

Efeitos das características ambientais na qualidade do café

*Helena Maria Ramos Alves¹, Margarete Marin Lordelo Volpato², Flávio Meira Borém³, José Marques Júnior⁴,
Diego Silva Siqueira⁵, Emília Hamada⁶, Rosângela Alves Tristão Borém⁷*

Resumo - Entre as mudanças que a cafeicultura brasileira vem passando nas últimas décadas, destaca-se a recente transição para a produção de cafés especiais de alta qualidade. Observa-se a relevância crescente do Brasil como produtor não apenas de quantidade, mas também de qualidade, impulsionada pela diversificação e pela valorização da origem. As características ambientais influenciam significativamente a qualidade do café. Realça-se a influência do clima, do relevo e dos solos na qualidade do café Arábica, com ênfase na altitude e latitude como fatores comprovadamente determinantes dessa qualidade. Em razão das mudanças climáticas, são diversos os desafios enfrentados pela cafeicultura. Existe uma demanda constante de adaptação e, portanto, a necessidade de pesquisas com abordagens inovadoras, que possibilitem melhor compreensão da interação do ambiente com a qualidade. Assim, fazem-se necessários mais estudos sobre a interação entre solo e qualidade do café, explorando a mineralogia da argila como indicador potencial.

Palavras-chave: caracterização ambiental; cafés especiais; aptidão climática; mudança climática; pedoindicador; geoprocessamento.

Effects of environmental characteristics on coffee quality

Abstract - Among the changes that Brazilian coffee production has undergone in recent decades, the recent transition to the production of high-quality specialty coffees stands out. Brazil is increasingly relevant as a producer not only of quantity, but also of quality, driven by diversification and appreciation of origin. Environmental characteristics influence coffee quality. The influence of climate, relief and soils on the quality of Arabica coffee stands out, with emphasis on altitude and latitude as factors that have been proven to determine this quality. Due to climate change, coffee production faces several challenges. There is a constant demand for adaptation and, therefore, the need for research with innovative approaches to better understand the interaction between the environment and coffee quality. More studies are required on the interaction between soil and coffee quality, exploring clay mineralogy as a potential indicator.

Keywords: environmental characterization; specialty coffees; climate suitability; climate change; pedoindicators; geoprocessing.

INTRODUÇÃO

O Brasil, em função de sua extensão territorial, biodiversidade e potencial de agricultura tropical, desponta como protagonista nas grandes questões que preocupam a humanidade neste momento, tais como aquecimento global, preservação ambiental e produção de alimentos

saudáveis. Por ser a “Nação do Café” e, justamente por ocupar posição de destaque, a cafeicultura brasileira é afetada diretamente por essas questões globais, tanto de maneira positiva quanto negativa. Até recentemente, no País, produzia-se café em quantidade. A produção brasileira ainda não havia apropriado da sua diversidade em busca de uma bebida de qualidade. A nova

onda dos cafés especiais, da diversificação e da importância da origem da produção, tem incentivado a reorganização da produção brasileira de cafés de qualidade superior. As diversas regiões produtoras estão buscando a valorização e a proteção dessas origens, por meio das Indicações Geográficas (IGs). Muitos estudos têm sido realizados, mas as informações ainda

¹Engenheira-agronôma, D.Sc., Pesq. EMBRAPA Café, Brasília, DF/Pesq. Colaboradora EPAMIG Sul - Laboratório de Geoprocessamento, Lavras, MG, helena.alves@embrapa.br.

²Engenheira Florestal, D.Sc., Pesq. EPAMIG Sul - CELA, Lavras, MG, margarete@epamig.br.

³Engenheiro-agronomo, D.Sc., Prof. Tit. UFLA - Depto. Engenharia Agrícola/Bolsista CNPq, Lavras, MG, flavioborem@ufla.br.

⁴Engenheiro-agronomo, D.Sc., Prof. Sénior UNESP - FCAV - Depto. Ciência do Solo/Bolsista CNPq, Jaboticabal, SP, jose.marques-junior@unesp.br.

⁵Engenheiro-agronomo, D.Sc., Prof. Programa SolloAgro USP - ESALQ, CEO Quanticum, São Paulo, SP, diego.siqueira@quanticum.com.br.

⁶Engenheira Agrícola, D.Sc., Pesq. EMBRAPA Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, emilia.hamada@embrapa.br.

⁷Engenheira Florestal, D.Sc., Profª Tit. UFLA - Depto. Ecologia e Conservação, Lavras, MG, tristao@ufla.br.

são insuficientes para explicar claramente a biodiversidade brasileira, que está inclusa nas xícaras de café que o País produz. Para compreender o que determina a qualidade desses cafés especiais, principalmente quando se inclui a influência dos solos dos ambientes cafeeiros, é preciso Ciência (Alves *et al.*, 2011).

A IG é um signo distintivo, composto por um nome geográfico, que valoriza a propriedade intelectual coletiva e surge como uma alternativa de desenvolvimento econômico e social. A IG confere ao produto uma identidade própria, estabelecendo uma ligação entre suas características e sua origem. No Brasil, a Lei nº 9.279, de 14.05.1996 regulamentou as IGs para produtos e serviços e o Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) definiu os procedimentos para seu registro em duas modalidades: a Indicação de Procedência (IP) e a Denominação de Origem (DO) (Brasil, 1996). A primeira IG para o café, no Brasil, foi a IP da Região do Cerrado Mineiro. Até dezembro de 2023, havia 16 IGs⁸ reconhecidas pelo INPI para o produto café, sendo 10 IP e 6 DO.

Neste artigo serão abordadas as contribuições do ambiente na expressão da qualidade do café Arábica e, dentro deste segmento, os aspectos relacionados com o clima, o relevo e os solos. Muito além dos fatores isoladamente, é a interação entre estes, o que realmente conta para a produção e a diferenciação da qualidade da bebida do café.

FATORES QUE AFETAM A QUALIDADE DO CAFÉ

A qualidade do café está intrinsecamente relacionada com o termo café especial, usado para se referir aos cafés sem defeitos físicos e com alta qualidade sensorial da bebida, que deve possuir sabor agradável e suave e ser isenta de adstringência e

sabores defeituosos, como fenólico ou fermentado acético, independentemente do Sistema de Produção, da origem ou da certificação. A qualidade do café expressa-se diferentemente em função da sua origem geográfica, sendo notórias as variações no perfil sensorial de acordo com o país de origem, microrregiões, e, até mesmo, diferentes locais de plantio em uma mesma propriedade. As características genéticas das plantas e as condições particulares de clima, solo e relevo associadas ao “saber fazer local”, representados pelos diferentes métodos de cultivo, técnicas de colheita, processamento e secagem, criam a identidade da bebida (Borém *et al.*, 2023). Conhecer e explicar o que afeta a qualidade dos cafés e mapear esta diversidade, constitui tarefa complexa.

O termo café especial foi utilizado pela primeira vez, em 1974, pela norueguesa Erna Knutsen⁹, com base no conceito de que microclimas de regiões especiais produzem grãos com sabores únicos, que ela chamou de “cafés especiais”. O conceito apresentado considerava que as características edafoclimáticas do local de produção, tais como temperatura, altitude, solo e precipitação, conferem aos grãos características singulares, raras e especiais (Rhinehart, 2021 *apud* Borém *et al.*, 2023). Além da qualidade intrínseca, os cafés especiais devem ter rastreabilidade certificada e respeitar critérios de sustentabilidade ambiental, econômica e social, em todas as etapas de produção. A classificação dos cafés especiais baseia-se principalmente nos atributos sensoriais da bebida, que estão relacionados com as características edafoclimáticas do local de produção, mas pode também incluir outros parâmetros relacionados com a sustentabilidade econômica, ambiental e social.

A Figura 1 ilustra os principais fatores que influenciam, direta ou indiretamente,

a formação dos compostos precursores do sabor e aroma do café torrado. Estes fatores vão-se somando desde a produção das lavouras no campo até o preparo da bebida nas casas ou cafeterias.

Influência do clima e do relevo nas características e qualidade do café Arábica

O *Coffea arabica* é originário da vegetação de sub-bosque, das florestas caducifólias, do Sudoeste da Etiópia. São regiões altas, entre 1.300 e 2.800 m de altitude, com temperaturas médias anuais entre 18 °C e 21 °C, e total anual de chuvas entre 1.300 e 1.800 mm (Borém *et al.*, 2019a).

Em Minas Gerais, o plantio dessa espécie segue o zoneamento agroclimático, que delimita as áreas com potencial adequado de clima para produção econômica, pois baseia-se nos limites de temperatura, nas várias fases do ciclo; de quantidade mínima de água; e de período seco nas fases de maturação e colheita. Vale apontar que o zoneamento agroclimático é um processo contínuo, que necessita ser atualizado sempre que estiverem disponíveis novos dados ou métodos que possibilitem detalhar e ampliar as informações, tornando-o cada vez mais próximo da realidade. Ao longo dos anos, várias atualizações foram propostas para a cultura do café. A incorporação de séries climatológicas mais longas, da geotecnologia e de sistemas computacionais permitiu o desenvolvimento de novos estudos para o zoneamento do café, que, atualmente, contempla estudos de riscos climáticos, com enfoque principalmente dos elementos do balanço hídrico, das variações de temperatura do ar e da ocorrência de eventos adversos, empregando geotecnologias para a espacialização dos resultados. A Figura 2 apresenta o mapa de zoneamento agroclimático do café Arábica para o estado de Minas Gerais (Minas

⁸Informações sobre as Indicações Geográficas (IGs) no Brasil consulte: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/indicacoes-geograficas> (INPI, 2023).

⁹No ano de 1974, em entrevista a um tradicional jornal americano da época, o “Tea & Coffee Trade Journal”, a norueguesa Erna Knutsen utilizou, pela primeira vez, o termo Cafés Especiais. Ela era funcionária de uma empresa importadora de cafés em São Francisco, Califórnia/USA, e foi uma das primeiras mulheres a trabalhar com venda de cafés verdes.

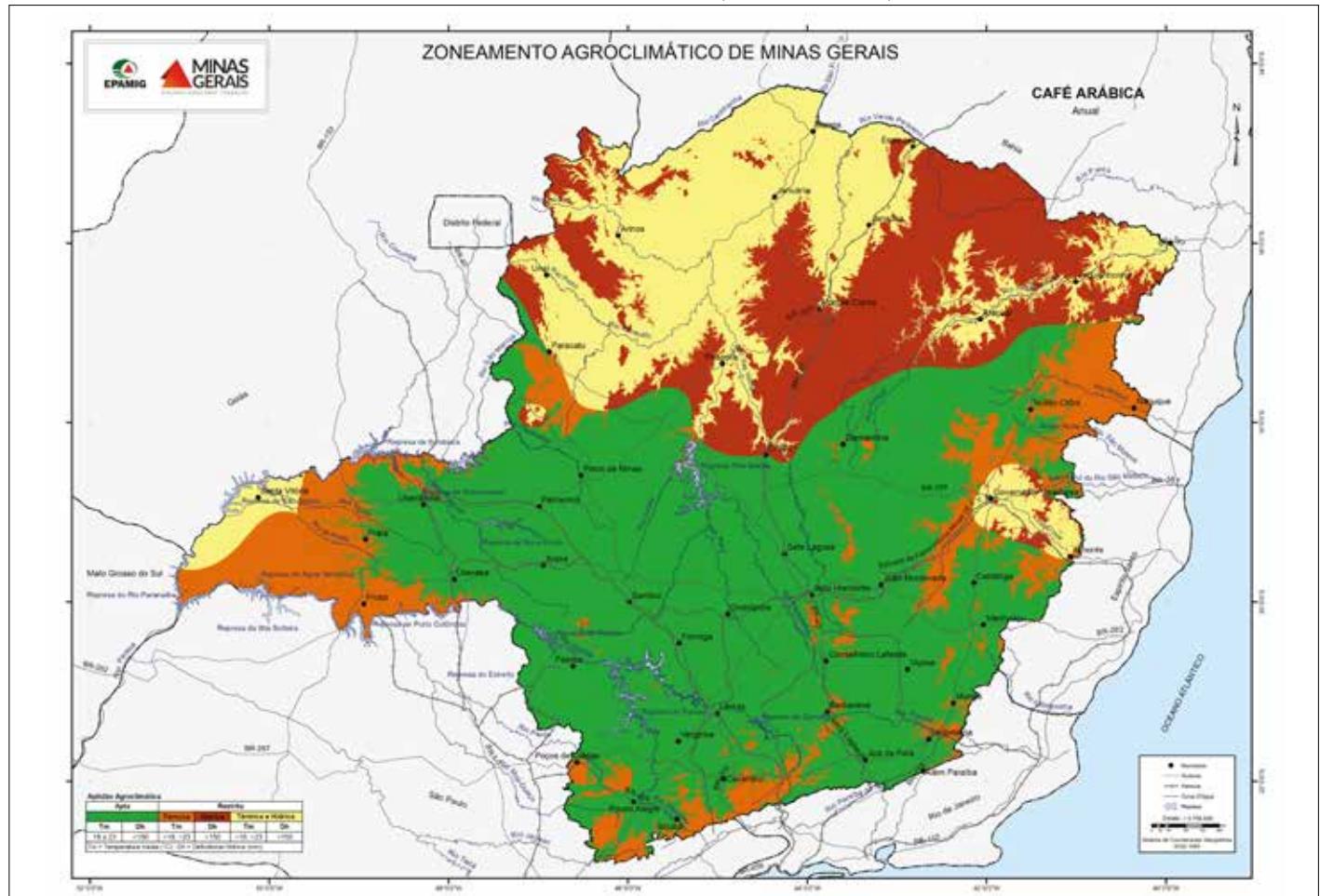
Figura 1 - Fatores que influenciam a qualidade sensorial da bebida do café



Fonte: Elaboração dos autores.

Nota: Os inúmeros fatores vão-se somando na formação da qualidade final da xícara de café. A fórmula é a representação visual deste fenômeno.

Q - Qualidade da bebida do café.

Figura 2 - Zoneamento agroclimático da cultura do café Arábica (*Coffea arabica*) para o estado de Minas Gerais

Fonte: Minas Gerais (2017, p.89).

Gerais, 2017, p.89), elaborado utilizando-se um banco de dados meteorológicos de 34 anos (1980 a 2013), e um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os elementos utilizados para determinar a aptidão estão no Quadro 1. O balanço hídrico foi calculado pelo método de Thornthwaite e Mather (1955, 1957), e a capacidade de água disponível foi de 125 mm.

Dentre os elementos climáticos, a precipitação pluviométrica é a que pode apresentar maior variabilidade. O excesso ou a falta de chuva afeta o sistema solo-planta-atmosfera, e, dependendo do estádio fenológico da planta, da duração e da intensidade, pode acarretar grandes perdas de produção e de qualidade do produto. O estresse hídrico prolongado acarreta danos à floração, redução do desenvolvimento de grãos, danos aos frutos e morte das plantas (Damatta; Ramalho, 2006). Ocorre, ainda, menor absorção de nutrientes e baixa taxa de transporte de íons. Sob essas condições, a planta reduz sua fotossíntese e minimiza seus rendimentos. Cabe salientar, contudo, que fatores pedológicos e topográficos também devem ser considerados na delimitação da cafeicultura, dentro dos campos climáticos homogêneos, porque podem alterar a aptidão climática no nível local (Sediyama et al., 2001).

As faixas de aptidão para a produção do café são normalmente mais amplas que as referentes à qualidade da bebida. Os parâmetros macroclimáticos considerados como favoráveis para a obtenção de bebida fina podem ser altamente influenciados pela topografia, podendo interferir, entre outros, na composição química da mucilagem do café, no tipo de atividade microbiana e na intensidade do processo

fermentativo (Alves et al., 2011). Dessa forma, mesmo regiões propícias à produção de cafés de boa qualidade possuem uma diversidade climática que causa variações nas características de acidez, de corpo e de aroma da bebida.

Influência da temperatura, altitude e latitude na qualidade do café Arábica

A temperatura é apontada como o principal fator ambiental para a produção de cafés especiais. A temperatura média do ar, durante o desenvolvimento do fruto, afeta o perfil sensorial de bebida. Regiões com climas mais frios são frequentemente correlacionadas a atributos positivos, como melhor qualidade da acidez e sabor agradável (Borém et al., 2020). Temperaturas mais baixas acarretam o prolongamento do processo de amadurecimento dos frutos, o que leva ao maior acúmulo de compostos químicos e bioquímicos associados à melhor qualidade da bebida, como o aroma do café (Vaast et al., 2006). Por outro lado, em regiões com temperaturas mais elevadas, os frutos do café amadurecem mais rapidamente, levando à produção de cafés de menor qualidade (Vaast et al., 2006).

Além da temperatura média, outros aspectos relacionados com a variação da temperatura também influenciam a qualidade do café. Estudo realizado para avaliar a qualidade do café Arábica, na Serra da Mantiqueira de Minas Gerais (Borém et al., 2019b), mostrou que acima de 1.000 m de altitude, onde a amplitude térmica do ar é menor, obtiveram-se cafés com qualidade superior. Ou seja, foi encontrada uma interação, entre a temperatura média, a am-

plitude térmica e a altitude, que estava relacionada com o aumento da qualidade da bebida. Outras abordagens, como processos oxidativos e metabolismo antioxidante dos frutos do café, têm sido utilizadas para explicar o efeito da temperatura na qualidade do café (Borém et al., 2023). Trabalho conduzido nessa mesma área, com o objetivo de estudar a variação sazonal de atributos ecofisiológicos e metabólicos do café Arábica em três altitudes, mostrou que o aumento da altitude foi determinante para as diferenças fisiológicas entre as plantas estudadas, indicando que as localizadas nas menores altitudes sofreram maior estresse oxidativo. Tanto as maiores temperaturas médias como a maior amplitude térmica podem estar relacionadas com esse fato. A menor atividade antioxidante está relacionada com a maior formação de espécies reativas ao oxigênio (O), o que concorre para a pior qualidade da bebida (Borém et al., 2019a). A relação entre a elevação da altitude e o aumento da qualidade da bebida é um fenômeno mundialmente conhecido e descrito em diversos países (Borém et al., 2023). Na Colômbia e Honduras ocorre melhora significativa na qualidade do café nas altitudes mais elevadas, variando de 1.450 a 1.650 m (Decazy et al., 2003). Na Etiópia, cafés cultivados em altitudes acima de 1.950 m apresentaram atributos de acidez, corpo, aroma, sabor, finalização e avaliação global com maiores pontuações (Tolessa et al., 2017).

Uma outra análise das avaliações de qualidade de cafés Arábica produzidos no município de Carmo de Minas, na mesma região da Mantiqueira de Minas, também evidenciou a relação da altitude com a qualidade do café. Na Figura 3, a média das

Quadro 1 - Parâmetros e classes de temperatura e déficit hídrico usados para o zoneamento agroclimático de *Coffea arabica* no estado de Minas Gerais

Apta	Restrita por carência hídrica	Restrita por condição térmica	Restrita por condições térmicas e hídricas desfavoráveis
Temperatura média anual de 18 °C a 23 °C, e deficiência hídrica anual < 150 mm	Deficiência hídrica anual > 150 mm	Temperatura média anual inferior a 18 °C ou superior a 23 °C	Temperatura média anual inferior a 18 °C ou superior a 23 °C, e deficiência hídrica anual > 150 mm

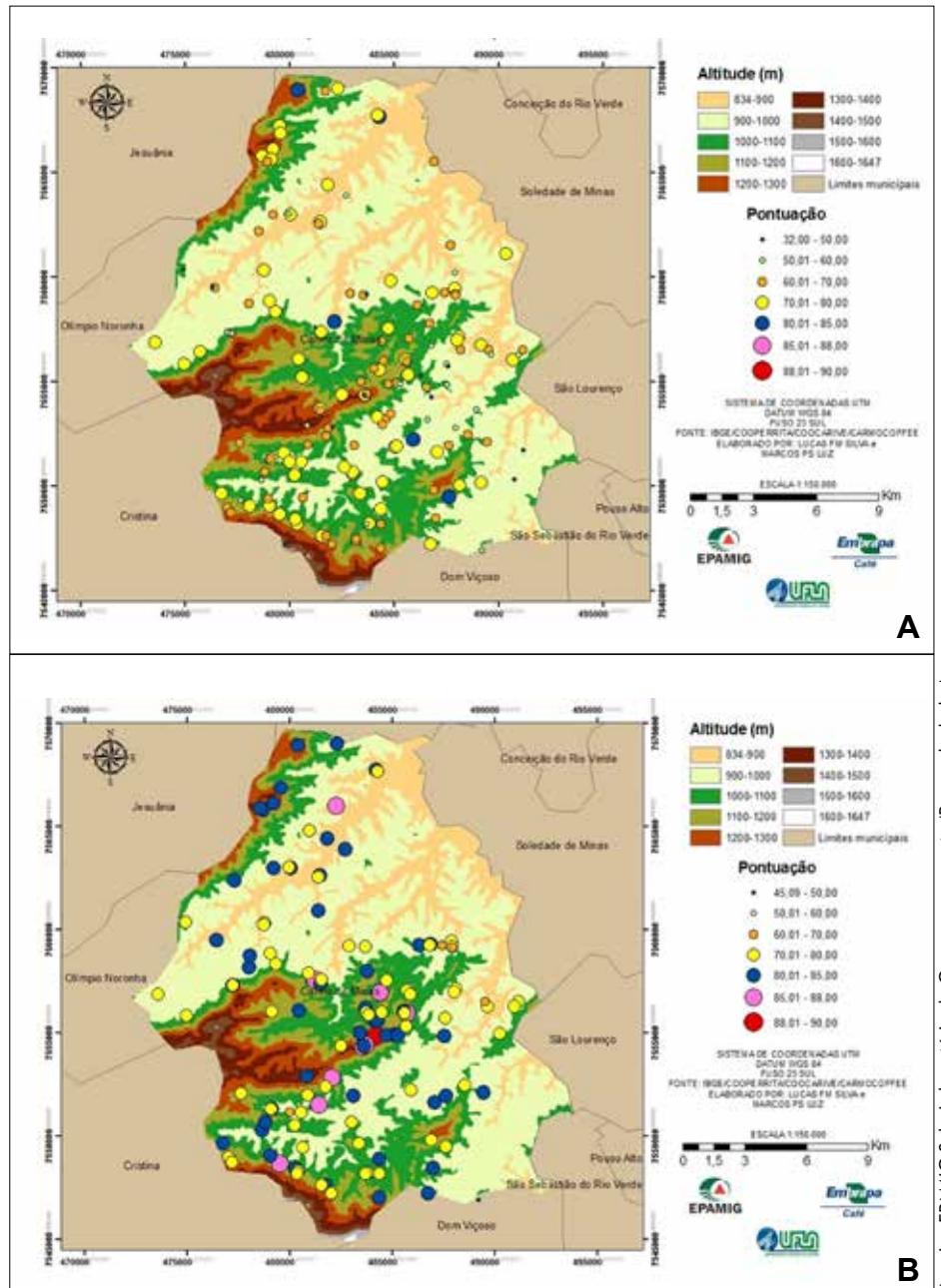
Fonte: Dados básicos: Minas Gerais (2017, p.88).

Elaboração dos autores.

notas de amostras de café de cinco safras comerciais (2007/2008 a 2011/2012), pontuadas de acordo com a escala da Specialty Coffee Association (SCA), foi plotada sobre o mapa do município, estratificado em diferentes classes de altitude. Observa-se que as notas superiores a 80 pontos

ocorrem em todas as faixas de altitude, ao passo que notas acima de 85 pontos ocorrem, predominantemente, na faixa de altitude entre 1.000 e 1.100 m. Notas acima de 88 pontos ocorreram preferencialmente em altitudes superiores a 1.200 m e para o processamento via úmida.

Figura 3 - Mapas da distribuição espacial da qualidade do café processado no município de Carmo de Minas, na região da Mantiqueira de Minas, MG



Nota: A - Por via seca; B - Por via úmida.

Considerando para a avaliação da qualidade os valores médios das notas de amostras de café de cinco safras comerciais (2007/2008 a 2011/2012).

O aumento da qualidade da bebida associado à redução da temperatura pode ocorrer tanto pelo aumento da altitude em relação ao nível do mar quanto pelo afastamento do local de produção em relação à linha do equador. Pode-se dizer que a latitude também possui efeito marcante na qualidade do café (Borém *et al.*, 2019a). Para demonstrar o efeito da interação entre a altitude e a latitude na qualidade, resultados dos Concursos de Qualidade dos Cafés de Minas Gerais, dos anos de 2007 e 2008, realizados pelo estado de Minas Gerais, foram espacializados e analisados. As amostras foram especificadas com base na localização geográfica (latitude, longitude e altitude) e técnicas de geoestatística foram aplicadas para estudar a dependência espacial da qualidade sensorial. Os resultados confirmaram que as maiores notas sensoriais estão associadas às maiores altitudes e latitudes (Barbosa *et al.*, 2010 *apud* Alves *et al.*, 2011). Assim, até certo ponto, quanto maior a altitude, maior a pontuação recebida pelos cafés, e quanto maior a latitude, menor a necessidade de altitude elevada para obter maiores valores na pontuação (Borém *et al.*, 2023).

Mudanças climáticas e a influência do ambiente na produção e qualidade do café

Os impactos das mudanças climáticas começam a pressionar o setor cafeeiro, pois eventos extremos têm afetado a cafeicultura e poderão alterar as atuais delimitações de áreas com potencial adequado de clima para produção econômica e também para produção de cafés especiais. O aquecimento tem alterado a distribuição das espécies cultivadas, a aptidão das áreas de cultivo e a ocorrência dos principais eventos biológicos, como a floração e a emergência de insetos, afetando a qualidade dos alimentos e a estabilidade da colheita.

Uma revisão sistemática recente (Ahmed *et al.*, 2021), sobre os efeitos dos fatores ambientais associados às mudanças climáticas na qualidade do café, indicou vulnerabilidade da cultura a mudanças na exposição à luz, altitude, estresse hídrico,

temperatura, dióxido de carbono (CO_2) e nutrientes, uma vez que estes alteram metabólitos secundários e atributos sensoriais que afetam a qualidade da bebida. Os resultados analisados não são conclusivos, evidenciando consistência apenas em relação a dois efeitos: o aumento da altitude associado à melhoria dos atributos sensoriais do café e o aumento da exposição à luz associado à diminuição dos atributos sensoriais.

O Projeto “Impactos das mudanças climáticas globais sobre problemas fitossanitários – Climapest”, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Meio Ambiente, produziu diversos resultados relacionados com a fisiologia e sanidade do café, e, consequentemente, com a produção de cafés com qualidade, utilizando metodologia da liberação de gás carbônico ao ar livre – Free Air Carbon-dioxide Enrichment (FACE). Experimentos do tipo FACE são caracterizados por exposições de plantas, em larga escala e por longo tempo, a elevadas concentrações de CO_2 em condições de campo, permitindo avaliações interdisciplinares das plantas. Sumarizando os resultados de diversos estudos conduzidos, os cafeeiros cultivados durante cinco anos, no sistema FACE, apresentaram grande plasticidade fenotípica, investindo em estruturas reprodutivas ou vegetativas de acordo com o impacto de fatores ambientais, como alta luminosidade, temperaturas elevadas e irrigação. Cafeeiros cultivados sob maior concentração atmosférica de CO_2 mantiveram a assimilação fotossintética sem aclimatação, porém houve atraso na floração. Efeitos negativos, resultantes de fatores ambientais, são compensados quando os cafeeiros têm maior disponibilidade de CO_2 . Em nível metabólico, alterações das concentrações de compostos primários, especialmente açúcares, lipídios e fenólicos, foram detectadas tanto nas folhas de cafeeiros jovens quanto em grãos de cafeeiros adultos.

Além da pesquisa experimental, outra abordagem para avaliar os impactos das mudanças climáticas no cafeiro é a utilização de modelos que incorporam cenários

de emissões do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Adotando essa abordagem, Gomes *et al.* (2020) concluíram que, para a região Serrana, produtora de café no Sudeste do Brasil, o aumento da temperatura média anual do ar levará a uma redução de quase 60% na área adequada para a produção de café a pleno sol, até 2050. Contudo, a adoção de Sistemas Agroflorestais (SAFs) com 50% de sombra pode reduzir as temperaturas médias locais, e manter 75% da área apta à produção de café em 2050, especialmente entre 600 e 800 m de altitude.

Em outra revisão sistemática dos impactos das mudanças climáticas no cafeiro, Faraz *et al.* (2023) recomendam intensificar a pesquisa de adaptação para explorar as melhores opções em diferentes ambientes; aplicar modelos de cultivo, para preencher a lacuna na fenologia do café; propor estratégias de adaptação, tais como: novas variedades, métodos de conservação de água, manejo de sombreamento em diversas altitudes e manejo de matéria orgânica (MO) do solo; incrementar as pesquisas de melhoramento genético, visando obter variedades adaptadas e com elevado potencial de qualidade.

A pesquisa também alerta para outros impactos que podem ocorrer nas áreas produtoras de café, com alto potencial de qualidade do Brasil, em face das mudanças climáticas. Como o mercado internacional do café vem, cada vez mais, exigindo qualidade e valorizando produtos com selos de origem geográfica, o fracionamento dos isótopos estáveis de carbono (C), oxigênio (O) e nitrogênio (N) tem sido utilizado como ferramenta eficaz na discriminação de ambientes geograficamente diferentes de produção de vinhos refinados e cafés especiais. Estudos recentes mostraram que as relações de C, O e N se alteram não apenas em grandes distâncias. Alterações de altitude relativamente pequenas podem acarretar alterações nas relações entre estes elementos, observadas no grão verde de café, evidenciando mudanças no cafeiro e no grão do café (Barbosa *et al.*,

2014, 2019). Estes elementos podem sofrer impactos pela temperatura, ou seja, se a temperatura altera, todo o fracionamento isotópico é alterado. Mesmo que ainda não existam evidências claras sobre o que isto poderia acarretar na qualidade da bebida, os estudos de Barbosa *et al.* (2014, 2019) indicam que esta metodologia pode ser útil na distinção de altitudes para uma mesma região produtora de cafés especiais. Os autores avaliaram as relações de isótopos estáveis em grãos verdes de café, produzidos em diferentes altitudes da DO Mantiqueira de Minas, e observaram um empobrecimento dos isótopos de $\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{18}\text{O}$ à medida que ocorre o aumento da altitude (<1.000 m/1.000-1.200 m/>1.200 m). Quando avaliadas em relação às notas sensoriais de cafés da variedade Bourbon Amarelo, produzidos nestas altitudes, foi possível observar um comportamento antagônico destes isótopos em relação à qualidade. Com o aumento da altitude obtém-se uma maior nota sensorial, mas ocorre um empobrecimento dos isótopos de $\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{18}\text{O}$. Estes resultados evidenciam não apenas o potencial do uso de isótopos estáveis para discriminar origens produtoras de cafés especiais em grandes e pequenas escalas, mas, principalmente, os impactos e as consequências das alterações que as mudanças climáticas acarretam na qualidade dos cafés, e que precisam ser mais bem estudadas e compreendidas.

SOLOS E A RELAÇÃO COM A QUALIDADE DO CAFÉ

Existem poucas pesquisas associando a qualidade da bebida do café a parâmetros do solo. Os solos dão sustentação à vida, fornecendo às plantas: água, nutrientes minerais, ar e ancoragem para as raízes. Como parte da paisagem, fornecem a melhor base para a distinção de ambientes, pois refletem características ambientais passadas, que resultaram na sua formação, e características do presente, decorrentes do uso e da ocupação a que se encontram destinados. O cafeiro desenvolve-se bem em uma grande variedade de solos, mas a obtenção

de um café de qualidade depende de uma planta saudável e bem nutrida. Cafeeiros que recebem uma nutrição balanceada têm o potencial de produzir grãos de qualidade. Não obstante, ainda são raros os trabalhos que relacionam a qualidade do café com atributos do solo, porque este efeito não é tão facilmente medido como se faz para a produção. Isto começa a ser mudado em função da importância que a qualidade vem adquirindo e da crescente demanda de nutrientes por cultivares de café mais produtivas. O Quadro 2 apresenta efeitos observados entre a nutrição do cafeeiro e a qualidade do café. Efeitos positivos e negativos podem ser observados e indicam que mais pesquisas são necessárias para melhor compreender a complexa relação entre a qualidade do café e o solo (Borém *et al.*, 2023).

NOVOS INDICADORES DE SOLO PARA ESTIMAR A QUALIDADE DO CAFÉ

Tendo em vista os resultados, ainda controversos, sobre a contribuição dos solos e da nutrição do cafeeiro na qualidade sensorial do café, estudos mais recentes buscam uma abordagem inovadora para explicar este efeito. Uma das abordagens utiliza a mineralogia da argila como um potencial indicador do solo, tendo como base a correlação da tipologia da argila com a qualidade sensorial do café. Trabalhos ainda inéditos, viabilizados por uma parceria entre a EPAMIG, a Empresa Quanticum Análises e Mapeamentos LTDA., a Universidade Estadual Paulista (Unesp), Jaboticabal, SP, a Embrapa Café, e a Universidade Federal de Lavras (Ufla), indicam clara interação da tipologia de argila com a qualidade do café.

As plantas, para completarem o seu ciclo, necessitam de água, luz e nutrientes, que estão inseridos no sistema trifásico do solo: sólido, líquido e gasoso. A argila é uma fração da fase sólida do solo constituída por vários tipos de minerais. Os minerais de argila, que possuem diâmetro menor que 0,002 mm, são formados nos solos, e expressam a interação do clima e dos

Quadro 2 - Relação entre nutrição do cafeeiro e qualidade do café

Efeito na qualidade	Fonte
A composição química do grão e a qualidade do café dependem do estado nutricional da planta	Carvalho <i>et al.</i> (1994)
A presença ou ausência dos nutrientes influenciam os processos bioquímicos que determinam a qualidade	Guimarães <i>et al.</i> (2011)
As propriedades químicas do solo possuem interações positivas e negativas com os atributos de qualidade do café	Mintesnot <i>et al.</i> (2015)
A maioria dos cafés ácidos é produzida em solos de origem vulcânica	Bertrand <i>et al.</i> (2006)
O parcelamento da adubação não afeta a qualidade da bebida	Vilella e Faria (2002)
O aumento da dose de nitrogênio (N) afetou negativamente o tamanho do grão e a qualidade da bebida	Pozza <i>et al.</i> (2003)
A adubação com nitrocálcio e nitrato de amônio reduziu a qualidade da bebida	Malta <i>et al.</i> (2003)
Doses elevadas de sulfato de amônio acarretaram efeitos negativos na composição química e na qualidade do grão	Malta <i>et al.</i> (2003)
A exclusão de fósforo (P) na adubação afetou negativamente a qualidade da bebida	Amorim <i>et al.</i> (1965)
São raros os trabalhos que relacionam a adubação fosfatada com a qualidade da bebida	Guimarães <i>et al.</i> (2011)
Nas florestas naturais de café da Etiópia níveis mais altos de P disponível, argila e silte foram associados a uma melhor qualidade sensorial do café	Yadessa <i>et al.</i> (2020ab)
Doses excessivas de potássio (K) reduziram a qualidade de maneira inconsistente	Amorim <i>et al.</i> (1973)
O excesso de K pode induzir à deficiência de magnésio (Mg) e afetar negativamente a qualidade	Mitchell (1988) e Silva <i>et al.</i> (1999, 2002, 2003)
Doses médias de K melhoraram a qualidade do grão	Silva <i>et al.</i> (2002)
Sulfato e nitrato de potássio melhoraram a qualidade quando comparados com cloreto de potássio (KCl)	Malta <i>et al.</i> (2002)
Houve melhoria da qualidade com a adubação potássica na forma de sulfato de potássio (K_2SO_4)	Silva <i>et al.</i> (1999, 2003)
Fonte e dose de K afetam a qualidade sensorial da bebida	Dias <i>et al.</i> (2018)
Não foi encontrado nenhum efeito para a dose ou fonte de enxofre (S) na qualidade	Malavolta (1986)
A qualidade não foi afetada pelo uso de diferentes fontes de micronutrientes	Jayarama <i>et al.</i> (1992)
O fornecimento de zinco (Zn) afetou positivamente a qualidade dos grãos que apresentaram elevação de ácidos clorogênicos e atividade antioxidante	Martinez <i>et al.</i> (2014)

Fonte: Adaptado de Lambot *et al.* (2017 apud Borém *et al.* 2023).

organismos sobre a rocha de origem, em um espaço de tempo controlado pelo relevo (Resende *et al.*, 2014). Alguns atributos das argilas, como tamanho nanométrico, desenvolvimento de campo eletromagnético e dispersão na fase líquida, conferem a estas um efeito coloidal, capaz de controlar

todas as reações de superfície provocadas por adições de insumos, como fertilizantes, MO, calcário, água e herbicidas. A fração argila dos solos tropicais e subtropicais é dominada por minerais, como a caulinita e os óxidos e sesquióxidos de ferro e de alumínio. Assim, a variação da tipologia

de argilas (hematita, goethita, caulinita e gibsita) influencia fortemente os tipos e as intensidades das reações químicas e biológicas do solo, afetando, por exemplo, a capacidade de disponibilizar nutrientes e de armazenar água. Isto afeta diretamente a resposta das plantas tanto em relação à produtividade quanto à qualidade dos frutos.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Sistema [...], 2018) preconiza tomadas de decisões de manejo do solo, baseando-se nos níveis taxonômicos de família e de série, os quais requerem informações detalhadas sobre a mineralogia da fração argila do solo. No entanto, a avaliação espacial da mineralogia da argila dos solos, ou seja, o Mapeamento da Tipologia de Argila, tem sido prejudicada pelo alto custo e pela necessidade de um grande número de amostras associados ao método considerado “padrão ouro”, como a difração de raios X e a análise termodifereencial (ATD). Nesse contexto, a evolução das técnicas de quantificação mineralógica da tipologia de argila do solo, utilizando sensores com base em espectroscopia de reflectância difusa (ERD) e magnetometria (medidas de suscetibilidade magnética do solo), tem possibilitado a aquisição de dados em larga escala, com alta precisão e com baixos custos. Essa abordagem tem permitido análises espaciais detalhadas e o Mapeamento da Tipologia de Argilas em diversas regiões, com diferentes altitudes. Em particular, a técnica de aquisição de valores de suscetibilidade magnética tem-se destacado, permitindo a identificação de minerais específicos, como a magnetita, que serve como um pedoindicador importante em solos. Isso possibilitou o mapeamento de áreas com potencial para produção de cafés especiais (*terroir*), em diferentes altitudes, contribuindo para melhor compreensão, planejamento e gestão dos recursos agrícolas.

O grupo de pesquisa Caracterização do Solo para Fins de Manejo Específico (CSME), da Unesp Jaboticabal, SP, tem conduzido estudos pioneiros visando aprimorar o mapeamento e a caracterização dos solos em regiões dedicadas ao cultivo de

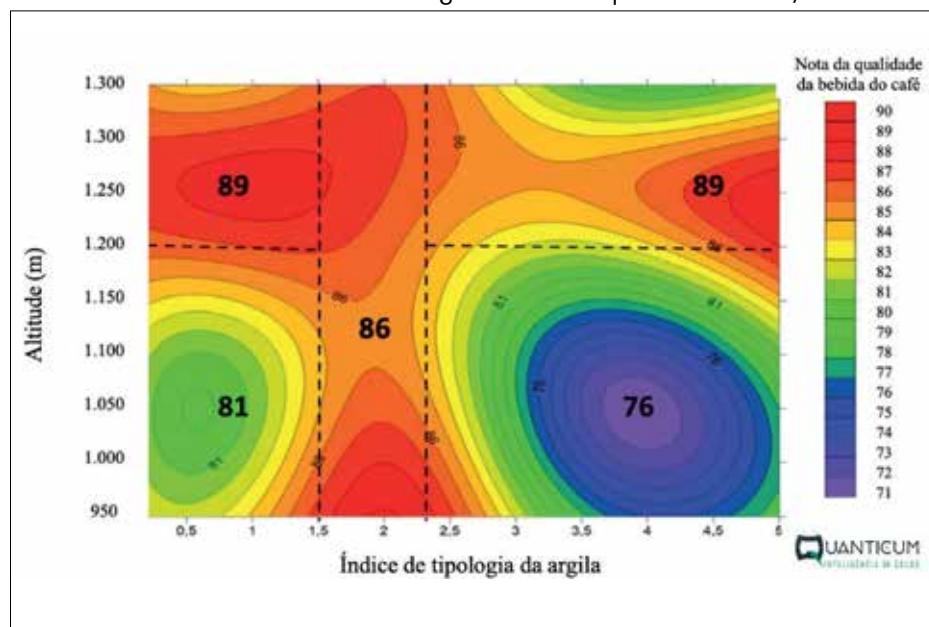
café, laranja e cana-de-açúcar, nos estados de São Paulo e Minas Gerais. Mediante a integração de diversas disciplinas científicas, as pesquisas deste grupo visam a compreensão mais profunda dos agroecossistemas cafeeiros. As técnicas empregadas possibilitam a cartografia contínua da variabilidade dos atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo no espaço geográfico, permitindo a identificação de diferentes padrões de variabilidade do solo em áreas específicas da paisagem, o que, por sua vez, contribui para a delimitação de zonas de manejo específico. Tal abordagem tem demonstrado ser crucial para otimizar a produtividade das culturas.

Além das técnicas convencionais de mapeamento, o grupo utiliza dados mineralógicos do solo, adquiridos por meio de sensores, como a ERD e técnicas de suscetibilidade magnética, como indicadores pedoambientais. Esses métodos, combinados com ferramentas computacionais, tais como: Modelo Digital de Elevação (MDE), análises geoestatísticas e multivariadas, e inteligência artificial, têm sido cada vez

mais empregados para identificar áreas de manejo homogêneas, proporcionando uma abordagem mais precisa e eficiente para a gestão agrícola (Pollo et al., 2013; Sanchez et al., 2013; Siqueira; Marques Júnior; Pereira, 2010).

A Figura 4 apresenta os resultados da interação entre a altitude, a tipologia da argila e a qualidade sensorial de amostras de café da região da Mantiqueira de Minas. Observa-se que, quando os índices da tipologia de argila variam entre 0 e 1,5, a altitude emerge como um fator determinante para a obtenção de cafés de qualidade superior. Em altitudes entre 1.200 e 1.300 m, há uma probabilidade maior de obter cafés com uma avaliação média de 89 pontos. Da mesma forma, para tipologias de argila entre 2,5 e 5,0, a altitude pode influenciar na qualidade do café, aumentando a pontuação de 76 para 89 pontos. A contribuição da tipologia da argila torna-se ainda mais evidente quando o índice está entre 1,5 e 2,5, onde diferentes altitudes demonstram potencial semelhante para a obtenção de notas médias de 86 pontos. Estes estudos

Figura 4 - Interação da tipologia de argila com a altitude e avaliação sensorial de amostras de café da região da Mantiqueira de Minas, MG



Fonte: Borém et al. (2023).

Nota: Indica áreas com maior e menor nota sensorial da bebida do café. Notas pontuadas de acordo com a escala da Specialty Coffee Association (SCA).

representam uma contribuição significativa para a compreensão do impacto do solo na qualidade do café, fornecendo *insights* valiosos para aprimorar a produção cafeeira (Borém *et al.*, 2023).

Novas investigações estão em curso para explorar a interação entre a tipologia da argila, os genótipos das plantas e os métodos de processamento empregados, com vistas a compreender os efeitos desses fatores tanto na nota final do café quanto nos descritores sensoriais. Tais estudos estão revelando o considerável potencial dessa abordagem tecnológica para a identificação dos *terroirs* que apresentam as condições mais propícias para o cultivo e a produção de cafés especiais. Essa análise abrangente permitirá uma compreensão mais profunda das causas subjacentes às variações na qualidade e no perfil sensorial dos cafés, fornecendo *insights* valiosos para aprimorar as práticas de manejo e o beneficiamento, bem como para o desenvolvimento de estratégias de valorização e diferenciação de produtos no mercado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo das características ambientais na qualidade do café revela uma complexa interação entre diversos fatores, destacando-se a importância crucial do clima, do relevo e dos solos na produção de cafés especiais de alta qualidade. A transição recente para uma maior valorização da origem e da diversidade dos cafés brasileiros reflete a busca por excelência sensorial e sustentabilidade ambiental na cafeicultura nacional.

A compreensão dos efeitos das mudanças climáticas na cafeicultura é fundamental para garantir a resiliência do setor diante de desafios crescentes. Nesse sentido, a pesquisa continua desempenhando um papel vital na identificação de estratégias de adaptação e na promoção de práticas de manejo sustentáveis.

Os estudos sobre a interação entre o solo e a qualidade do café, especialmente por meio da mineralogia da argila,

oferecem perspectivas promissoras para melhorar a compreensão dos fatores que influenciam a qualidade da bebida. A utilização de abordagens inovadoras e tecnológicas abre caminho para a identificação de *terroirs* que oferecem as condições mais propícias para o cultivo e produção de cafés especiais.

O aprofundamento do conhecimento sobre as características ambientais, que impactam a qualidade do café, é essencial para impulsionar a cafeicultura brasileira rumo a um futuro sustentável e de excelência na produção de cafés de alta qualidade, atendendo às demandas crescentes do mercado global e garantindo a preservação dos recursos naturais para as gerações futuras.

REFERÊNCIAS

- AHMED, S. *et al.* Climate change and coffee quality: systematic review on the effects of environmental and management variation on secondary metabolites and sensory attributes of *Coffea arabica* and *Coffea canefora*. *Frontiers in Plant Science*, Wuhan, v.12, Oct. 2021.
- ALVES, H.M.R. *et al.* Características ambientais e qualidade da bebida dos cafés do estado de Minas Gerais. *Informe Agropecuário*. Produção de café: opção pela qualidade, Belo Horizonte, v.32, n.261, p.18-29, mar/abr. 2011.
- BARBOSA, J.N. *et al.* Discrimination of production environments of specialty coffees by means of stable isotopes and discriminant model. *Journal of Agricultural Science*, v.6, n.5, p.55-64, 2014.
- BARBOSA, J.N. *et al.* Isotopic signature of the relation between environment and the quality of special coffee. *African Journal of Agricultural Research*, v.14, n.6, p.354-360, Feb. 2019. Article F4E6F8D60204.
- BORÉM, F.M. *et al.* Coffee sensory quality study based on spatial distribution in the Mantiqueira mountain region of Brazil. *Journal of Sensory Studies*, v.35, n.2, Apr. 2020. [Article] e12552.
- BORÉM, F.M. *et al.* Fatores que afetam a produção de café especial. In: BORÉM, F.M. (org.) **Tecnologia pós-colheita e qualidade de cafés especiais**. Lavras: Editora UFLA, 2023. cap.7, p.262-327.
- BORÉM, F.M. *et al.* Influence of genetics, environmental aspects and post-harvesting processing on coffee cup quality. In: FARAH, A. (ed.). **Coffee: production, quality and chemistry**. [London]: Royal Society of Chemistry, 2019a. chapter 16, p.387-417.
- BORÉM, F.M. *et al.* Meteorological variables and sensorial quality of coffee in the Mantiqueira region OF Minas Gerais. *Coffee Science*, Lavras, v.14, n.1, p.38-47, 2019b.
- BRASIL. Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996. Regula direitos e obrigações relativos à propriedade industrial. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p.8353, 15 maio 1996. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03///LEIS/L9279.htm. Acesso em: 2 set. 2024.
- 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*, Campos dos Goytacazes, v.18, n.1, p.55-81, mar. 2006.
- DECAZY, F. *et al.* Quality of different honduran coffees in relation to several environments = Qualidade de diferentes cafés hondurenhos em relação a diferentes meio ambientes. *Journal of Food Science*, Chicago, v.68, n.7, p.2356-2361, 2003.
- FARAZ, M. *et al.* A systematic review of analytical and modelling tools to assess climate change impacts and adaptation on coffee agrosystems. *Sustainability*, Basel, v.15, n.9, 2023. [Article]14582.
- GOMES, L.C. *et al.* Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: a spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Amsterdam, v.294, Feb. 2020. [Article]106858.
- INPI. **Indicações Geográficas**. [Rio de Janeiro]: INPI, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/indicacoes-geograficas>. Acesso em: 3 set. 2024.
- MINAS GERAIS. Governo. **Zoneamento agroclimático do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2017. 220p.

POLLO, G.Z. Suscetibilidade magnética, atributos do solo e da planta na discriminação de áreas de manejo específico na cultura do café. 2013. 58f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 6.ed.rev. e ampl. Lavras: Editora UFLA, 2014. 378p.

SANCHEZ, M.G.B. et al. Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil-relief relationship and numerical classification. **Precision Agriculture**, New York, v.14, n.2, p.201-214, 2013.

SEDIYAMA, G.C. et al. Zoneamento agroclimático do cafeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo fundo, v.9, n.3, p.501-509, 2001. Número especial.

SIQUEIRA, D.S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v.155, p.55-66, 2010.

SISTEMA brasileiro de classificação dos solos. 5.ed.rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. 356p.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1957. 311p. (Publications in Climatology, v.10, n.3).

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

TOLESSA, K. et al. Influence of growing altitude, shade and harvest period on quality and biochemical composition of Ethiopian specialty coffee. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v.97, n.9, p.2849-2857, July 2017.

VAAST, P. et al. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v.86, n.2, p.197-204, Jan. 2006.

Cafeicultura do Cerrado



Este livro reúne o que há de mais atual em informações tecnológicas específicas para a cafeicultura do Cerrado, abordando todas as etapas do cultivo, com informações fundamentais para a gestão eficiente de propriedades cafeeiras.

Livraria EPAMIG
www.livrariaepamig.com.br
(31) 3489-5002
livraria@epamig.br



