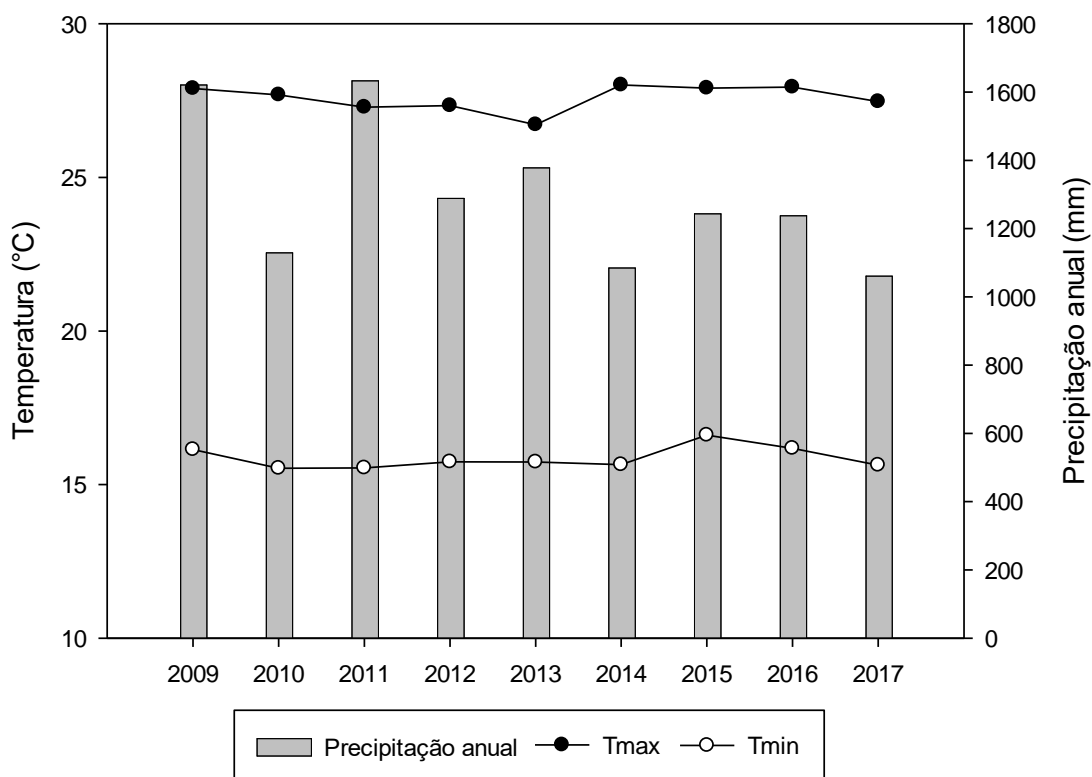


Figura 4. Precipitação anual e temperaturas máxima e mínima durante o período de estudo – Informação da estação meteorológica de Lavras – MG (INMET, 2017)

O intervalo de temperatura anual média ideal para o cafeeiro arábica reportado por DaMATTA et al., (2007), é de 18 - 21 °C, de forma que as médias anuais no período de estudo (20,3 –21,3 °C) se mantiveram dentro dos parâmetros que caracterizam a aptidão para a condução da cultura. Embora os intervalos de temperaturas mínimas (15,5 – 16,6°C) e máximas (26,7 - 28.1 °C) da região não se encontraram no intervalo ideal, estão dentro dos limites inferior e superior em que se apresentou o crescimento das árvores (Figura 5).

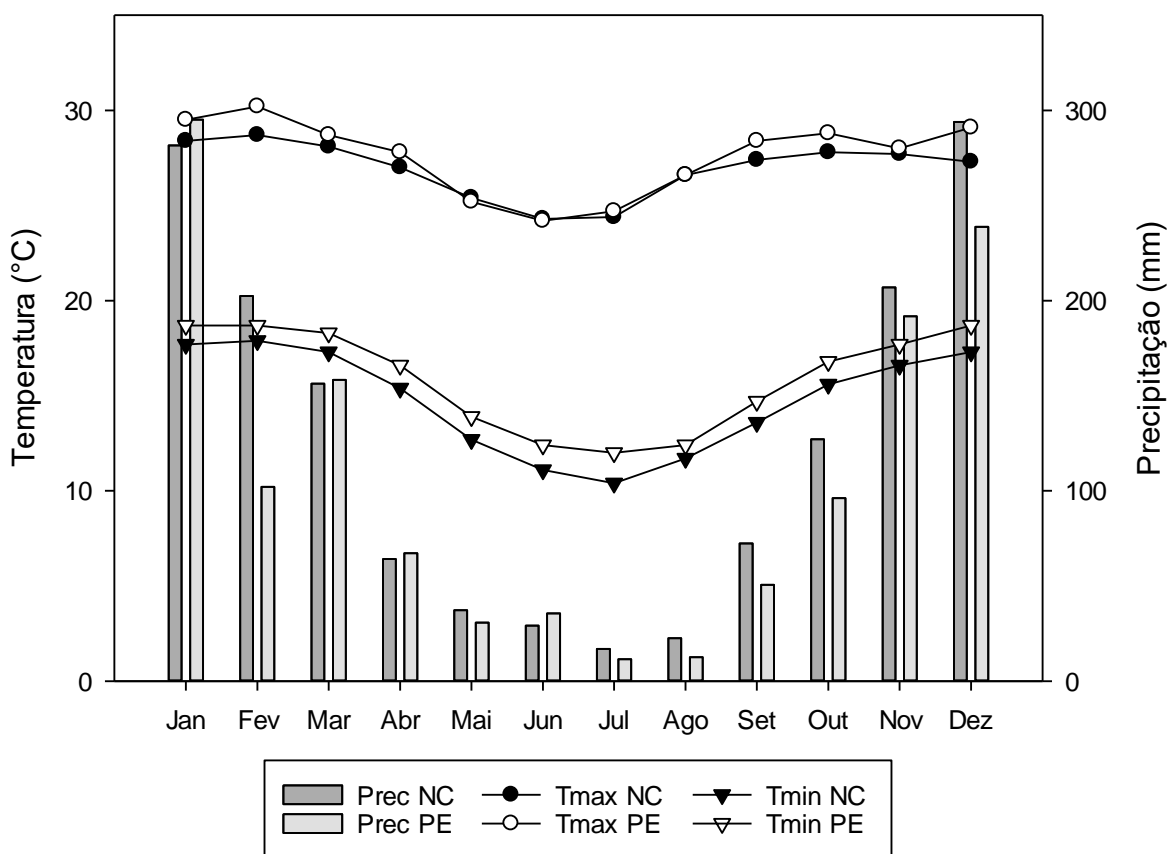


Figura 5. Variação intra-anual da precipitação e temperaturas máxima e mínima durante o período de estudo (PE), comparadas com os valores da normal climatológica (NC) de 1961-1990 – Informação da estação meteorológica de Lavras – MG (INMET, 2017)

A variação intra-anual durante o período de estudo apresenta a mesma tendência da normal climatológica (período 1961-1990) apresentada pelo INMET (2017), para as variáveis de precipitação, temperatura mínima e temperatura máxima; com variações na precipitação do mês de fevereiro e temperaturas mínimas maiores ao redor de $+1^{\circ}\text{C}$. O período de maior pluviosidade abarca os meses de outubro até março, com a estação seca entre abril e setembro e precipitações próximas a zero os meses de junho, julho e agosto (características da estação de inverno), nos quais também se apresentam os valores inferiores de temperatura mínima e máxima (Figura 5).

Com o cálculo da evapotranspiração no software ETo Calculator, foi possível calcular o balanço hídrico intra-anual do período em estudo (Figura 6), com valores superiores de evapotranspiração em relação à precipitação entre os meses de abril e outubro, com ênfase nos meses do inverno seco de junho, julho e agosto, época que precede o início das chuvas e na que seria esperada a retomada do crescimento.

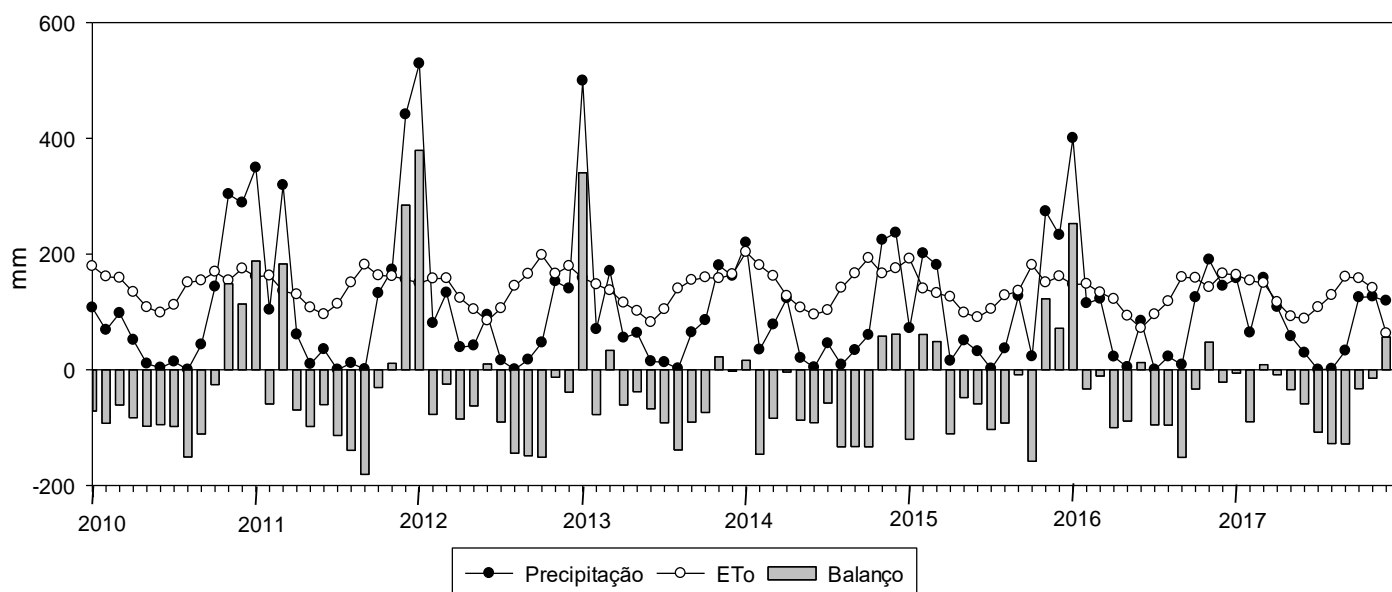


Figura 6. Balanço hídrico do período em estudo –Informação da estação meteorológica de Lavras – MG (INMET, 2017)

4.2 Análise dendrocronológica

Na Figura 7, é possível observar a variação da área acumulada para cada uma das localidades, levando em consideração que os valores apresentados pelas plantas da UFLA (A) são a média dos três eixos de cada unidade amostral ou seção de caule, enquanto que os valores apresentados de Varginha (B) são a média das quatro unidades amostrais por cada coleta e por sua vez, cada unidade representa a média dos seus três eixos. Deste modo, na área experimental da UFLA no período de tempo entre 2010 e 2016, a área média atingida foi de 16,42 cm² com um aumento médio na área basal de 2,3 cm² por ano; enquanto que na fazenda experimental de Procafé no período de tempo entre 2012 e 2017, a área média atingida foi de 7,14 cm² com um aumento médio na área basal de 1,19 cm² por ano.

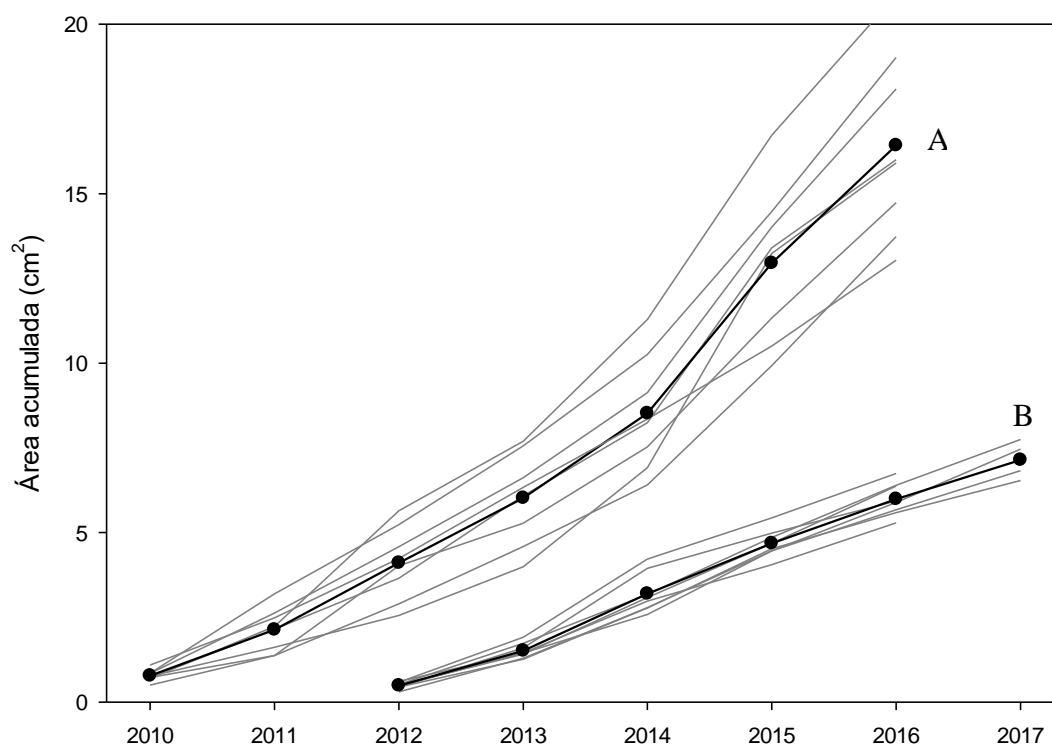


Figura 7. Área acumulada dos anéis de crescimento na UFLA/cultivar Mundo Novo (A) e em Varginha/cultivar Arara (B) - Valores para cada unidade amostral (linhas contínuas) e a média (linha com símbolos)

4.3 Correlação entre crescimento e variáveis climáticas

A correlação de Pearson foi realizada com um nível de significância de 0.05, entre as variáveis de área de anéis em relação aos parâmetros climáticos durante o período de estudo. As correlações obtidas na UFLA se mostram na Tabela 2, sendo que para esta localidade, os valores de área de anéis apresentaram correlações significativas com 6 das variáveis climáticas analisadas, sendo a correlação mais forte com a temperatura mínima.

Por sua vez, as correlações obtidas em Varginha se mostram na Tabela 3, sendo que para esta localidade, os valores de área de anéis apresentaram correlações significativas com 4 das variáveis climáticas analisadas, sendo a correlação mais forte com a média para cada ano das temperaturas máximas.

Tabela 2. Correlações de Pearson entre a área de anéis e os parâmetros climáticos - UFLA

Parâmetros	Área	Tmax	Tmin	Prec	MTmax	MTmin	TMMQ	TMMF
Área	1.00							
Tmax	0.42*	1.00						
Tmin	0.82*	0.42*	1.00					
Prec	-0.20	-0.62*	-0.18	1.00				
MTmax	0.48*	0.94*	0.57*	-0.62*	1.00			
MTmin	0.64*	0.23	0.83*	-0.10	0.40*	1.00		
TMMQ	0.53*	0.79*	0.49*	-0.58*	0.63*	0.36*	1.00	
TMMF	0.32*	0.38*	0.37*	-0.30*	0.45*	0.71*	0.32*	1.00

Tmax: temperatura máxima (°C); Tmin: temperatura mínima (°C); Prec: precipitação (mm); MTmax: média para cada ano das temperaturas máximas (°C); MTmin: média para cada ano das temperaturas mínimas (°C); TMMQ: temperatura máxima do mês mais quente (°C); TMMF: temperatura mínima do mês mais frio (°C). *p < 0.05

O ajuste das curvas e modelos foi feito entre as médias de área de anéis em relação às variáveis climáticas que apresentaram as maiores correlações. Assim, foi um modelo polinomial de segundo grau o que apresentou o melhor ajuste e conseguiu descrever a relação entre crescimento secundário e mudanças no clima, com ênfase na temperatura. Na Tabela 4 estão apresentadas as estimativas dos parâmetros do modelo, com os valores do erro padrão, o coeficiente de variação (CV) e o coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 3. Correlações de Pearson entre a área de anéis e os parâmetros climáticos - Varginha

Parâmetros	Área	Tmax	Tmin	Prec	MTmax	MTmin	TMMQ	TMMF
Área	1.00							
Tmax	0.53*	1.00						
Tmin	0.27	0.46*	1.00					
Prec	-0.45*	-0.59*	0.21	1.00				
MTmax	0.58*	0.94*	0.71*	-0.39*	1.00			
MTmin	0.25	0.21	0.78*	0.03	0.42*	1.00		
TMMQ	0.22	0.85*	0.35*	-0.39*	0.72*	0.21	1.00	
TMMF	0.57*	0.36*	0.38*	-0.37*	0.43*	0.75*	0.31*	1.00

Tmax: temperatura máxima (°C); Tmin: temperatura mínima (°C); Prec: precipitação (mm); MTmax: média para cada ano das temperaturas máximas (°C); MTmin: média para cada ano das temperaturas mínimas (°C); TMMQ: temperatura máxima do mês mais quente (°C); TMMF: temperatura mínima do mês mais frio (°C). *p < 0.05

Tabela 4. Estimativas dos parâmetros do modelo polinomial para as médias da variável área de anéis em relação às variáveis climáticas

Parâmetros	UFLA			VARGINHA		
	a	b	c	a	b	c
	Tmin			MTmax		
Valor	-1.57	53.52	-450.40	0.08	-4.36	58.23
Erro	2.E+00	5.E+01	4.E+02	1.84E+00	1.15E+02	1.81E+03
CV (%)	1.E+02	1.E+02	1.E+02	2.26E+03	2.64E+03	3.10E+03
R²	0.91			0.47		
	MTmin			TMMF		
Valor	0.14	-2.59	12.99	0.00	0.17	0.28
Erro	1.E+00	4.E+01	2.E+02	5.13E-02	6.54E-01	1.93E+00
CV (%)	1.E+03	1.E+03	2.E+03	1.61E+03	3.78E+02	6.83E+02
R²	0.54			0.47		
	TMMQ			Tmax		
Valor	0.25	-16.67	281.20	1.15	-62.28	846.50
Erro	4.E-01	3.E+01	5.E+02	7.28E-01	3.99E+01	5.46E+02
CV (%)	2.E+02	2.E+02	2.E+02	6.35E+01	6.41E+01	6.45E+01
R²	0.44			0.67		

Levando em consideração o coeficiente de determinação do modelo polinomial, na UFLA o melhor ajuste foi para a variável de temperatura mínima (Figura 8), que apresentou um coeficiente de determinação com valores em torno de 90%; seguido da média das temperaturas mínimas (Figura 9) com um coeficiente de determinação em torno de 55% e finalmente a temperatura máxima do mês mais quente (Figura 10) com um coeficiente de determinação em torno de 44%. As curvas apresentam o melhor ajuste para os dados obtidos em cada uma das variáveis.

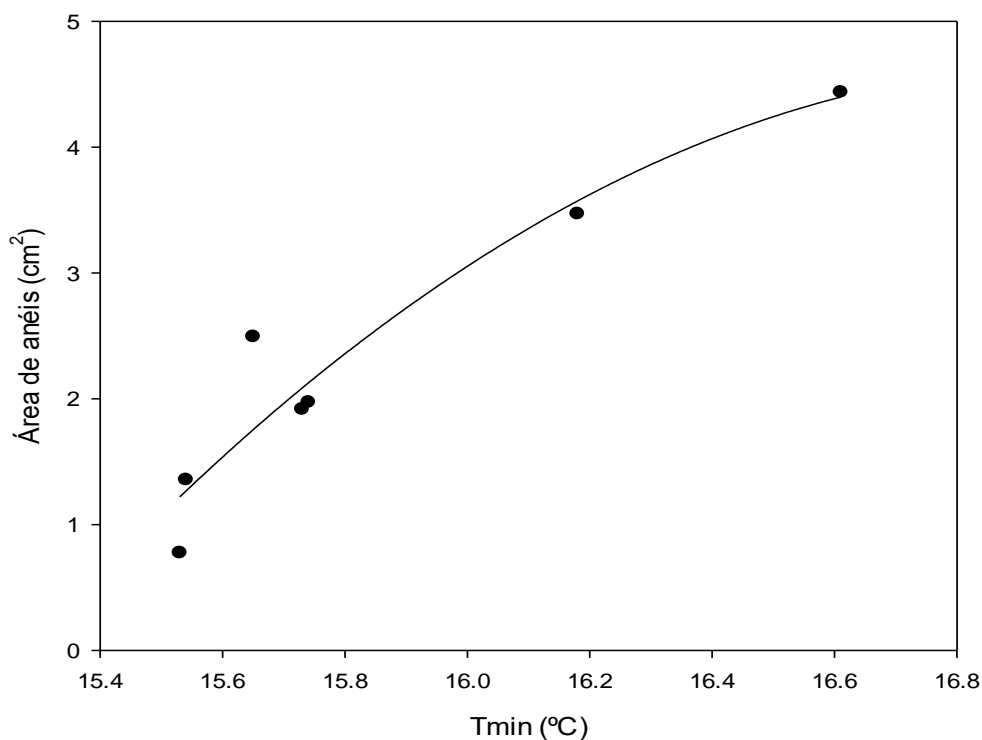


Figura 8. Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da temperatura mínima (Tmin) – Cultivar Mundo Novo, UFLA

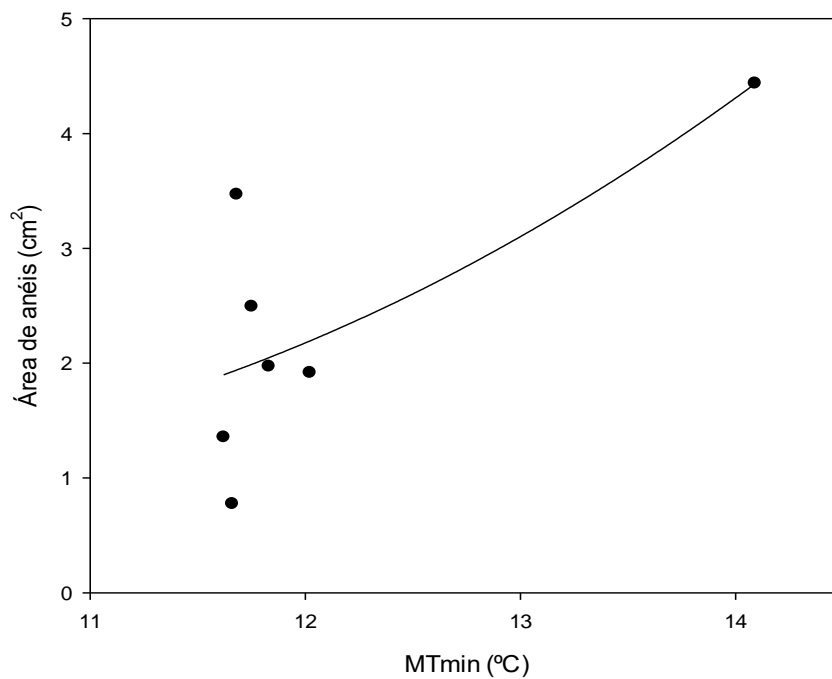


Figura 9. Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da média de temperaturas mínimas (MTmin) – Cultivar Mundo Novo, UFLA

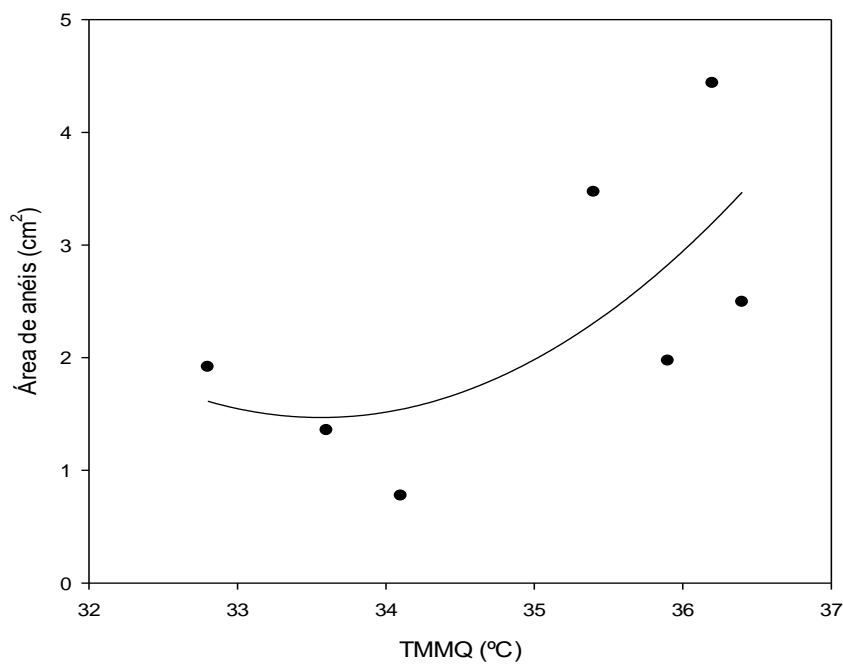


Figura 10. Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da temperatura máxima do mês mais quente (TMMQ) – Cultivar Mundo Novo, UFLA

Na fazenda experimental da Fundação Procafé em Varginha, levando em consideração o coeficiente de determinação do modelo polinomial, o melhor ajuste foi para a variável de temperatura máxima (Figura 9), que apresentou coeficientes de determinação com valores em torno de 90%; seguido da média das temperaturas máximas (Figura 10) com coeficientes de determinação em torno de 55% e finalmente a temperatura mínima do mês mais frio (Figura 11) com coeficientes de determinação também em torno de 4%. No geral, se apresentaram bons ajustes nas duas localidades, sendo a temperatura mínima a que apresentou melhor ajuste.

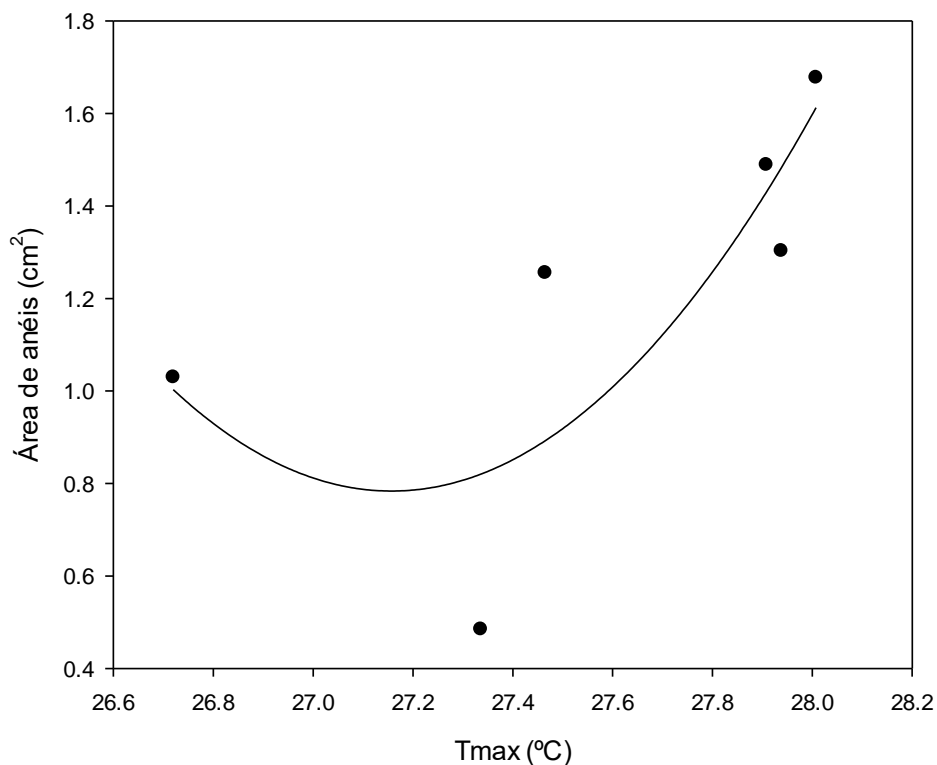


Figura 11. Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da temperatura máxima (Tmax) – Cultivar Arara, VARGINHA

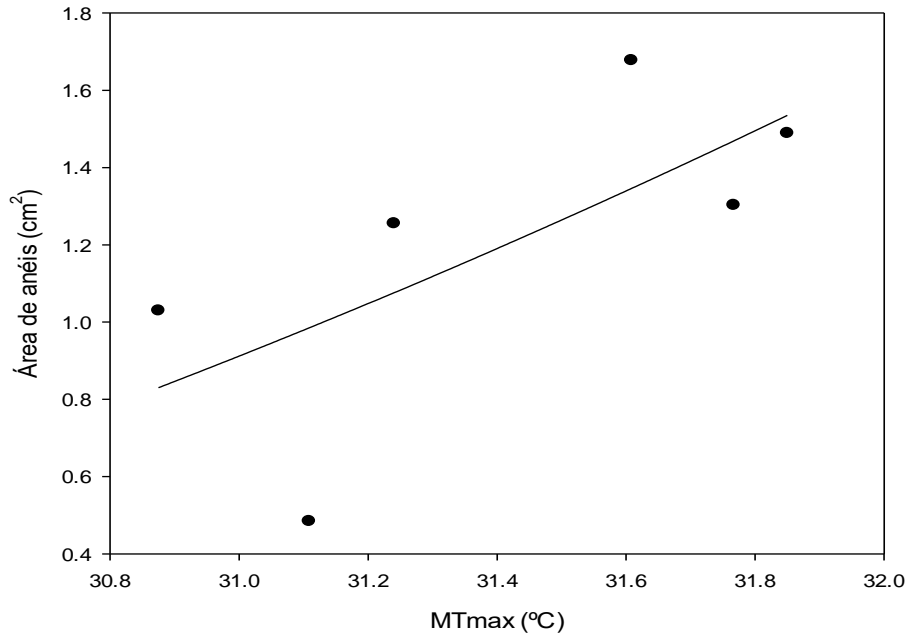


Figura 12. Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da média das temperaturas máximas (MTmax) – Cultivar Arara, VARGINHA

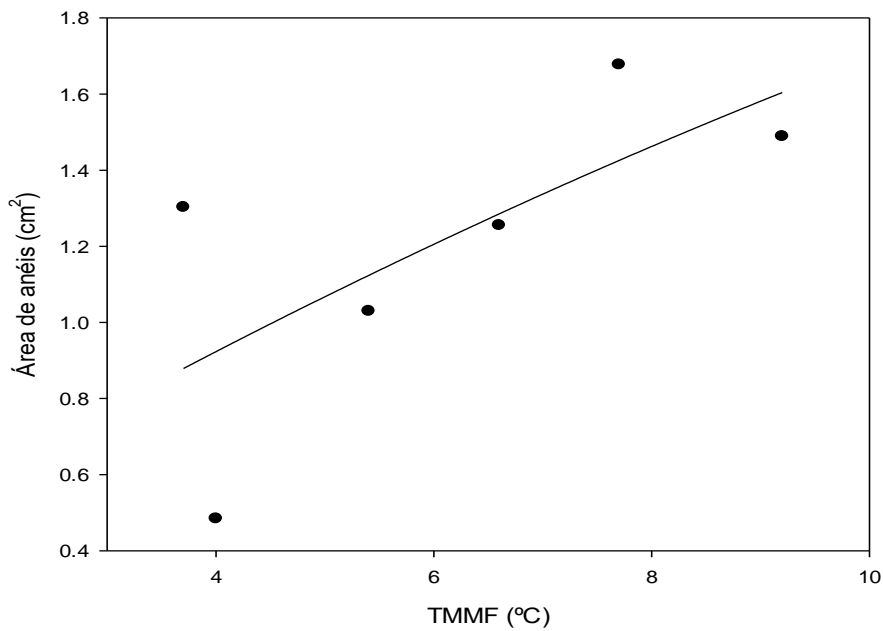


Figura 13. Ajuste do modelo polinomial de segundo grau aos dados de área de anéis de crescimento em função da temperatura mínima do mês mais frio (TMMF) – Cultivar Arara, VARGINHA

Adicionalmente, foi realizada a correlação de Pearson com um nível de significância de 0.05, entre as variáveis de área de anéis em relação aos parâmetros climáticos do ano anterior, a fim de avaliar a influência do clima na estação de crescimento do ano seguinte. As correlações obtidas nas duas localidades se mostram na Tabela 5, sendo que, na UFLA a temperatura máxima do mês mais quente, a temperatura mínima do mês mais frio e a precipitação poderiam ter influência sob o crescimento secundário da próxima estação de crescimento; em quanto em Varginha essa relação poderia estar relacionada só com a precipitação.

Tabela 5. Correlações de Pearson entre a área de anéis e os parâmetros climáticos do ano anterior

UFLA								
Parâmetros	Área	Tmax	Tmin	Prec	MTmax	MTmin	TMMQ	TMMF
Área	1.00							
Tmax	0.18	1.00						
Tmin	0.13	0.40*	1.00					
Prec	-0.50*	-0.30*	0.07	1.00				
MTmax	0.17	0.93*	0.53*	-0.38*	1.00			
MTmin	0.13	0.40*	0.99*	0.06	0.56*	1.00		
TMMQ	0.46*	0.73*	0.43*	-0.51*	0.60*	0.37*	1.00	
TMMF	0.64*	0.50*	0.48*	-0.52*	0.67*	0.54*	0.46*	1.00
VARGINHA								
Área	1.00							
Tmax	0.01	1.00						
Tmin	0.22	0.47*	1.00					
Prec	-0.59*	-0.61*	-0.34*	1.00				
MTmax	0.11	0.94*	0.72*	-0.58*	1.00			
MTmin	0.19	0.33*	0.90*	-0.23	0.57*	1.00		
TMMQ	0.09	0.87*	0.44*	-0.76*	0.76*	0.34*	1.00	
TMMF	0.23	0.52*	0.53*	-0.37*	0.63*	0.74*	0.40*	1.00

Tmax: temperatura máxima (°C); Tmin: temperatura mínima (°C); Prec: precipitação (mm); MTmax: média para cada ano das temperaturas máximas (°C); MTmin: média para cada ano das temperaturas mínimas (°C); TMMQ: temperatura máxima do mês mais quente (°C); TMMF: temperatura mínima do mês mais frio (°C). *p < 0.05

4.4 Relações alométricas

A correlação de Pearson foi realizada entre a área total (somatória das áreas de todos os anéis) e variáveis biométricas: altura (da planta e da copa), área foliar, número de folhas, entre outras. As correlações obtidas são apresentadas na Tabela 6 e Tabela 7. Nas duas localidades, não se apresentaram correlações significativas entre a área total e as outras variáveis, sendo que, há correlações significativas entre algumas delas.

Tabela 6. Correlações de Pearson entre a área total de anéis e variáveis alométricas - Área experimental da UFLA

Parâmetros	AreaT	Hplanta	Hcopa	IAF
AreaT	1.00			
Hplanta	0.60	1.00		
Hcopa	0.41	0.93*	1.00	
IAF	0.19	0.54	0.75*	1.00

AreaT: Área total de anéis (cm²); Hplanta: Altura da planta (m);
Hcopa: Altura da copa (m); IAF: Índice de área foliar. *p < 0.05

Tabela 7. Correlações de Pearson entre a área total de anéis e variáveis alométricas - Fazenda Fundação Procafé

Parâmetros	AreaT	Hplanta	NumFolhas	AF	NumPlag
AreaT	1.00				
Hplanta	0.09	1.00			
NumFolhas	-0.07	0.06	1.00		
AF	0.16	-0.05	0.86*	1.00	
NumPlag	0.26	0.21	-0.60	-0.69*	1.00

AreaT: Área total de anéis (cm²); Hplanta: Altura da planta (cm); NumFolhas: Número de folhas; AF: Área foliar; NumPlag: Número de plagiotrópicos *p < 0.05

Embora não foi obtida uma correlação significativa entre os dados de incremento anual em área dos anéis de crescimento e os dados de altura da planta, a fim de ter uma equação matemática que relacione o crescimento primário e secundário das árvores foi avaliado o ajuste do modelo logístico entre as duas variáveis. Na Tabela 8 estão apresentadas as

estimativas dos parâmetros do modelo, com os valores do erro padrão, o coeficiente de variação (CV) e o coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 8. Estimativas dos parâmetros do modelo Logístico para as variáveis de área total de anéis e altura total da planta

Parâmetros		Modelo Logístico		
		a	b	c
UFLA				
Área vs altura	Valor	216.40	-23.34	12.01
	Erro	3.18	16.42	0.73
	CV (%)	1.47	70.34	6.07
	R^2		0.73	
VARGINHA				
Área vs altura	Valor	118.70	-0.09	64.32
	Erro	1.E+05	6.E+01	1.E+06
	CV (%)	8.E+04	7.E+04	2.E+06
	R^2		0.014	

O melhor ajuste do modelo se apresentou na área experimental da UFLA, cujo coeficiente de determinação foi de 73%. Em relação às estimativas dos parâmetros, o valor máximo atingido da altura da planta (a) foi de 216.40 cm, com uma taxa de crescimento (c) de 12.01 e com o ponto de inflexão da curva teórico ($\frac{a}{2}$) de 108.20 cm (Figura 14).

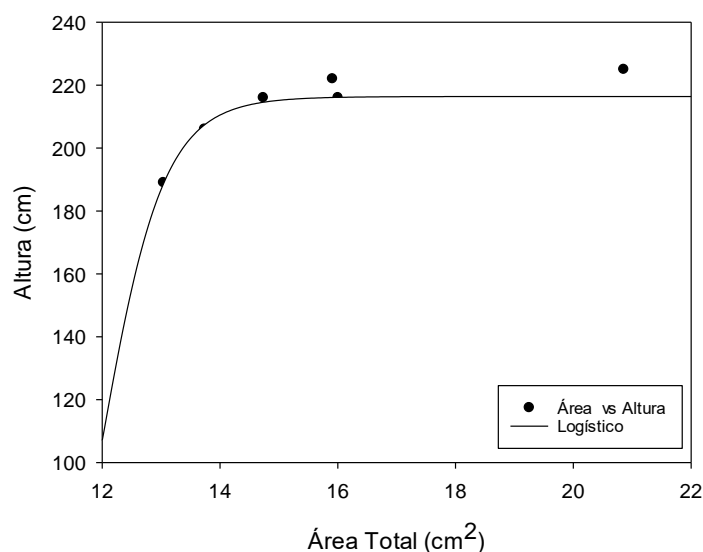


Figura 14. Ajuste do modelo Logístico aos dados de área total de anéis em função da altura da planta - Área experimental da UFLA

Em Varginha, o modelo não apresentou um bom ajuste com um coeficiente de determinação de 1.4%. O valor máximo atingido da altura da planta (a) foi de 118.70 cm, com uma taxa de crescimento (c) de 64.32 e com o ponto de inflexão da curva teórico ($\frac{a}{2}$) de 59.35 cm (Figura 15).

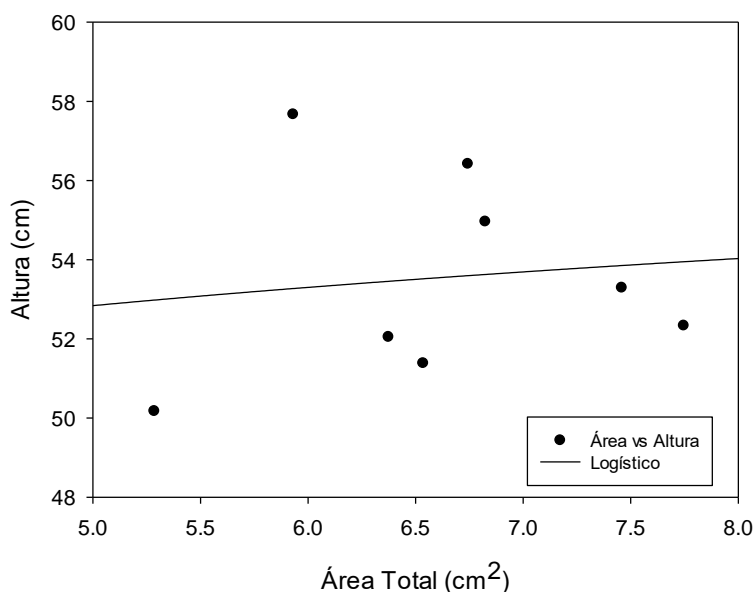


Figura 15. Ajuste do modelo Logístico aos dados de área total de anéis em função da altura da planta - Fazenda Fundação Procafé

4.5 Correlação entre crescimento e biomassa

A distribuição de massa seca durante o período de estudo na Fazenda Experimental da Fundação Procafé, se mostra na Figura 16. A frequência de amostragem permitiu determinar a partição dos assimilados na escala intra-anual (dezembro de 2016 a outubro de 2017), a partir dos dados de peso seco da planta e cada uma das suas partes. A figura mostra a dinâmica da distribuição de massa seca em relação da dinâmica climática da região. Os meses sem informação de massa seca, foram meses em que não se apresentaram coletas.

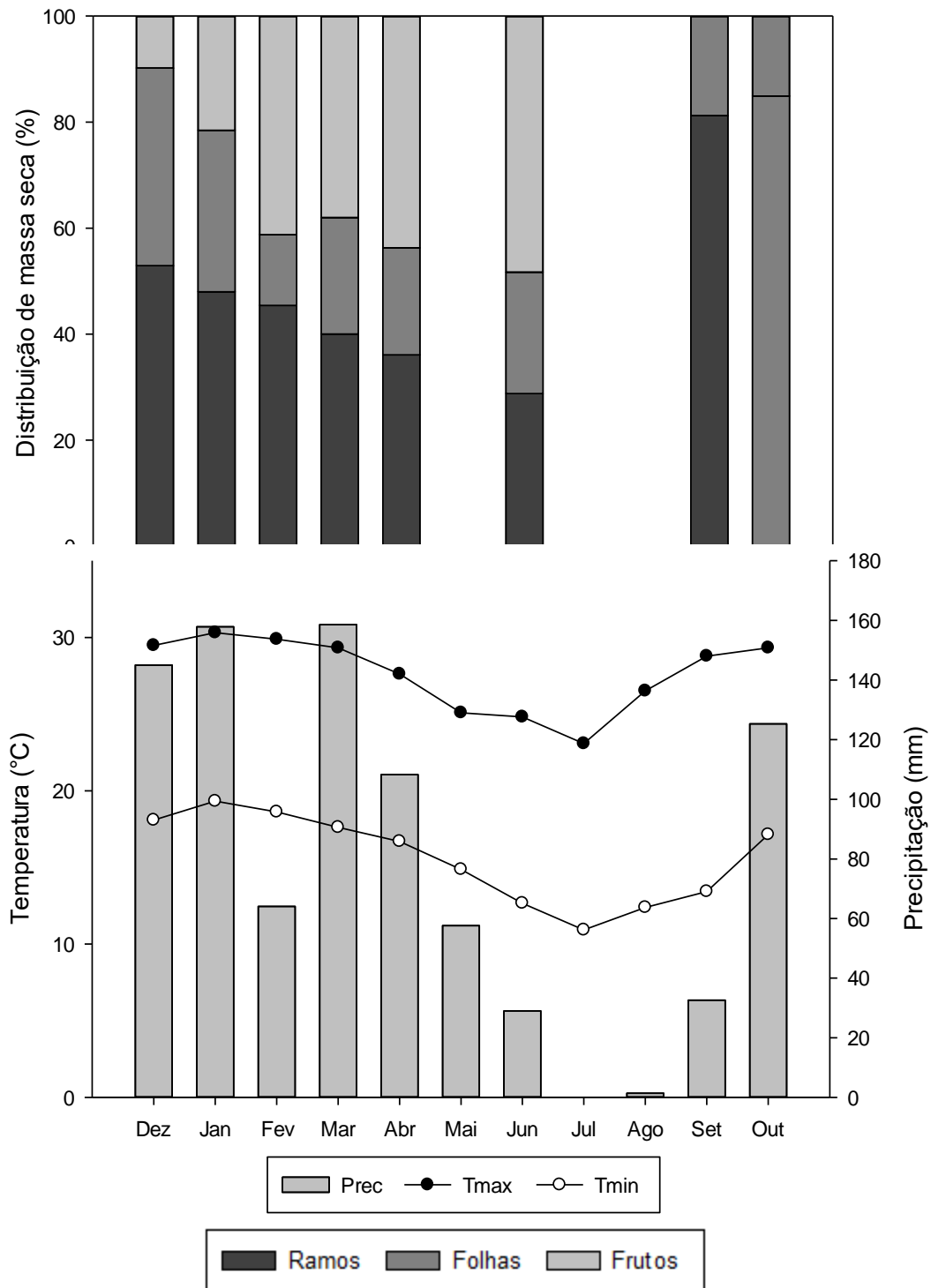


Figura 16. Distribuição de massa seca em relação à dinâmica climática na Fazenda Experimental em Varginha – Dez 2016/ Out 2017

A correlação de Pearson foi realizada entre as variáveis de área total (somatória das áreas de todos os anéis) e a massa seca das diferentes partes da planta. No caso da UFLA, as plantas foram divididas em tronco, galho, twig, folhas e frutos; enquanto que em Varginha as plantas foram divididas em ramos (ortotrópicos e plagiotrópicos), folhas e frutos. Em nenhuma das duas localidades foram obtidas correlações significativas entre crescimento secundário e o acúmulo de biomassa. As correlações obtidas se apresentam na Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9. Correlações de Pearson entre a área total de anéis e biomassa - Área experimental da UFLA

Parâmetros	Volume	AreaT	MS Tronco	MS Galho	MS Twig	MS Folhas	MS Frutos	MS Total
Volume	1.00							
AreaT	0.98*	1.00						
MS Tronco	0.17	0.12	1.00					
MS Galho	0.29	0.23	0.72*	1.00				
MS Twig	0.67	0.67	0.70*	0.68	1.00			
MS Folhas	0.31	0.43	0.53	0.32	0.64	1.00		
MS Frutos	-0.18	-0.31	-0.17	-0.07	-0.54	-0.69*	1.00	
MS Total	0.15	0.04	0.60	0.62	0.21	0.00	0.62	1.00

AreaT: Área total de anéis (cm²); MS: massa seca. *p < 0.05

Tabela 10. Correlações de Pearson entre a área total de anéis e biomassa - Fazenda Fundação Procafé

Parâmetros	Volume	AreaT	MS Ramos	MS Folhas	MS Frutos	MS Total
Volume	1.00					
AreaT	0.91*	1.00				
MS Ramos	0.62	0.63	1.00			
MS Folhas	0.31	0.28	0.03	1.00		
MS Frutos	-0.08	0.19	-0.11	0.67	1.00	
MS Total	0.16	0.37	0.15	0.81*	0.94*	1.00

AreaT: Área total de anéis (cm²); MS: massa seca. *p < 0.05

5. DISCUSSÃO

5.1 Análise climatológica

O intervalo de temperatura anual média ideal para o cafeeiro arábica reportado por DaMatta et al. (2007), é de 18 - 21 °C, de forma que dependendo da cultivar, temperaturas acima de 23 °C poderiam ocasionar perdas na qualidade devido ao aumento na velocidade do desenvolvimento e amadurecimento; enquanto que temperaturas inferiores a 17 °C poderiam ocasionar redução do crescimento. De tal modo, a temperatura média no período de estudo (Figura 4), oscilou nesse intervalo da temperatura anual média ideal (20,3 –21,3 °C), estando os intervalos de temperatura mínima (15,5 – 16,6°C) e temperatura máxima (26,7 - 28.1 °C) nos limites de temperatura ótima o que poderia de alguma forma afetar o crescimento das árvores dependendo do seu estágio de desenvolvimento.

Geralmente, com temperaturas favoráveis, o crescimento das árvores acompanha a distribuição das chuvas, de modo que, em municípios de Minas Gerais com distribuição pluviometria como Lavras ou Varginha, o crescimento apresenta uma taxa lenta durante a estação seca e fresca, rápida na estação chuvosa e quente e com a retomada do crescimento ativo precedendo o início das chuvas (DaMATTa et al., 2007). De acordo com os dados da estação meteorológica de Lavras (INMET, 2017), a precipitação média durante o período de estudo foi de 1320 mm, encontrando-se no intervalo de precipitação ótimo para o cafeeiro arábica (1200-1800 mm), embora alguns anos como 2016 e 2017 tiveram precipitações próximas a 1200 mm o limite inferior.

Além disso, a variação intra-anual ou periodicidade das variáveis climáticas está diretamente relacionada com o crescimento e desenvolvimento dos cafeeiros e no Brasil, com as condições de bienalidade na produção. O INMET (2017), tem reportadas as normais climatológicas dos períodos de 1931-1960 e 1961-1990 para cada um dos estados do Brasil, e deste modo, a partir desses dados foi possível expressar a climatologia para a região sul de Minas Gerais, sendo que, no geral, o período de estudo foi mais seco, com menos precipitação e com temperaturas mínimas mais elevadas que o normal em relação à normal climatológica 1961-1990 para a região (Figura 5).

Tem sido reportado que, em diferentes condições térmicas aptas para o café arábica, as gemas florais completam a maturação e entram em dormência, estando prontas para a antese principal, quando o somatório da evapotranspiração a partir de abril atinge cerca de 350 mm, sendo que em regiões com temperaturas médias anuais superiores a 20°C, a florada principal acontece no começo de setembro; enquanto que regiões com temperaturas médias anuais inferiores a 20°C, apresentam a florada principal no final de setembro ou no início de outubro (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Nos dados do balanço hídrico do período amostral (Figura 6), pode se observar que no período de estudo, os valores máximos de evapotranspiração calculados a partir do software ETo calculator atingem valores máximos de 200 mm nos meses de setembro – outubro, com os quais se apresentaram as floradas durante esses anos nos dos locais em estudo.

5.2 Análise dendrocronológica

A formação dos anéis de crescimento é o resultado da atividade cambial da árvore entre os períodos vegetativo e de repouso, portanto, requer a existência de um período de estresse fisiológico que em regiões temperadas está associado à mudança de estações ou períodos específicos de verão/inverno; enquanto que em regiões tropicais e subtropicais estaria associado a mudanças entre períodos chuvosos e secos (ENCINAS; FERNANDES; RODRIGUES, 2005). Assim, se esperaria a formação de um novo anel depois da estação seca e com a retomada do crescimento que é precedida com o início das chuvas.

Na área experimental da UFLA, as plantas foram plantadas em janeiro de 2011 e as amostras coletadas no médio do ano de 2016, de forma que em média, apresentaram 7 anéis de crescimento completos, correspondendo o primeiro deles ao tempo de plântula e em seguida, um anel por cada ano de crescimento das árvores, com uma taxa média de incremento anual em área de 2,3 cm² por ano; sendo em termos de crescimento relativo, os períodos de 2010/2011 e 2011/2012 os que apresentaram as maiores taxas de crescimento com valores de área de até o dobro em relação ao ano anterior, e o período de 2015/2016 o que apresentou a menor taxa de crescimento em área com um aumento em média percentual de 27% (Figura 7).

Na fazenda da Fundação Procafé em Varginha, as plantas foram plantadas em março de 2013 e as amostras coletadas mensalmente desde dezembro de 2016 até outubro de 2017, de forma que em média, apresentaram 5 anéis de crescimento completos, correspondendo o primeiro deles ao tempo de plântula e em seguida, um anel por cada ano de crescimento das árvores até o ciclo completo de crescimento do 2015/2016. Nas últimas coletas (setembro e outubro), algumas amostras apresentaram um anel a mais, que em alguns casos encontrava-se completo e em outros não. A taxa média de incremento anual em área foi de 1,19 cm² por ano, e em relação ao crescimento relativo, o período de 2012/2013 apresentou as maiores taxas de crescimento, e o período de 2015/2016 o que apresentou a menor taxa de crescimento em área com um aumento em área inferiores a os outros anos (Figura 7).

5.3 Correlação entre crescimento e variáveis climáticas

As correlações de Pearson entre a área dos anéis e as variáveis climáticas, assim como o ajuste dos modelos polinomiais e Logístico, mostraram que em nenhuma das duas localidades se encontraram boas correlações entre o crescimento secundário visto como aumento em área basal e a precipitação, sendo que a maior parte das correlações significativas foram com a temperatura, assim que, as plantas têm um melhor desenvolvimento quando as variações térmicas e os valores extremos de temperaturas não exercem qualquer efeito negativo sobre suas funções (SILVA et al., 2004; DaMATTA et al., 2007; ALVES; MAZZAFERA, 2008).

Foi um modelo polinomial o que apresentou o melhor ajuste e conseguiu descrever a relação entre crescimento secundário e mudanças no clima, com ênfase na temperatura (Figura 8). Esse tipo de modelos tem sido utilizados em diversos tipos de estudos como os desenvolvidos por Melesse e Zewotir (2017), que avaliaram a variação no potencial de crescimento de diversos híbridos de eucalipto na África do Sul, a fim de estimar a vantagem média de crescimento radial de uns clones em relação a outros, o que indicaria melhor potencial genético para rápido crescimento e produção. Foi desenvolvida uma abordagem de modelagem mista em que foi determinado que o modelo que melhor representou a relação entre o crescimento secundário (aumento do raio do caule) e a idade das árvores foi o modelo polinomial de segundo grau; o que representa um ponto de partida para comparar o potencial

de crescimento rápido de vários clones híbridos usando a abordagem de modelagem de dados longitudinais.

Por sua vez, Zhang et al. (2018), avaliaram a relação entre o clima e a idade e crescimento radial de uma espécie florestal (*Picea crassifolia* Kom.) nas montanhas do noroeste da China, a fim de conhecer a sensibilidade climática dessas variáveis. Assim, foram calculados coeficientes de correlação de Pearson entre as cronologias de crescimento das arvores e os fatores climáticos, para posteriormente avaliar a resposta do crescimento radial ao clima através de ajustes lineares, polinomial quadrático e exponencial. Foi concluído que dependendo da idade existe uma sensibilidade mais forte a umas variáveis climáticas em relação a outras, sendo o ajuste polinomial quadrático o que representou o melhor ajuste entre as variáveis estudadas.

Entre as duas localidades, a correlação mais forte entre a área de anéis e o clima foi com a temperatura mínima na área experimental da UFLA (Tabela 2), sendo que, com a temperatura mínima maior (no ano 2015) foram encontrados os maiores valores de área individual de anéis, assim como a menor taxa de crescimento (período 2015/2016), o que poderia estar relacionado com um aumento de até 1°C na temperatura mínima nos anos 2015 e 2016 em relação aos outros anos do período de estudo. Além disso, é possível observar na curva do modelo (Figura 8), que com temperaturas superiores, não seriam alcançados valores superiores de área, pois os valores obtidos já estão na fase de estabilização da curva.

Craparo et al. (2015), avaliaram o efeito de mudanças climáticas na produção de café Arábica em locais produtores de Tanzânia, demonstrando que o aumento da temperatura mínima tem uma influência significativa na fisiologia do crescimento e produção das plantas em cada uma das fases fenológicas, além de ser a variável climática mais significativa responsável pela diminuição dos rendimentos no período de tempo estudado (1961-2012); de modo que, todo aumento de 1°C na temperatura mínima resultaria em perdas de rendimento anual de $137 \pm 16,87 \text{ kg ha}^{-1}$.

Nesse estudo, a temperatura apresentou maior correlação com a produção e o rendimento de café do que outras variáveis tipicamente consideradas como estresse por seca ou precipitação. Foram avaliados seis modelos de regressão múltipla para investigar a relação

entre o clima em mudança e a produção de café, sendo que, a função que melhor descreveu essa relação, foi uma função sigmoide proveniente de um modelo logístico. Assim, considera-se que a sensibilidade particular do café Arábica ao aumento da temperatura mínima pode ser crucial para a concepção de práticas inteligentes e estratégias de adaptação (GAY et al., 2006).

Resultados similares tem se apresentado em árvores de espécies florestais. Zhang et al. (2014), desenvolveram uma cronologia de anéis de crescimento de 1343 anos a partir de espécies florestais das montanhas tibetanas e múltiplos proxies de clima, a fim de compreender as variações climáticas ao longo do último milênio, para avaliar o aquecimento global atual e prever futuras mudanças de temperatura. As implicações climáticas da cronologia foram investigadas usando diversas análises de correlação revelando que o crescimento radial das árvores foi principalmente controlado pela temperatura, especialmente pela temperatura mínima (correlação de 0.76). Resultados similares foram reportados por Yang e Datsenko (2013), quem na mesma região encontraram que a temperatura mínima é a responsável pelo maior crescimento radial de diversas espécies florestais.

Por sua vez, na fazenda da Fundação Procafé em Varginha, a correlação mais forte entre a área de anéis e o clima foi com a temperatura máxima (Tabela 3), de forma que, os valores de área obtidos a partir das temperaturas máximas do período de estudo, encontram-se na fase de final da curva (Figura 11). Embora autores como DaMatta e Ramalho (2006), reportam que a planta do café possui tolerância a temperaturas elevadas, com taxas de fotossíntese e de crescimento máximas ao longo da estação quente como ocorre nas principais áreas produtoras do Brasil; diversos estudos tem reportado a temperatura máxima como responsável por efeitos negativos no crescimento e fotossíntese das árvores.

Jiménez-Torres e Massa-Sánchez (2016), analisaram a resposta na produção da cultura de café à variabilidade climática no Equador, através de um modelo econométrico de séries temporais mensais, concluindo que existe uma relação inversa entre produção e temperatura máxima, pois se a temperatura máxima aumentar em 1%, a produção de café diminui 2,5%. Estudos similares são necessários para melhorar ainda mais a compreensão da sensibilidade do crescimento dos cafeeiros à mudanças drásticas na temperatura.

Resultados similares tem se apresentado em árvores de espécies florestais. Schippers et al. (2015), parametrizaram o modelo de crescimento de árvores (IBTREE) em uma espécie da floresta tailandesa (*Toona ciliata*), para desvendar os efeitos climáticos na variação do crescimento do caule, concluindo que a temperatura máxima teve um forte efeito negativo no crescimento do caule, aumentando a respiração, reduzindo a condutância estomática e, assim, atenuando uma maior demanda de transpiração e, em menor grau, reduzindo diretamente a fotossíntese.

5.4 Correlação entre crescimento e alometria

As correlações de Pearson entre a área total dos anéis e as medições alométricas mostraram que, em nenhuma das duas localidades se encontraram correlações significativas entre o crescimento secundário (aumento em área basal) e o crescimento primário (a altura da planta). Na UFLA, a correlação entre as duas variáveis foi alta (0.60) mas estatisticamente não foi significativa (Tabela 6), embora o ajuste do modelo logístico tenha sido bom. Com os valores obtidos de área total, os valores de altura da planta encontram-se na fase de estabilização da curva de crescimento e a equação da curva é $216.4/(1-23.34*e^{(-12.01x)})$ (Figura 14).

Estudos desenvolvidos em espécies florestais, tem mostrado a relação entre crescimento primário e secundário e as variáveis climáticas. Pinto, Dhote e Hervé (2016), avaliaram o impacto diferenciado do clima e do solo no crescimento primário e secundário do abeto de prata (*Abies alba* Mill.) no nordeste da França, através de variáveis dendrométricas, climáticas e do solo, utilizando uma análise de regressão múltipla. Destacaram que a relação entre fatores ambientais e crescimento em altura é diferente da relação com o crescimento radial pois o crescimento em altura está fortemente correlacionado com variáveis climáticas (elevação, temperatura, etc.) e fatores nutricionais; enquanto a o crescimento radial apresentou uma correlação fraca com os efeitos ambientais.

Além disso, equações alométricas tem sido usadas como uma ferramenta comum para quantificar e monitorar os estoques de carbono nos ecossistemas florestais, de forma que estudos similares são necessários e poderiam ser aplicados para quantificar, monitorar e melhorar a compreensão da dinâmica do carbono em cafeeiros em condições de campo.

Fonton et al. (2016), avaliaram dezesseis modelos de equações alométricas a fim de determinar as melhores equações para quantificar e monitorar a quantidade de carbono armazenada nos ecossistemas florestais a partir de dados de diâmetro, altura, densidade da madeira e biomassa, procedentes do inventário florestal da floresta tropical africana. Os resultados destacam que nessas equações, a função potência é a que melhor modela a biomassa acima do solo, enquanto a função logarítmica em relação ao diâmetro deve ser evitada porque leva ao pior ajuste e à maior incerteza na predição; além de que a altura da árvore é uma boa variável preditora só sobre a predição da biomassa em torno de 8 t/ha.

Vieilledent et al. (2012), avaliaram modelos genéricos empíricos que tem sido utilizados para estimar a biomassa florestal e o carbono em todo o mundo, aplicados em 481 árvores nas florestas secas de Madagascar, demonstrando que, entre os modelos alométricos genéricos disponíveis, o modelo que inclui o diâmetro, a altura e a gravidade específica da madeira como variáveis explicativas, foi o único que deu estimativas precisas da biomassa das árvores, com estimativas comparáveis às obtidas com modelos alométricos regionais.

5.5 Correlação entre crescimento e biomassa

Tradicionalmente na região, o período entre setembro e março, caracteriza-se por ser o período de maior pluviosidade e por apresentar dias longos com fotoperíodos acima de 13 horas luz, apropriados para a fase de vegetação e formação das gemas florais/ ou para a fase da florada e granação dos frutos, sendo um processo mais forte que o outro dependendo da bienalidade; enquanto que o período entre abril e agosto, caracteriza-se por ser o período de menor pluviosidade e por apresentar dias curtos, apropriados para a indução e maturação das gemas florais/ ou a expansão e maturação dos frutos nos meses de abril, maio e junho (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

A distribuição de massa seca em escala intra-anual durante o período de estudo na Fazenda Experimental da Fundação Procafé em Varginha, acompanha a climatologia da região e mostra o aumento progressivo de massa seca alocada nos frutos nos meses em que tradicionalmente na região se apresenta a granação e maturação dos frutos, começando em dezembro na fase final de expansão, o período de janeiro a março com a granação e no período de abril a junho com a fase de maturação e colheita. Posteriormente, nos meses de

repouso não foi feita a amostragem e nos meses de setembro e outubro, a maior parte da massa seca se encontra nos ramos, já que começa a nova fase de vegetação.

As fases de expansão, granação e maturação dos frutos estão acompanhadas por uma diminuição progressiva da pluviosidade, além de um descenso nas temperaturas máxima e mínima, até chegar aos meses do inverno, em que se apresenta a fase de repouso, com precipitações próximas a zero e as temperaturas mais baixas durante o ano; para finalmente a nova fase vegetativa estar acompanhada por o aumento nas precipitações e o aumento das temperaturas.

Embora é possível caracterizar a partição de massa seca para o ano de amostragem, com os dados para cada ano no período de estudo (2010-2017), seria mais fácil caracterizar as mudanças nos padrões de partição de biomassa em função das mudanças climáticas nesse mesmo período, por exemplo com o aumento na temperatura mínima o com a diminuição da pluviosidade anual. Não obstante, a partir dos dados das mudanças do diâmetro do caule derivadas dos anéis de crescimento e a altura da árvore, é possível ter uma ideia do incremento em biomassa, calculando o produto do aumento do volume e da densidade da madeira. Assim, diferentes controles climáticos se aplicam ao crescimento radial e à densidade média do anel, e portanto, a variabilidade de ambos é necessária para estimar com precisão o incremento anual de biomassa (BABST et al., 2014).

Tradicionalmente, o volume do caule das árvores pode ser descrito através de equações de afilamento que descrevem matematicamente o perfil longitudinal do tronco, levando em consideração a taxa de decréscimo do diâmetro ao longo dele, possibilitando estimar o diâmetro a uma altura qualquer e assim estimar o volume para diversas espécies e condições (SILVA; DALLA; SANQUETTA, 2011; VIEILLEDENT et al., 2012). Deste modo, o cálculo compreende o somatório dos volumes de pequenas partes do tronco, sendo necessários vários pontos ao longo do fuste para representar com precisão sua forma.

As correlações de Pearson mostraram que, nas duas localidades foi obtida uma correlação significativa entre o volume e a área basal, mas não foram obtidas correlações significativas entre o volume e a massa seca.

É preciso levar em consideração que os vários componentes da alocação de carbono resultam de muitos processos interagentes e mudanças na biomassa, concentração, fluxo ou partição podem ser explicados a partir de diversas relações matemáticas (SEVANTO; DICKMAN, 2015). Assim, com equações matemáticas obtidas entre as variáveis climáticas e a área, e a alta correlação entre o volume e a área, seria possível associar eventos extremos ou eventos climáticos com mudanças na área e no volume do tronco e ter uma ideia de mudanças na biomassa.

6. CONCLUSÕES

A caracterização da influência das condições climáticas no crescimento secundário, no período e regiões avaliadas, permite afirmar que, o incremento na temperatura mínima ao longo do período em estudo, foi o fator que teve a maior influência no aumento na taxa de crescimento secundário anual dos cafeeiros, sendo que, o modelo que melhor representou essa relação foi um modelo polinomial de segundo grau. O aumento na taxa de crescimento secundário está diretamente relacionada com o cultivar e as características dos locais e poderia estar associada ao aumento na taxa fotossintética.

É preciso um conjunto robusto de informações para estabelecer uma relação direta entre o crescimento secundário e a alocação de carbono, que permita avaliar as mudanças nos padrões de alocação nos cafeeiros nos seus diferentes níveis (folhas, frutos, caules) frente a anos com mudanças ou eventos climáticos extremos. Neste trabalho, essa relação foi derivada dos dados de área de anéis de crescimento e o acúmulo de massa seca nas diferentes partes da planta, encontrando baixas correlações entre as variáveis além da ausência de outras informações que poderiam melhorar o ajuste da relação entre os dados.

Deste modo, além da informação coletada é preciso levar em consideração os dados das mudanças do diâmetro do caule e a altura das árvores a fim de calcular o aumento em volume, já que a variabilidade nessas duas variáveis é necessária para estimar com precisão o incremento anual em biomassa e sua relação com o crescimento secundário; permitindo verificar como a alocação de carbono é afetada nos cafeeiros frente a variações ambientais.

É importante ressaltar que o trabalho aborda novas metodologias que embora sejam usadas na pesquisa em outras áreas como as ciências florestais, não tinham sido implementadas na pesquisa na cafeicultura como são o uso da dendrocronologia, além de como foi sugerido, o desenvolvimento de uma equação de afilamento para café que permita calcular as mudanças no perfil longitudinal do tronco, possibilitando estimar o volume em todos os cultivares e condições de plantio.

O uso integrado de metodologias de modelagem, da teoria alométrica e da dendrocronologia, abre um novo horizonte na pesquisa e desenvolvimento de trabalhos futuros que levem em consideração o investimento diferencial de carbono nos cafeeiros em

função das mudanças nas áreas tradicionalmente aptas para a cafeicultura devido a eventos climáticos extremos e à variabilidade climática.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSAD, E. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, Nov. 2004.
- ALVARES, C. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n 6, p. 711–728, Jan. 2014.
- BABST, F. et al. Above-ground woody carbon sequestration measured from tree rings is coherent with net ecosystem productivity at five eddy-covariance sites. **New Phytologist**, Bern, v. 201, p. 1289–1303, Apr. 2014.
- BACA, M. et al. An integrated framework for assessing vulnerability to climate change and developing adaptation strategies for coffee growing families in Mesoamerica. **Plos One**, Cali, v. 9, n. 2, p. 1-11, Feb. 2014.
- BENISTON, M. Climate modeling at various spatial and temporal scales: where can dendrochronology help? **Dendrochronologia**, Fribourg, v. 20, P. 117-131, 2002.
- BRIDSON, D. M.; VERDCOURT, B. Flora of tropical East Africa: Rubiaceae: part 2. Cape Town: Iziko Museums of Cape Town, 1988. 1177 p.
- BUNN, C. et al. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. **Climatic Change**, Berlin, v. 129, p. 89-101, Dec. 2015.
- CAMARGO, A.; CAMARGO, M.B.P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro Arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, Mar. 2001.
- CAMARGO, M.B.P. The impact of climatic variability and climate change on Arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 1, p. 239-247, Dec. 2010.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra Brasileira. **Primeiro levantamento Safra 2018**, Brasília, v. 5, n.1, 72 p. Jan. 2018.
- CRAPARO, A. C. W. et al. Coffea arabica yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications. **Agricultural and Forest Meteorology**, Witwatersrand, v. 207, p. 1–10, Mar. 2015.

DaMATTA, F. M. et al. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Viçosa, v. 19, n. 4, p. 485-510, Mar. 2007.

DaMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Viçosa, v. 18, n. 1, p. 55-81, Mar. 2006.

FABIJANSKA, A. et al. Towards automatic tree rings detection in images of scanned wood samples. **Computers and Electronics in Agriculture**, Krakow, v. 140, p. 279–289, Jun. 2017.

FAO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO. AquaCrop, the crop-water productivity model. em: <http://www.fao.org/aquacrop>. Acesso em: abr 2018.

FONTON, N. H. et al. Analyzing accuracy of the power functions for modeling aboveground biomass prediction in Congo basin tropical forests. **Open Journal of Forestry**, v. 7, p. 388-402, Sept. 2017.

FRANKLIN, O. et al. Modeling carbon allocation in trees: a search for principles. Invited review: Part of an invited issue on carbon allocation. **Tree Physiology**, Laxenburg, v. 32, p. 648–666, Jan. 2012.

FRIEND, A.; COLEMAN, M.D.; BEBRAND, J.G. Carbon allocation to root and shoot systems of woody plants. **Biology of Adventitious Root Formation**, New York, p. 245-273, 1994.

GASPAR, R.O. et al. Dendrocronologia na análise do crescimento em diâmetro, volume, biomassa e dióxido de carbono no Cerrado. **Nativa**, Brasília, v.4, n.1, p.48-52, Fev. 2016.

GAY, C. et al. Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. **Climatic Change**, Mexico DF, v.79, p. 259–288, Dec. 2006.

GEBREKIRSTOS, A. et al. Opportunities and applications of dendrochronology in Africa. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 6, p. 48–53, Nov. 2014.

- IMAÑA, J.; FERNANDES, G.; RODRIGUES, J. Idade e crescimento das árvores. **Comunicações Técnicas Florestais**, Brasília, v. 7, n. 1, p. 1-47. Dez. 2005.
- INSTITUTO AGRONÓMICO DE CAMPINAS IAC. Cultivares IAC de Café. O **Agrônomo** – Boletim Técnico Informativo do instituto Agrônômico.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: dez 2017.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2014 Synthesis Report. Geneva, p. 1-169, Nov. 2014.
- INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION (ICO). As mudanças climáticas e o café. **Conselho Internacional do Café**, 103a sessão, p. 1-27, 2009.
- JIMÉNEZ-TORRES, A.; MASSA-SÁNCHEZ, P. Producción de café y variables climáticas: El caso de Espíndola, Ecuador. **Economía**, Mérida, v. 40, p. 117-137, Dic. 2015.
- KOTTEK, M. et al. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 15, n. 3, 259-263, Jun. 2006.
- LACOINTE, A. Carbon allocation among tree organs: A review of basic processes and representation in functional-structural tree models. **Annals of Forest Science**, Clermont-Ferrand, v. 57, p. 521–533, July 2000.
- LADERACH, P. et al. Climate change adaptation of coffee production in space and time. **Climatic Change**, Cali, v. 141, p. 47–62, Mar. 2017.
- LEMPEREUR, M. et al. Growth duration is a better predictor of stem increment than carbon supply in a Mediterranean oak forest: implications for assessing forest productivity under climate change. **New Phytologist**, v. 207, p. 579–590, Feb. 2015.
- LITTON, C.M.; RAICH, J.W.; RYAN, M.G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, Manoa, v. 13, p. 2089–2109, 2007.
- LÜTTGE, U. From dendrochronology and dendroclimatology to dendrogeochemistry. **Trees**, Darmstadt, v. 31, p. 1743-1744, Sept. 2017.

- MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Ecophysiology of Arabica coffee. In: ALVIM, P. de T. (Ed.). Ecophysiology of tropical crops. Manaus: CEPLAC, 1975. Amsterdam, v. 2, p. 1-36.
- MBOW, C. et al. Potential of dendrochronology to assess annual rates of biomass productivity in savanna trees of West Africa. **Dendrochronologia**, Nairobi, v. 31, p. 41–51, Jun. 2013.
- MELESSE, S.; ZEWOTIR, T. Variation in growth potential between hybrid clones of Eucalyptus trees in eastern South Africa. **Journal of Forest Research**, Heidelberg, v. 28, n. 6, p. 1157–1167, Apr. 2017.
- MISCHAN, M.; ZAMBELLO, S. Modelos não lineares. Funções assintóticas de crescimento. Cultura Acadêmica Editora. São Paulo. 187 p. ISBN 9788579835452. 2014.
- OVALLE, O. et al. Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. **Plos One**, Cali, v. 1, p. 1-13. Apr. 2015.
- PEREIRA, R. et al. A pesquisa e as mudanças climáticas na cafeicultura. Semana Internacional do Café. **Informe Agropecuário Belo Horizonte**, Belo Horizonte, v. 34, p. 34-43, Out. 2013.
- PINTO, P. E.; DHOTE, J. F.; HERVÉ, J.C. Differentiated impact of climate and soil on primary and secondary growth of *Abies alba* Mill. **IUFRO**. *Abies 2016: The 15th International Conference on Ecology and Silviculture of Fir - "Bringing Knowledge on Fir Species Together"*. Sapporo, Sept. 2016.
- PONTON, S. et al. A trace elements-based approach to tropical dendrochronology. **INRA-SOLEIL: The Synchrotron Approach in Agriculture, Food and Environment Sciences**. Saint-Aubin, Jan. 2015.
- POORTER, H. et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, Jülich, v. 193, p. 30–50, Jan. 2012.
- REYNOLDS, J.; CHEN, J. Modelling whole-plant allocation in relation to carbon and nitrogen supply: Coordination versus optimization: Opinion. **Plant and Soil**, Durham, v. 185, n. 1, p. 65-74, Mar. 1996.

SCHIPPERS, P. et al. Tree growth variation in the tropical forest: understanding effects of temperature, rainfall and CO₂. **Global Change Biology**, Wageningen, v. 21, n. 7, p. 2749–2761, Jan. 2015.

SCHROTH, G. et al. Winner or loser of climate change? A modeling study of current and future climatic suitability of Arabica coffee in Indonesia. **Regional Environmental Change**, Wageningen, v. 15, p. 1473–1482, Nov. 2015.

SEBER, G.; WILD, C. Nonlinear Regression. Wiley-Interscience Paperback Series. John Wiley & Sons, Inc. 768 p. ISBN 9780471471356

SEVANTO, S.; DICKMAN, T. L. Where does the carbon go?—Plant carbon allocation under climate change. **Tree Physiology**, Los Alamos, v. 35, p. 581–584, May 2015.

SILVA, E. A. et al. Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of Arabica coffee trees. **Field Crops Research**, Viçosa, v.89, p. 349-357, Oct. 2004.

SILVA, E.A.; MAZZAFERA, P. Influence of temperature and water on coffee culture. **The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology**, v. 2, n. 2, p. 32-41, 2008.

SILVA, F., DALLA, A., SANQUETTA, C. R. Equações de afilamento para descrever o volume total do fuste de *Pinus caribaea* var. hondurensis na região do Triângulo Mineiro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 367-376, Set. 2011.

SLOT, M. et al. A lifetime perspective of biomass allocation in *Quercus pubescens* trees in a dry, alpine valley. **Trees**, Birmensdorf, v. 24, n. 1, p. 1-8, Mar. 2012.

THE CLIMATE INSTITUTE (TCI). A Brewing Storm: The climate change risks to coffee. p. 1-17, 2016.

VERHAGE, F. Y. F.; ANTEN, N. P. R.; SENTELHAS, P. C. Carbon dioxide fertilization offsets negative impacts of climate change on Arabica coffee yield in Brazil. **Climatic Change**, Piracicaba, v. 144, p. 671–685, Sept. 2017.

VIEILLEDENT, G. et al. A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forests using generic allometric models. **Ecological Applications**, Montpellier, v. 22, n. 2, p. 572–583, Sept. 2012.

WORBES, M. How to measure growth dynamics in tropical trees - A review. **IAWA Journal**, Kassel, v. 16, p. 337–351, Jan. 1995.

YANG, M. H. B.; DATSENKO, N. M. A six hundred-year annual minimum temperature history for the central Tibetan Plateau derived from tree-ring width series. **Climate Dynamics**, Heidelberg, v. 43, n. 3–4, p. 641–655, July 2014.

ZHANG, Y. et al. Relationships between tree age and climate sensitivity of radial growth in different drought conditions of Qilian Mountains, northwestern China. **Forests**, Beijing, v. 9, n. 3, 135-154. Mar. 2018.

ZHANG, Y. et al. Millennial minimum temperature variations in the Qilian Mountains, China: evidence from tree rings. **Climate of the Past**, Beijing, v. 10, p. 1763–1778, Sept. 2014.