



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Instituto de Biologia
Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação de
Recursos Naturais



**SERVIÇOS DE POLINIZAÇÃO EM DIFERENTES ESCALAS
ESPACIAIS: EFEITOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS NA
PRODUÇÃO DO CAFÉ (*Coffea arabica* L.)**

DESIRÉE AYUME LOPES MEIRELES

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M514s Meireles, Desirée Ayume Lopes, 1991
2019 Serviços de polinização em diferentes escalas espaciais [recurso eletrônico] : efeitos quantitativos e qualitativos na produção do café (*Coffea arabica* L.) / Desirée Ayume Lopes Meireles. - 2019.

Orientadora: Solange Cristina Augusto.

Coorientadora: Aline Theodoro Toci.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.1306>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Ecologia. 2. Café - Qualidade. 3. Polinização. 4. Ecossistemas. I. Augusto, Solange Cristina, 1966, (Orient.). II. Toci, Aline Theodoro, 1976, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais. IV. Título.

CDU: 574

Desirée Ayume Lopes Meireles

**SERVIÇOS DE POLINIZAÇÃO EM DIFERENTES ESCALAS ESPACIAIS:
EFEITOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS NA PRODUÇÃO DO CAFÉ (*Coffea
arabica* L.)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais.

Orientadora

Prof^a. Dr^a. Solange Cristina Augusto

Co-orientadora

Prof^a. Dr^a. Aline Theodoro Toci

UBERLÂNDIA

Fevereiro - 2019

Desirée Ayume Lopes Meireles

**SERVIÇOS DE POLINIZAÇÃO EM DIFERENTES ESCALAS ESPACIAIS:
EFEITOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS NA PRODUÇÃO DO CAFÉ (*Coffea
arabica* L.)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Ecologia e Conservação de Recursos
Naturais.

APROVADA EM 27/02/2019

Prof. Dr. André Rodrigo Rech

UFVJM

Prof. Dr. Pietro Kiyoshi Maruyama Mendonça

UFU

Prof^a. Dr^a. Solange Cristina Augusto

UFU

(Orientadora)

UBERLÂNDIA

Fevereiro - 2019

**“Here again we are reminded
that in nature nothing exists
alone.”**

Rachel Carson

À todas as formas de vida que existiram, existem
e existirão

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é resultado da contribuição de tantas cabeças, mãos e corações que se torna muito difícil distinguir onde uma colaboração termina e outra começa. Se essa não for uma tarefa realmente impossível, ela certamente é injusta. Como classificar a infinidade de interações que nos fazem ser quem somos? Neste mesmo sentido, mesmo com minhas limitações em enxergar o mundo de perspectivas que não minha, não sinto que seja correto agradecer somente àquelas interações em que estive presente. Se tenho a liberdade de estar aqui sentada redigindo estes agradecimentos, é porque muitas lutas foram travadas por pessoas anônimas a mim. Dito isso, a forma que acredito ser a mais justa é não cometer o equívoco de dar nomes às ações; apenas agradecendo aos caminhos cruzados e seu desfecho que é este trabalho.

Como indivíduo, não posso deixar de ser grata por tudo aquilo que me foi permitido alcançar. Por isso, gostaria de agradecer as mulheres do passado, do presente e do futuro. As primeiras, agradeço pelas portas abertas e eterna luta. As últimas, só posso sentir gratidão de onde, com toda certeza, irão chegar. Já as mulheres do agora agradeço pois foram quem permitiram que este trabalho fosse realizado. Desde à essência até a materialização, este trabalho foi fruto do trabalho de mulheres extraordinárias.

E aqui é necessário abrir exceções: Agradeço a presença, paciência e apoio (tanto profissional, quanto pessoal) da professora Solange Augusto, sem os quais não teria conseguido percorrer este caminho. Agradeço também à professora Aline Toci, que aceitou participar deste trabalho e desde então sua contribuição tem sido vital em muitos aspectos. Agradeço as duas pela dedicação e orientação incríveis. O amor e entusiasmo de vocês só me faz ter mais segurança de que estou seguindo o caminho certo!

Gostaria de agradecer a todos os produtores de café que gentilmente cederam seus espaços e conhecimentos que são parte integrante deste trabalho.

Também agradeço à todas as colaboradoras e coautoras. Este trabalho é tão meu quanto de vocês. Agradeço a todos do LECA (mesmo aqueles que passaram rapidamente) por toda a ajuda fundamental. Agradeço também a todos os amigos que, pela mais pura amizade, dedicaram um pouco do seu tempo para contribuir neste trabalho.

Sinto a necessidade de fazer agradecimentos pessoais, porque são essas pessoas que dão sentido à minha vida. Agradeço ao meu pai por razões que não podem ser enumeradas. Agradeço especialmente ao meu companheiro de vida. Este agradecimento poderia também estar no parágrafo acima, mas o que ele representa vai muito além do que tenho capacidade de manifestar. E aqui os agradecimentos ficam quase redundantes, mas gostaria de agradecer a todos os amigos.

Abro outras exceções para agradecer ao professor Bo Dalsgaard, professor Pietro Maruyama e à Céline Moreaux pela oportunidade de trabalhar na Jamaica. Agradeço também a ajuda da professora Eloísa Ferro e professor Paulo Eugênio de Oliveira por todo suporte burocrático para a concretização desta experiência.

Finalmente, gostaria de agradecer aos coordenadores dos laboratórios LAMOVI e LADEVI por cederem o espaço e equipamentos para utilização e as coordenadoras dos laboratórios LAFIVE e laboratório da ESTES pela prontidão em ajudar. Gostaria de agradecer aos técnicos e funcionários da UFU e Unila pela colaboração com este trabalho e à ao projeto CNPq/MCTIC/IBAMA/Associação ABELHA nº 32/2017 (Processo: 400614/2018-9). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	1
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivos específicos.....	5
3. MATERIAL E MÉTODOS	5
3.1 Área de estudo e seleção de paisagens	5
3.2 Serviços de Polinização.....	8
3.3 Parâmetros físicos e processamento.....	8
3.4 Análise dos compostos voláteis.....	9
3.5 Análise de paisagem	10
3.6 Análises Estatísticas.....	11
4. RESULTADOS.....	14
4.1 Efeito da polinização na frutificação.....	14
4.2 Efeito da polinização no peso dos frutos	15
4.3 Efeito da polinização na composição orgânica de voláteis	15
4.4 Influência da Paisagem	18
5. DISCUSSÃO.....	24
5.1 Efeito da polinização na frutificação.....	25
5.2 Efeito da polinização no peso médio dos frutos	25
5.3 Efeito da polinização na composição orgânica de voláteis	26
5.4 Influência da Paisagem	28
6. CONCLUSÃO	32
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
8. ANEXOS.....	46

RESUMO

Cerca de 70% dos cultivos agrícolas mais importantes dependem em algum grau de polinização biótica. Contudo, ações antrópicas vêm modificando o ambiente e colocando em risco a persistência destes organismos promotores da polinização. A relação da polinização biótica com o aumento de produtividade é descrita para muitos cultivos. Ainda, a magnitude em que a polinização pode incrementar a produção de cultivos agrícolas pode ir além de medidas quantitativas, podendo interferir nas propriedades químico-físicas destes cultivos, modificando assim, a qualidade destes produtos. Para o café, esta variação qualitativa é muito importante para o valor final do produto, visto que este tem variação de preço de acordo com a sua classificação de qualidade. Por esta razão, os objetivos deste trabalho foram verificar o incremento da produtividade em parâmetros quantitativos e qualitativos. Os parâmetros avaliados foram: a razão de frutos formados; o peso médio dos frutos e a composição de voláteis orgânicos. Para a obtenção destes dados, foram selecionadas 30 áreas onde experimentos de exclusão de polinizadores foram realizados em 5 indivíduos. Em cada indivíduo, dois ramos foram selecionados, o número de botões florais contados e um destes foi ensacado para prevenir polinização biótica. Ao fim do período de desenvolvimentos, os frutos foram contados, pesados e submetidos à processamento para obtenção do café verde. O café verde foi torrado e foi realizada a análise de voláteis utilizando GC-MS. Nós encontramos que a polinização biótica aumentou a produção de frutos, quando comparado aos ramos ensacados, onde apenas autopolinização e anemofilia foram possíveis. Ainda, existiu um incremento da composição de voláteis na comparação destes dois tratamentos, onde muitos grupos químicos funcionais de voláteis orgânicos ligados à qualidade foram encontrados em maior abundância nos ramos expostos à polinização biótica. Ainda, a contribuição da polinização biótica varia de acordo com características da paisagem. A forma como estruturar a paisagem para obtenção da polinização, como criação de corredores entre fragmentos e plantação de áreas de cultivo com uma maior relação de perímetro podem ser algumas das medidas tomadas para o incremento na produção através da polinização biótica.

Palavras-chave: Café, *Coffea arabica* L., serviços ecossistêmicos, polinização, composição de voláteis

ABSTRACT

About 70% of the most important agricultural crops depend on some extent of biotic pollination. However, anthropogenic actions have been modifying the environment and endangering the persistence of these organisms that promote pollination. The relationship of biotic pollination operating in increasing the productivity is described for many crops. Furthermore, the magnitude at which pollination can increase agricultural crop production can go beyond quantitative measures and may interfere with the chemical-physical properties of these crops, thus modifying the quality of these products. For coffee, this qualitative variation is very important for the final value of the product, since its price varies accordingly to its quality classification. For this reason, the objectives of this study were to verify the productivity increment in quantitative and qualitative parameters. The evaluated parameters were: the ratio of fruit set; the mean weight of the fruits and the composition of organic volatiles. To obtain these data, we selected 30 areas where pollinator exclusion experiments were performed in 5 individuals. In each individual, two branches were selected, the number of floral buds counted and one of them was bagged to prevent biotic pollination. At the end of the development period, the fruits were counted, weighed and submitted to processing to obtain the green coffee. The green coffee was roasted and volatile analysis was performed using GC-MS. We found the biotic pollination increased fruit yield when compared to the bagged branches, where only self-pollination and anemophilia were possible. Furthermore, there was an increase in the composition of volatiles in the comparison of these two treatments, where many functional chemical groups of organic volatiles linked to the quality were found in greater abundance in the branches exposed to biotic pollination. Still, the contribution of biotic pollination varies according to landscape characteristics. How to structure the landscape to obtain pollination, such as creating corridors between fragments and planting of cultivated areas with a greater perimeter relation, may be some measures taken to maximize the effectiveness of pollination.

Key words: Coffee, *Coffea arabica* L., ecosystem services, pollination, volatiles composition

1. INTRODUÇÃO

A degradação antropogênica de ecossistemas é considerada um dos principais fatores da perda de biodiversidade global (Krauss *et al.* 2010, Pereira *et al.* 2010). Mundialmente, cerca de 45% dos ecossistemas terrestres foram transformados por ações antrópicas (Foley *et al.* 2005). Apesar dos esforços mundiais, não existem consenso nas medidas efetivas para unir a conservação natural com as necessidades humanas (Balmford *et al.* 2012). Pensar essas transformações como geradoras de consequências não apenas para a biodiversidade, mas também para os serviços ecossistêmicos, é uma forma de permear entre essas duas demandas (Ibisch *et al.* 2010), principalmente em países em desenvolvimento, onde os problemas de governabilidade são mais acentuados e a agricultura é um pilar central da economia (Wright *et al.* 2012). Serviço ecossistêmico é definido como a interação de organismos e sistemas naturais, com implicância na economia e bem-estar humano (Costanza *et al.* 1997, Maes *et al.* 2012) e é também considerado em risco de persistência (Palmer *et al.* 2004).

O campo da biologia da conservação tomou corpo na década de 80 (Soulé 1985). Contudo, a definição original não leva em consideração aspectos do bem-estar humano, o que levou à reformulação do conceito, agora chamado de ciência da conservação (Kareiva & Marvier 2012). A partir da ciência da conservação, é possível pensar na conservação alinhada com aspectos sociológicos, econômicos e questões de políticas públicas (Kareiva & Marvier 2012). Dentro destas novas perspectivas, a conservação de habitats, e a consequente conservação da biodiversidade, pode ser alcançada através de estudos com base nos serviços ecossistêmicos e suas consequências na economia (Costanza *et al.* 1997, Maes *et al.* 2012). Esta interação se torna mais evidente quando se leva em consideração que, assim como a biodiversidade, 60% dos serviços ecossistêmicos estão sendo manejados de forma não sustentável e em estado de degradação (Hassan & Scholes 2005).

Um dos principais serviços ecossistêmicos é a polinização (Kremen 2005), com lucro mundial calculado entre 235 à 577 bilhões de dólares ao ano (IPBES 2016). O total de perda monetária associada à perda do serviço de polinização animal é estimada entre 190 a 310 bilhões de euros ao ano (Gallai 2009). Na agricultura, mais de 70% dos cultivos dependem em algum grau da polinização (Klein *et al.* 2007). No Brasil, a monetarização da polinização é estimada em R\$ 43 bilhões anuais na produção de alimentos (BPBES 2019). Agrupando os benefícios da polinização à agregação de valores na economia, cultivos com grande importância econômica podem ter papel central na conservação.

Os agentes de polinização têm papel central na manutenção da variabilidade genética das espécies vegetais, e geram efeitos na produção e na qualidade de diversos cultivos agrícolas (Kremen 2005, Breeze *et al.* 2011). Mesmo em espécies vegetais autocompatíveis, a polinização biótica confere aumento da quantidade e qualidade dos frutos (DeMarco & Coelho 2004). Para estas espécies, quando também ocorre a polinização cruzada, também há redução nos índices de má formação, aumento no teor de óleo e outras substâncias, diminuição no tempo do ciclo completo de algumas culturas agrícolas e uniformização no amadurecimento dos frutos, acarretando em menores perdas durante a colheita (Williams *et al.* 1991, Oliveira *et al.* 2017). O serviço de polinização possui também importância social, visto que cultivos dependentes de polinização animal são responsáveis pela maior parte do conteúdo da dieta humana de lipídios, vitaminas A, C, E, cálcio e ferro no mundo (Eilers *et al.* 2011).

Cerca de 75% dos insetos responsáveis pela polinização das angiospermas são abelhas (Hymenoptera, Apidae) (Klein *et al.* 2007). As abelhas têm relação íntima com a evolução das Angiospermas e necessitam destas ao longo de todo seu ciclo de vida, tanto como alimento larval (pólen, néctar e óleos) como também na fase adulta (Corbet *et al.* 1991, Rasmussen *et al.* 2010). Por conta disso, o sucesso de nidificação e manutenção das abelhas depende da disponibilidade de recursos florais em sua área de forrageamento (Greenleaf & Kremen 2006). Por conta desta dependência de áreas naturais para a subsistência de agentes polinizadores em áreas agrícolas, uma forma indireta de inferir os serviços de polinização é através da análise de paisagem, já que

a maioria dos agentes polinizadores dependem fortemente de áreas de remanescentes naturais no entorno da plantação.

A paisagem é composta por um complexo mosaico de ecossistemas interativos, sendo estruturada por tamanho, forma e disposição espacial destes ecossistemas (Metzger 2001, Kent 2007). Fragmentação e degradação de habitats naturais próximos aos cultivos pode ser prejudicial para a diversidade de abelhas (Steffan-Dewenter *et al.* 2002, 2006, Larsen *et al.* 2005, Cane *et al.* 2006), sendo considerado o maior fator causal da perda de importantes fontes de recursos e sítios de nidificação (Hines & Hendrix 2005, Potts *et al.* 2005). A riqueza e a abundância das comunidades de abelhas estão associadas ao aumento de produtividade em diversos cultivos (Greenleaf & Kremen 2006, Vilhena *et al.* 2012).

O café (*Coffea arabica* L.), da família Rubiaceae, a única espécie dentro do gênero *Coffea* auto-compatível (Asquini *et al.* 2011), é um dos commodities agrícolas mais importantes do mundo (FAO 2015). Diferentemente da maioria dos cultivos agrícolas, o café é uma cultura que possui grande variação no preço final do produto beneficiado, principalmente devido aos cafés especiais (McManus 2007). É um cultivo com várias classificações, sendo consumido por todas as classes sociais (Loureiro e Lotade 2005). O mercado de café especial é fortemente influenciado pelas mudanças de preferências dos consumidores e está em constante crescimento (ABIC 2017). Desta forma, o conhecimento da qualidade do café é um passo chave na variação de preço e determina o potencial de exportação de países produtores de café (Tolessa *et al.* 2016), como no caso do Brasil que é o maior exportador mundial.

Apesar do grande volume de produção (63,7 milhões de sacas de 60 Kg em 2018), o Brasil possui problemas na qualidade e, conseqüentemente, na valorização do café exportado (FAO 2015). Isso se deve principalmente pela falta de manejo adequado nas várias etapas da produção (Poltronieri & Rossi 2016). A qualidade dos grãos de café é medida por características como tamanho, forma, densidade, cor e aparência dos grãos, a proporção de grãos defeituosos, beneficiamento, torrefação e qualidade sensorial, que consiste em parâmetros aromáticos,

gustativos e caracterização geral da bebida (Illy & Viani 2005). Todavia, cada região produtora no mundo possui protocolos próprios de critérios bases, classificados por especialistas na avaliação de café (Toledo *et al.* 2016). Alguns estudos têm demonstrado que existe um incremento da produtividade do café relacionada com o aumento da polinização biótica (Roubik 2002a, DeMarco & Coelho 2004, Priess *et al.* 2007, Olschewski *et al.* 2007, Saturni 2016). Apesar de ser autocompatível, a polinização natural contribui para a formação de frutos do café (Roubik 2002a,b, Klein *et al.* 2003a,b, Ricketts *et al.* 2004). Mesmo quando comparados com tratamentos onde a autopolinização e a polinização anemófila eram permitidas, ou mesmo com a suplementação de pólen próprio, a polinização biótica natural produz mais frutos (Klein *et al.* 2003b).

O estado de Minas Gerais está localizado na região Sudeste, sendo o estado de maior produtividade de café do Brasil, responsável por cerca de 60% da produção Nacional e uma das principais fontes de cafés especiais do país (ABIC 2017). Uma das regiões com certificação de procedência é a região do “Cerrado de Minas” (Sebrae 2015). O Cerrado, predominante na região, é o segundo maior bioma da América Latina (Cardoso & Bates 2002). Cobrindo 21% da área do país (Borlaug 2002), é considerado um dos principais *hot-spots* do mundo (Myers *et al.* 2000). Contudo, mais de 55% do total de áreas naturais já foi modificado de forma antrópica (Cardoso & Bates 2002). Por essas características, o Cerrado é um bioma central nos estudos de conservação e o café, um potencial cultivo de valoração à sustentabilidade.

2. OBJETIVOS

A presente dissertação tem como objetivo avaliar o incremento da produtividade do café, através de parâmetros qualitativos e quantitativos, relacionado a polinização biótica. Os parâmetros de qualidade do café avaliados foram: a razão de frutos formados; o peso médio dos frutos e a composição de voláteis orgânicos. Para a obtenção destes dados, foram selecionadas 30 áreas onde experimentos de exclusão de polinizadores seriam realizados em 5 indivíduos.

2.1 Objetivos específicos

Por estas razões, os objetivos deste trabalho são (i) quantificar a contribuição da polinização para a produtividade do café, pela comparação entre ramos onde apenas autopolinização e anemofilia poderiam ocorrer; e ramos onde estas duas formas de polinização poderiam ocorrer, porém também poderia ocorrer polinização biótica (ii) Avaliar existem variações na composição físico-química e de compostos voláteis do café, de acordo com as formas de polinização e (iii) verificar se a paisagem onde estão inseridos os plantios pode explicar as variações dos parâmetros quantitativos e qualitativos da produção de café. Assim, espera-se que a polinização biótica contribua com o incremento quantitativo e qualitativo da produção de café. Também se espera que áreas com paisagens com maior porcentagem de área natural possam manter maior número de visitante florais, possibilitando o incremento de produção por polinização biótica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo e seleção de paisagens

O estudo foi realizado em nove municípios na região do Triângulo Mineiro, Minas Gerais em 30 áreas de cultivo de café (Figura 1). Dentre os municípios, três se destacam pelo tamanho e pela produtividade. A cidade de Monte Carmelo (18° 43' 29" S; 47° 29' 55" W) com 890 m de altitude, apresenta temperatura média anual de 21.2°C, precipitação média anual de 1444 mm e relevo predominantemente ondulado (60%). Indianópolis (19°02'19"S; 47°55'01W) tem temperatura média anual de 21.5°C, com 1420mm de chuva e está a 849m acima do nível do mar. A cidade de Araguari (18° 38' 50" S; 48° 11' 14" W) com 1013 m acima do nível do mar e com temperatura média similar à Monte Carmelo, apresenta um índice médio anual de pluviosidade de 1566 mm com relevo predominantemente plano (50%) (Figura 1S). A região do Triângulo mineiro é uma das regiões com certificação de origem para produção de café no Brasil. A vegetação original predominante é o Cerrado, o Segundo bioma da América Latina com maior

endemismo, sendo considerado como “hotspot” global em risco (Myers *et al.* 2000). Atualmente, a região conta com apenas 25% da vegetação original, composta por um mosaico de pastos, áreas de cultivo e plantação de *Eucalyptus* (Sano *et al.* 2008).

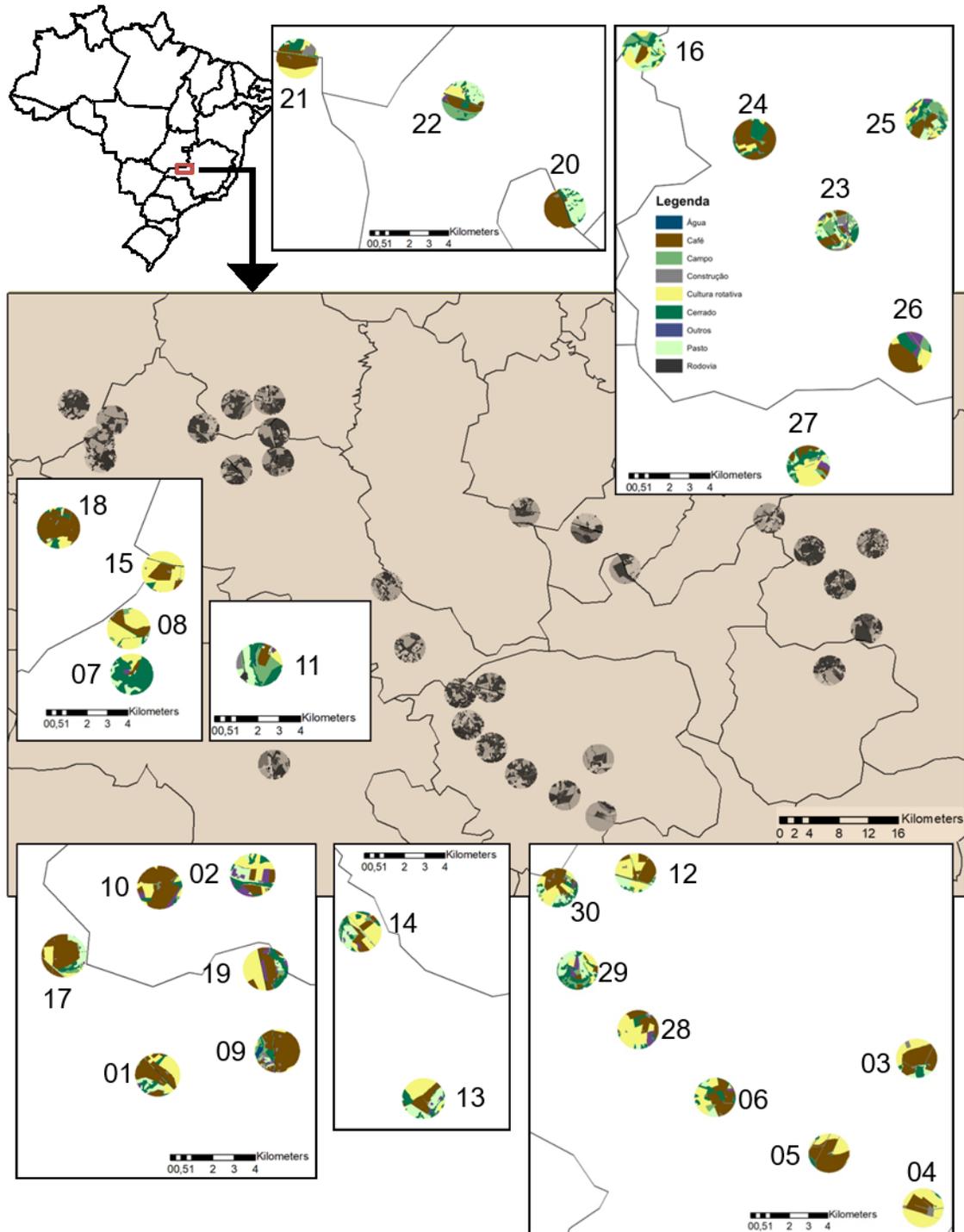


Figura 1. Localização das paisagens onde foram realizados os experimentos na região do Triângulo Mineiro, Brasil. Em cada área, foram selecionados aleatoriamente cinco indivíduos de

café com distância mínima de 300m entre eles. Dois ramos foram selecionados em cada para conduzir os tratamentos PA e EPB. A classificação do uso do solo está apresentada no raio de 1km. Classes estão discriminadas na legenda.

3.2 Serviços de Polinização

Para realização dos experimentos, foram selecionados 5 arbustos dentro de cada uma das 30 plantações, com distância mínima de 300 metros entre os indivíduos. Os experimentos foram realizados na mesma posição em relação ao Sol a fim de evitar diferenças no grau de insolação (Poltronieri & Rossi 2016). Cada indivíduo selecionado foi marcado e as coordenadas registradas. De um a cinco dias antes da floração, dois ramos vizinhos em cada arbusto experimental foram selecionados, em torno de 1,5 metros do chão (Reis & Arruda 1956). Neste momento, o total de botões florais em cada ramo foi contado. Cada um dos ramos recebeu um aleatoriamente um tratamento diferente (1) Polinização Aberta (PA), onde o ramo permaneceu sem manipulação. Neste ramo, todos os visitantes florais tiveram acesso às flores, mas também era possível autopolinização e polinização por vento. (2) Exclusão de Polinização Biótica (EPB), onde o ramo foi ensacado com malha de trama média, e permaneceu fechado até o final do período de floração, excluindo visitantes florais, porém permitindo a autopolinização e polinização pelo vento. O desenvolvimento dos frutos foi acompanhado e a taxa de aborto foi medida em duas fases: 4 semanas após a floração (*pinhead drop*) e ao fim do ciclo de desenvolvimento dos frutos, caracterizado pela mudança total da cor verde para vermelho ou amarelo, dependendo da variedade (DaMatta *et al.* 2007).

3.3 Parâmetros físicos e processamento

Ao fim do ciclo de maturação, todos os frutos foram coletados. Foi realizada a medida do percentual de frutos formados em relação ao número de botões florais iniciais nos dois

tratamentos, PA e EPB. Os frutos amostrados foram contados, pesados e descascados. Todas as sementes foram lavadas para remover o integumento e então secados em estufa, em camada única de grãos, à 40°C por 72h, virando as amostras em intervalos de aproximadamente 8h a fim de evitar fermentação indevida.

3.4 Análise dos compostos voláteis

Para verificar a diferença de qualidade entre os tratamentos, foram realizadas análises da composição de voláteis utilizando a microextração em fase sólida (SPME) e a cromatografia em fase gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM), de acordo com Toci *et al.* (2008) com algumas adaptações. Para obter peso mínimo das amostras, suficientes para a realização do processamento do café, 10 áreas foram aleatoriamente selecionadas e suas amostras foram agrupadas respeitando o tipo de tratamento de polinização proveniente, totalizando 20 amostras diferentes. Para o preparo das amostras, o café foi torrado em torrador laboratorial de leito fluidizado, com temperatura de fluxo média de 190°C por 10 minutos. (Satellite Int. Co., modelo A-PC131, 1200W). Os grãos torrados foram moídos com granulometria média de 500 µm e 0,50 gramas de cada amostra foram transferidos para “vials” de 20mL durante um período de 12 horas a fim de alcançar equilíbrio. Após este período, os vials foram colocados em banho de silicone à 60°C por 30 minutos em placa de aquecimento com controlador de temperatura (IKA® C-MAG HS 7). Para a extração dos voláteis utilizou-se a fibra trifásica DVB/CAR/PDMS (DivinilBenzeno/Carboxen/-PoliDimetilSiloxano) da Supelco Co. (Bellefonte, PA, USA). Após este período, a seringa de SPME foi exposta dentro do Headspace no vial por outros 30 minutos à 60°C. Após este período, a fibra foi injetada no espectrômetro de massa, sendo retirada após 15 minutos da injeção no equipamento. Todos os experimentos foram feitos em duplicata para cada amostra. Os compostos foram identificados pelos seus índices relativos de retenção e com auxílio do banco de dados do software para GC-MS da Chromeleon 7.2. Com a identificação dos compostos, foi realizada a integração dos picos de forma manual. A partir disso, foram extraídos os valores áreas de cada pico, com a utilização do Software Thermo Xcalibur Quan Browser.

3.5 Análise de paisagem

Para as análises do efeito da paisagem foi estabelecida distância mínima entre os centróides das áreas de 5km. O mapeamento das áreas foi realizado com auxílio do programa ArcMap, dentro do sistema ArcGis (10.34). O mapeamento foi feito utilizando World Imagery da ESRI como mapa base, na escala de referência de 1:5.000. Com base nestes mapas, três diferentes escalas foram selecionadas para o mapeamento: raio do centroide de 500m, 1km e 2km. Estes raios foram selecionados a fim de obter diferentes valores de cobertura de vegetação natural e matriz de café, pensando no raio de forrageamento e alcance das espécies de visitantes florais. Foram extraídas métricas no nível de heterogeneidade da paisagem e das classes que compõem a paisagem, utilizando o programa Patch Analyst v5.2 (Rempel, Kaukinen, Carr 2012). As métricas de selecionadas representaram diversidade de ambientes, tamanho de área, borda, forma e subdivisão das classes que ocorreram em todas as paisagens e que estão associadas à polinização biótica. O Nível é onde a métrica opera, podendo ser no nível do fragmento, da classe de fragmentos ou da paisagem como um todo; o Tipo de métrica se refere àquilo que ela mede, podendo ser forma, área, borda, fragmentação, heterogeneidade entre outras (Tabela 1). Para analisar quais escalas poderiam influenciar a produção de café, realizamos a análise dos componentes principais (PCA) para extrairmos os valores dos eixos das componentes que obtiveram valor cumulativo de no mínimo 0.7. Utilizando os valores dos eixos da PCA, nós conseguimos retirar o efeito do viés das variáveis colineares e assim ter referência mais da influência da paisagem (Figuras S1, S2 e S3).

Tabela 1. Métricas selecionadas de caracterização da paisagem. Nível: considera a grau espacial em que a métrica foi extraída; Tipo: aspecto da paisagem quantificado; Classes: quais classes para as quais foram extraídas as métricas.

Métrica	Nível	Tipo	Classes
Média do índice de formato (ponderada pela área)	Classe	Forma	Café / Área natural
Total de borda	Classe	Borda	Café / Área natural
Perímetro médio	Classe	Borda	Café / Área natural
Área média	Classe	Área	Café / Área natural
Número de fragmentos	Classe	Subdivisão	Café / Área natural
Área de cobertura total	Classe	Área	Café / Área natural
Índice de Shannon ponderado (heterogeneidade de classes)	Paisagem	Diversidade	*

3.6 Análises estatísticas

Para compreender como polinização biótica pode afetar características quantitativas e qualitativas da produção de café, os frutos provenientes de PA e EPB foram comparados quanto aos seguintes parâmetros: Produção de frutos formados, peso médios dos frutos e composição de voláteis nos grãos torrados. Tanto para a análise do percentual de frutos formados em ambos os tratamentos, quanto para o peso médio dos frutos, nós realizamos um teste t pareado entre ramos com diferentes tratamentos em um mesmo indivíduo. Para a análise da composição de voláteis, nós realizamos um teste t pareado para cada composto encontrado. Os valores dos testes t dos diferentes voláteis foram agrupados por grupos químicos funcionais a fim de verificar se existem diferenças na composição aromática entre os tratamentos. Os resultados foram

plotados e foram considerados significativamente diferentes aqueles que o intervalo de confiança de 95% não cruzou com o intercepto em zero.

Após verificar se existia influência da polinização biótica em parâmetros quantitativos e qualitativos do café, procuramos encontrar fatores da paisagem que explicam esta variação na contribuição da polinização nos parâmetros onde encontramos significância.

Primeiramente determinamos quais escalas da paisagem foram significativas para a variação da contribuição da polinização biótica. Pensando nas variações de comportamento de forrageio e necessidades ambientais dos diferentes grupos de agentes polinizadores, nós realizamos o mapeamento e classificação de três escalas espaciais diferentes. Contudo, estas escalas são aninhadas, já que são calculadas a partir do mesmo centroide. Por esta razão, é importante ver a influência das escalas separadamente, a fim de evitar problemas da correlação das métricas. Para verificarmos quais escalas eram importantes para explicar as variações da contribuição da polinização nas características de produtividade do café, nós integramos as métricas espaciais de cada escala através da transformação ortogonal. Esta transformação retira o efeito da covariação entre as variáveis e também entre os diferentes eixos da PCA (Borgognone *et al.* 2001). Com isso, selecionamos as PC que tinham valor de variância explicativa cumulativo de 0.7, afim de construir um modelo robusto. As variáveis preditoras foram as métricas componentes das escalas significativas. Para isso, realizamos a transformação ortogonal das métricas componentes de cada escala para que o conjunto dos efeitos das métricas fossem somados. Os eixos da PCA com valor cumulativo iguais ou superiores à 0.7 foram selecionados, sendo que para as três diferentes escalas, este valor acumulado foi encontrado os três primeiros componentes. A partir das escalas selecionadas, foram construídos modelos lineares com base na composição e nas características das classes principais da paisagem. Como critério para a construção dos modelos, métricas colineares de uma mesma classe não entraram no mesmo modelo. Para verificar se as variáveis preditoras eram colineares, nós utilizamos um teste de correlação de Pearson. Combinações de efeitos de heterogeneidade espacial, área, borda e forma de cobertura, assim como fragmentação foram realizados.

Nós calculamos o valor da contribuição da polinização biótica (CPB) utilizando média da diferença entre os valores dos tratamentos PA e EPB de cada área, visto que em ambos os tratamentos existiu a possibilidade de autopolinização e anemofilia, porém em PA foi possível também a polinização biótica. Os valores de CPB foram calculados para todas as características quantitativas ou qualitativas da produção de café onde foi verificada a influência da polinização. Essa nova métrica foi utilizada como variáveis respostas destes modelos. Para a composição de voláteis, o número de áreas foram 10, respeitando o número de áreas onde foi possível realizar a análise. Estas diferenças entre os tratamentos, foi considerada como a contribuição da polinização na situação de exposição aos visitantes florais (CP). A diferença entre os tratamentos foi utilizada a fim de controlar variação intrínseca de diferentes variedades e cuidados com o plantio, que inseririam fatores de confusão no modelo, caso fossem utilizados apenas os valores encontrados para os tratamentos de PA. Para a caracterização dos voláteis, uma PCA foi feita para extrair o eixo de variação geral em relação a todos os componentes (Figura S4). Apesar de simplificar os dados globais, esta abordagem foi escolhida para que fosse possível analisar toda a composição de voláteis juntas, já que as interações e efeitos sinérgicos entre os diferentes compostos não é facilmente determinada, sendo difícil sua separação (Borgognone *et al.* 2001).

A partir disso, foi realizada seleção de modelos com Critérios de Informação de Akaike (AIC) para o déficit de polinização e o Critério de Akaike com correção de segunda ordem para amostras pequenas (AICc) (Burnham & Anderson 2002) para a composição de voláteis dos diferentes locais. Todos os modelos com valores de delta AIC e delta AICc menores ou iguais à dois seriam considerados igualmente possíveis.

4. RESULTADOS

4.1 Efeito da polinização na frutificação

Observou-se diferença entre a razão de frutos formados para os tratamentos de polinização: (I) Polinização Aberta (PA) (Média = 54%, DP = 31.65%) e (II) Exclusão de Polinização Biótica (EPB) (Média = 41%, DP = 28.18%). Quando tomados par a par, 75% dos ramos expostos tiveram maior percentual de frutificação comparados ao ramo ensacado do mesmo indivíduo ($t_{(pareado)1,142} = -9.73$, $p < 0.0001$) (Figura 2).

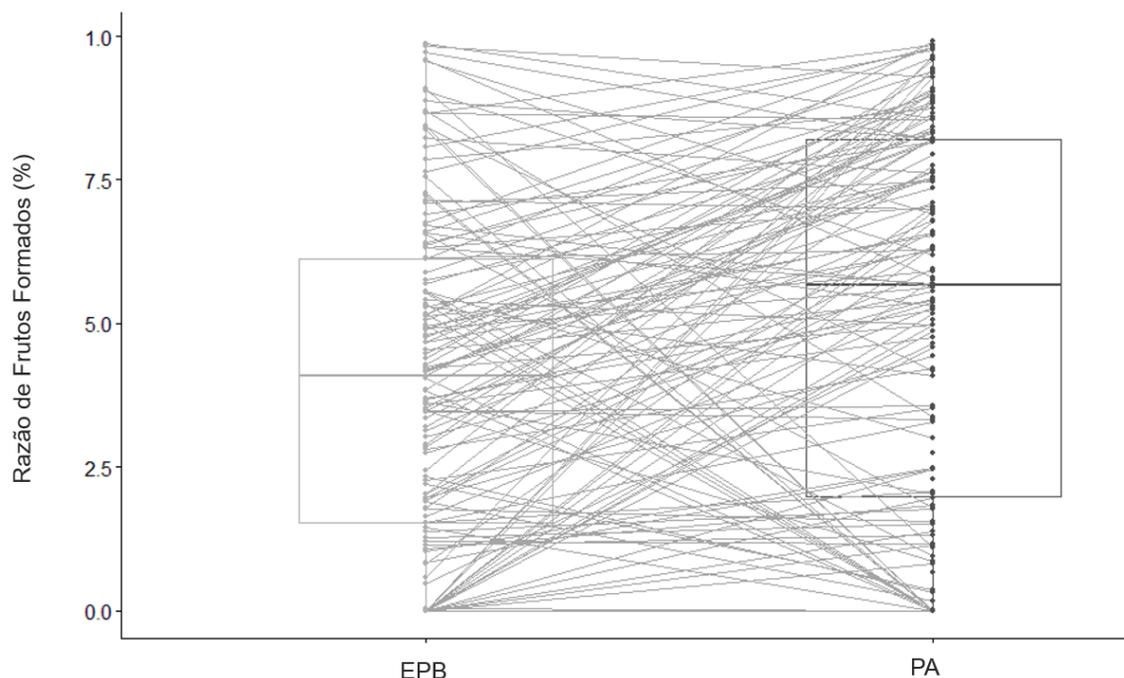


Figura 2. Razão de frutos formados nos tratamentos de exclusão de polinização biótica (EPB), com inflorescências ensacadas, e tratamentos de polinização aberta (PA). Valores de mediana, quartis e limites para os tratamentos na totalidade. As linhas ligam os valores encontrados nas amostras pareadas pelos indivíduos.

4.2 Efeito da polinização no peso dos frutos

Não foram encontradas diferenças entre os tratamentos pareados quanto ao peso médio dos frutos ($t = -0.3384$, $df = 96$, $p\text{-value} = 0.7358$) (Figura 3).

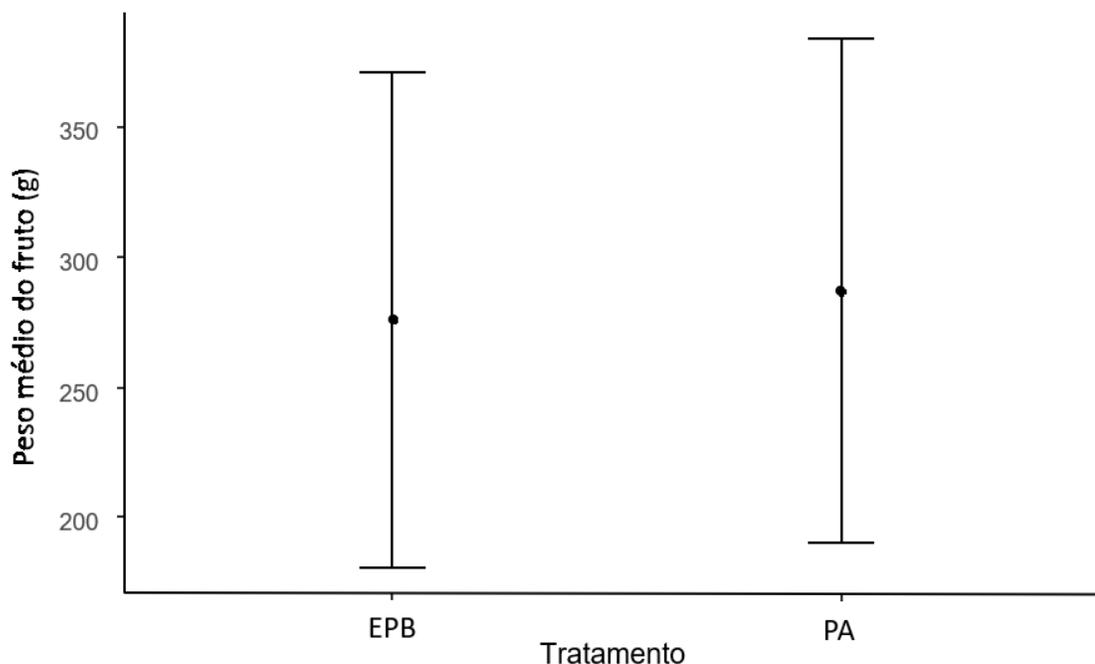


Figura 3. Peso médios dos frutos de café, *Coffea arabica*, nos tratamentos Tratamento de Exclusão de Polinização (EPB) e Tratamento Aberto à polinização (AP).

4.3 Efeito da polinização na composição orgânica de voláteis

Em relação aos grupos químicos funcionais, encontramos um total de 73 compostos voláteis orgânicos. Destes, os grupos encontrados foram: Álcool ($n=4$); Furano ($n=16$); Cetona ($n=15$); Fenol($n=5$); Pirazina ($n=18$); Piridina ($n=4$); Pirrole ($n=6$); outros ($n=5$). Houve diferença entre os tratamentos quanto à composição de Alcoois, Pirazinas, Piridinas e Pirroles, sendo maior no tratamento exposto à polinização. Encontramos um valor marginalmente significativo para compostos da família Cetona (Figura 4). Considerando a composição geral, houve diferença de

composição de voláteis entre os tratamentos, sendo maior também no tratamento exposto à polinização biótica. Os valores dos testes t de Tukey, assim como os erros padrões dos testes se encontram na Figura 4.

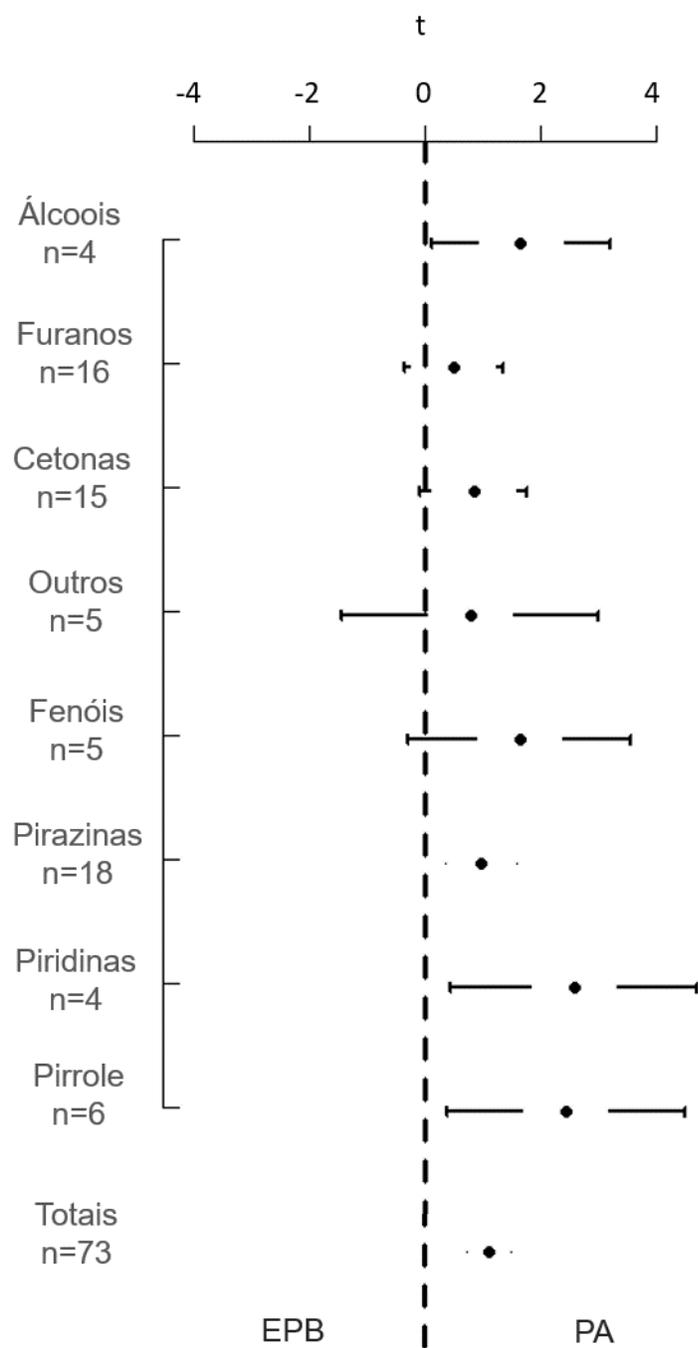


Figura 4. Valores do teste t para os grupos químicos funcionais e para o total de compostos (n=73). Quando a média do valor de t é negativo, significa que a média dos valores dos compostos dos grupos é maior no tratamento EPB. Quando a média do valor de t é positivo, significa que a

média dos valores dos compostos dos grupos é maior no tratamento PA. A barra de erro é o intervalo de confiança de 95%. As diferenças foram consideradas significativas quando o intervalo de confiança não cruza com o intercepto em zero.

4.4 Influência da Paisagem

Em relação às escalas, nem o conjunto de métricas espaciais do raio de 500m, nem o conjunto do raio de 2km foram importantes para a variação de frutificação, nem da composição dos voláteis (Tabela 2ab). Quando testadas as relações entre as métricas espaciais da escala de 1km de raio do centróide das áreas, o único modelo selecionado tanto para CP na frutificação, quanto para CP na composição de voláteis foi o modelo que contava com as métricas Perímetro médio da áreas de café (MPE1c) (II) Número de área naturais (NumP1) (Tabela 3). As métricas de classes de formato dos fragmentos, total de bordas, área média dos fragmentos e o total de cobertura não contribuíram significativamente em explicar as variações da contribuição da polinização biótica para formação de frutos e composição de voláteis (Tabela 3). A métrica no nível da paisagem de heterogeneidade também não teve efeito significativo em nenhuma das duas medidas de contribuição da polinização. Nenhuma das variáveis selecionadas nos modelos foram correlacionadas. Os modelos foram ajustados tanto para a contribuição da polinização biótica na frutificação, com uma relação negativa para o número de fragmentos naturais (Figura 5) e positiva com o perímetro médio das áreas de café (Figuras 6); Enquanto que para composição de voláteis, ambas métricas tiveram relação negativa com a contribuição da polinização biótica (Figuras 7 e 8).

Tabela 2. Seleção de modelos com utilização do Critério de Seleção de Akaike para amostras pequenas (AICc) para determinação das escalas importantes na variação de contribuição da polinização. (a) Para os valores de contribuição na frutificação (b) Para valores de contribuição na composição de voláteis. As escalas utilizadas foram: 500m, 1km e 2km de raio do centroide da área. Modelos com valores de Delta AICc menores ou iguais à dois foram considerados igualmente prováveis.

	Num. Obs	AICc	Delta AICc	Peso	Peso Cumulativo	Log (Verossimilhança)
(a) Frutificação						
1km	9	-31.35	0.00	0.91	0.91	29.18
2km	9	-26.76	4.59	0.09	1.00	26.88
500m	9	-13.33	18.02	0.00	1.00	22.59
(b) Compostos Voláteis						
1km	9	6.69	0.00	0.89	0.89	10.15
500m	9	11.51	4.82	0.08	0.97	10.17
2km	9	13.33	6.64	0.03	1.00	6.84

Tabela 3. Três primeiros modelos selecionados para determinação das métricas de paisagem importantes na variação de contribuição da polinização. (a) Para os valores de contribuição na frutificação com utilização do Critério de Seleção de Akaike (AIC) (b) Para valores de contribuição na composição de voláteis com utilização do Critério de Seleção de Akaike para amostras pequenas (AICc). Modelos com valores de Delta AIC ou AICc menores ou iguais à dois foram considerados igualmente prováveis. Modelos onde o Delta AIC ou AICc foram maiores que dois não foram considerados significativos. As métricas de paisagem selecionadas nestes modelos foram: Perímetro médio dos fragmentos de café (MPE1c); Perímetro médio dos fragmentos naturais (MPE1); Número de fragmentos naturais (NumP1); Número de fragmentos de café (NumP1c); Cobertura total de vegetação natural (CA1); Cobertura total de café (CA1c).

	Num. obs	AIC	Delta AIC	Peso	Peso Culmulativo	Log (Verossimilhança)
(a) Frutificação						
MPE1c*NumP1	5	-50.72	0.00	0.98	0.98	31.61
CA1*NumP1c	5	-41.60	9.11	0.01	0.99	27.05
CA1c*NumP1	5	-41.55	9.17	0.01	1.00	27.02
(b) Compostos voláteis						
MPE1c*NumP1	5	399.48	0.00	0.66	0.66	-187.24
CA1*NumP1c	5	402.14	2.66	0.17	0.83	-188.57
MPE1*NumP1c	5	403.69	4.21	0.08	0.91	-189.34

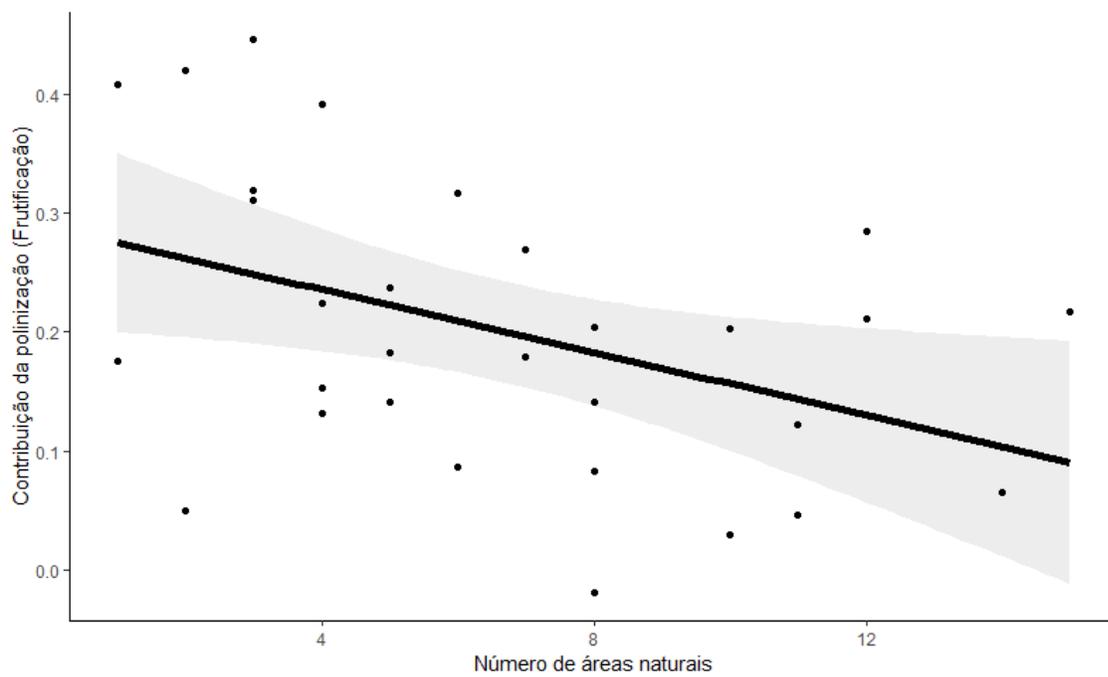


Figura 5. Relação entre a contribuição da polinização (PA-EPB) na frutificação com o número de fragmentos naturais. A linha preta mostra o modelo ajustado.

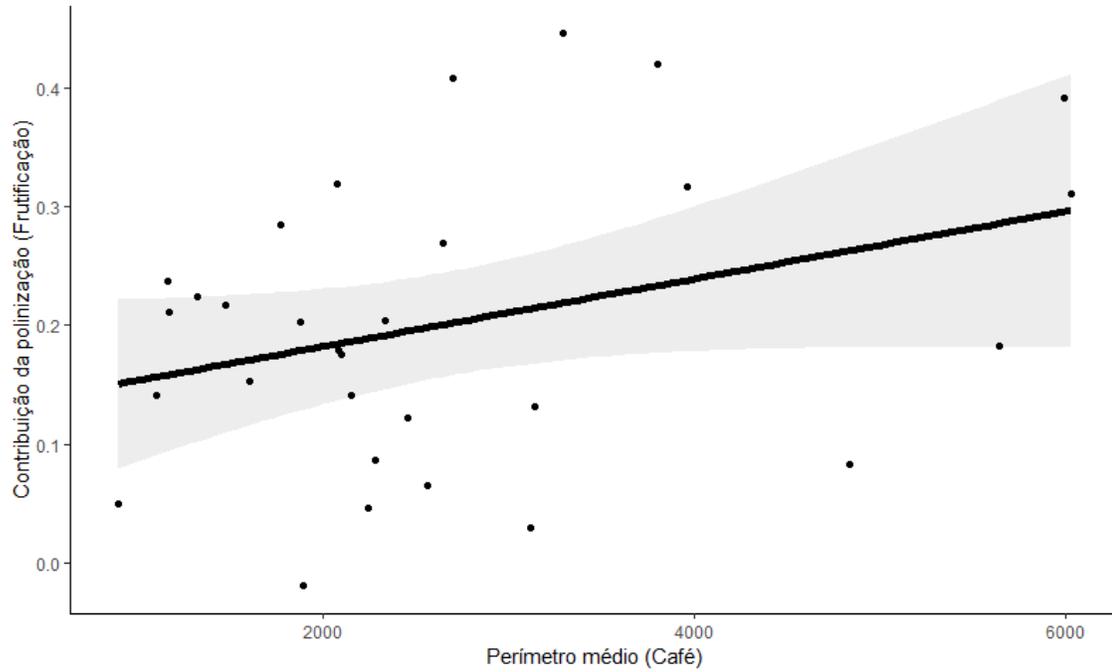


Figura 6. Relação entre a contribuição da polinização (PA-EPB) na frutificação com o perímetro médio das áreas de café. A linha preta mostra o modelo ajustado.

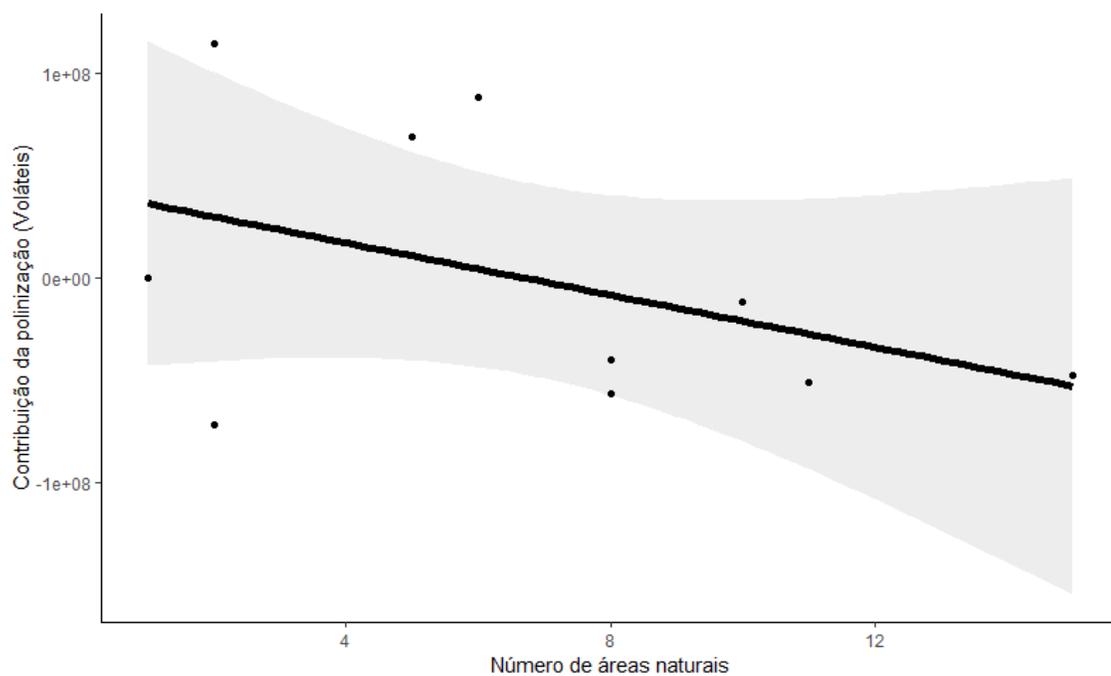


Figura 7. Relação entre a contribuição da polinização (PA-EPB) na composição de voláteis com o número de fragmentos naturais. A linha preta mostra o modelo ajustado.

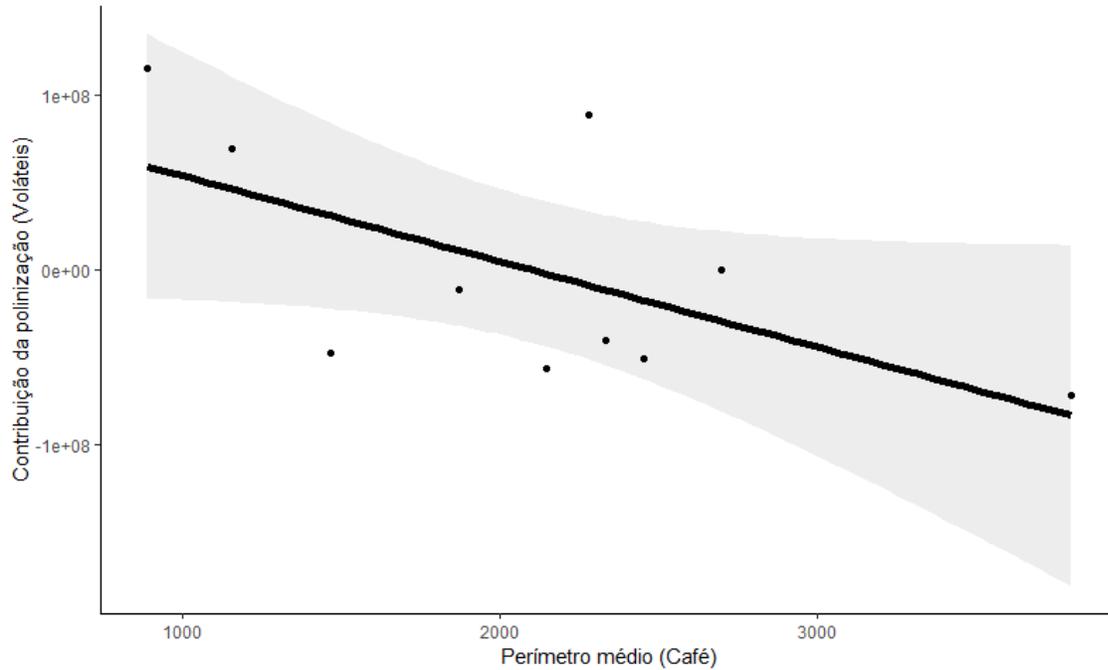


Figura 8. Relação entre a contribuição da polinização (PA-EPB) na Composição de voláteis com o perímetro médio das áreas de café. A linha preta mostra o modelo ajustado.

5. DISCUSSÃO

Neste trabalho foi verificada a possível influência dos serviços de polinização em características quantitativas e qualitativas na produção de café. Para isso, utilizamos experimentos de exclusão de polinizadores em ramos de café em plantio convencional de monocultura irrigada, caracterizada pela alta sincronização regional de floração através da aplicação de stress hídrico (Vinecky *et al.* 2016). Com o desenho experimental pareado entre ramos do mesmo indivíduo em posição e orientação semelhante, os efeitos das diferenças de produtividade entre variedades de café, manejos e variações microclimáticas foram controlados (Ricketts *et al.* 2008). Os resultados sugerem que a polinização biótica tem efeito positivo na produção de café. Esses efeitos podem ser percebidos tanto na produtividade final, quanto na qualidade do produto.

5.1 Efeito da polinização na frutificação

Nossos resultados indicaram que a polinização biótica contribuiu para o aumento da frutificação do café. Neste sentido, nós encontramos que os ramos EPB tiveram percentual menor de flores que se desenvolveram em frutos em relação aos ramos PA (Figura 2). Este resultado corrobora os resultados encontrados para efeitos de polinização biótica em café (Roubik 2002a,b, Klein *et al.* 2003a,b, Ricketts *et al.* 2004). Um argumento bastante difundido entre produtores e agrônomos é que, por ser autocompatível, o café não depende de polinização biótica (DaMatta *et al.* 2007). Porém, tanto nossos resultados, quanto de trabalhos previamente publicados apontam para incremento de produção por polinização por agentes biológicos neste cultivo autocompatível. Na verdade, adaptações para gerar independência de polinizadores, como a quebra de autoincompatibilidade, não parecem ser suficientes para reduzir a limitação de pólen (Vamosi *et al.* 2006).

Os vetores bióticos de polinização não apenas diminuem a limitação polínica, como também aumentam a deposição de pólen espécie-específico, aumentando o sucesso reprodutivo (Barrett *et al.* 1996). Para o café, o número de tubos polínicos e o sucesso reprodutivo de flores que ficaram expostas à polinização por agentes biológicos é quatro vezes maior do que aquele que ficaram isolados (Krishnan *et al.* 2012). As flores de café apresentam ovários biloculares com apenas um óvulo por loci. Contudo, a competição entre tubos polínicos pode ter efeitos no sucesso reprodutivo, já que tubos mais vigorosos tendem a crescer mais rápido (Snow & Spira 1991). Por isso, um número maior de grão de pólen depositados na superfície estigmática podem contribuir para a formação de frutos mais vigorosos (Ascher & Peloquin 1968, Oukabli *et al.* 2000).

5.2 Efeito da polinização no peso médio dos frutos

Quando comparamos o peso entre os frutos formados dos ramos de PA e EPB, do mesmo indivíduo, não encontramos diferença significativa. Nosso resultado foi diferente do encontrado

na literatura (Roubik 2002a, Ricketts *et al.* 2004, Olschewski *et al.* 2006, Classen *et al.* 2014). Esta mesma relação pode não ter sido encontrada porque comparamos o peso dos frutos e não apenas das sementes formadas. A polinização pode ter gerado alocação diferencial em partes específicas do fruto, já que existe trade-off na porção de recursos alocados na formação das diferentes estruturas que compõem o fruto do café (Alves *et al.* 2016), tornando a variação do peso médio dos frutos imperceptível. Outra razão a ser considerada é o melhoramento genético. O atributo de qualidade que está sob maior pressão de melhoramento é o tamanho da semente (Leroy *et al.* 2006). Ainda, as diferenças entre os tratamentos podem não estar perceptíveis na variação de peso, porém na alocação diferencial em outros atributos que não apenas o tamanho, como a atratividade, recursos oferecidos ou composição (Klatt *et al.* 2013).

5.3 Efeito da polinização na composição orgânica de voláteis

De forma geral, os ramos que ficaram expostos à polinização biótica tiveram maior concentração de compostos orgânicos voláteis. O café possui mais de 900 voláteis diferentes, com interações sinérgicas (Toledo *et al.* 2016). Nos nossos experimentos, encontramos um total de 73 compostos de diferentes grupos químicos funcionais. As classes de compostos mais abundantes em número de substâncias e também em concentração são: furanos, pirazinas, cetonas, pirroles, fenóis e hidrocarbonetos (Flament 2002). Porém, nem todos os compostos possuem efeitos aromáticos perceptíveis para o olfato humano. Dentre estes grupos, aqueles que possuem maior potencial odorífero em ordem decrescente são: pirazinas, furanos, aldeídos, cetonas, fenóis e compostos sulfurosos (Czerny *et al.* 1999, Toledo *et al.* 2016). Muitos desses compostos possuem aromas e sabores característicos, que determinam o perfil aromático da bebida (Montavon *et al.* 2003, Franca *et al.* 2005, Tolessa *et al.* 2016).

O café é classificado de acordo com um sistema de gradação baseado em características físicas e sensoriais, sendo os principais componentes a avaliação de sabor e aroma (Banks *et al.* 1999; Franca *et al.* 2005, Vasconcelos 2007). A análise sensorial pode ser realizada tanto para a

determinação do perfil de aromas e sabores do café, quanto para identificação de origem, ou mesmo para a determinação de contaminação e defeitos caracterizados por compostos, incluindo voláteis (Toledo *et al.* 2016). A complexidade dos aromas está ligada à composição e concentração dos voláteis. “The Specialty Coffee Association of America” (SCAA), é responsável pelo padrão de classificação mais utilizado no mundo. Neste, cafés com maior complexidade aromática recebem pontuação maior, sendo então classificados em grupos superiores (“specialty coffee”), permitindo aos agricultores produzirem cafés com maior valor agregado e com isso, aumentar seu retorno financeiro (Poltronieri & Rossi 2016).

O tratamento de polinização aumentou a composição geral dos voláteis, sendo álcoois, pirazinas, piridinas e pirroles mais afetados. Dentro dos compostos em que encontramos incrementos pela polinização, a menor concentração de pirazina faz com que o aroma geral seja menos intenso, atuando como um catalizador dos odores (Czerny *et al.* 1999). As piridinas são caracterizadas por notas variando de amargo, tostado, caramelo e manteiga (Illy & Viani 2005). Já os pirroles possuem odores que lembram cogumelos, rosas, azeites e cereais (Illy & Viani 2005, Poltronieri & Rossi 2016). Os fenóis conferem notas defumadas e de cravo da Índia à bebida. As cetonas, responsáveis em grande parte pelos aromas florais, foram marginalmente mais abundantes nos ramos expostos à polinização (Gonzalez-Rios *et al.* 2007). O aumento desses compostos aromáticos em geral, proporciona mais variações aromáticas de notas e sabores, tendo potencial de agregar valor à produção. É importante lembrar que ainda que estas notas aromáticas sejam generalizadas para a caracterização dos grupos funcionais, existem compostos com aromas específicos dentro destes grupos funcionais. Os efeitos sinérgicos fazem com que a complexidade de aromas seja ainda maior (Toledo *et al.* 2016).

Ainda, a rota de produção destes diferentes compostos está relacionada com a composição química de seus precursores nas sementes, como: açúcares, óleos e proteínas (Toledo *et al.* 2016). Alguns destes precursores no café verde possuem propriedades medicinais, como é o caso dos ácidos clorogênico e cafeico, com propriedades antioxidantes, sendo utilizado no tratamento de lesões intestinais provenientes de isquemia (Sato *et al.* 2011). Apesar de não

termos realizado as análises nos grãos verdes, o potencial do aumento de produção destes compostos com propriedades medicinais também pode ser previsto.

5.4 Influência da Paisagem

Encontramos que para os parâmetros da produção de café onde a polinização parece ter efeito positivo, frutificação e composição de voláteis, a escala que melhor explicou a variação da contribuição da polinização foi a escala intermediária de raio de 1km. A região do Cerrado Mineiro possui área de cultivo de café de grande escala, com média de 45 hectares (Federação dos Cafeicultores do Cerrado, 2015) e por conta disso, acreditamos que a menor escala de 500m do centroide não refletiu a heterogeneidade espacial que atua no cultivo, sendo a razão de cobertura de café muito alta em relação à área total nesta escala. Já a escala de 2km pode ter adicionado fatores de confusão, já que a maior parte dos visitantes florais não possui raio de forrageio tão grande (Greenleaf *et al.* 2007). Então boa parte dos valores destas métricas não possuiu influência na contribuição da polinização das áreas focais. Isso foi verdade para as duas medidas de contribuição analisada.

Verificou-se a influência das métricas de paisagem na escala de 1km na contribuição da polinização (CP), determinada pela diferença entre os valores de percentual de formação de frutos PA e EPB. As métricas selecionadas foram métricas que caracterizavam a paisagem em relação à cobertura, heterogeneidade, fragmentação e formato.

Ao contrário do esperado, a porcentagem de cobertura de área natural não estava correlacionada a variações de CP. Este padrão já foi encontrado em outros trabalhos (Carvalho *et al.* 2010, Saturni *et al.* 2015). Uma hipótese para este fenômeno talvez seja que o aumento de áreas naturais também tem efeitos em outros processos que ocorrem internamente às áreas naturais, como resiliência e complexidade (Blüthgen & Klein 2011). Da mesma forma, o perímetro total tanto de café, quanto de áreas naturais também não leva em consideração os processos que atuam de forma diferencial dependendo da complexidade de formato das áreas, como o

efeito de borda e 'spillover'. O índice de formato médios das áreas também não estava correlacionado. Apesar de corrigir os valores pelo tamanho dos fragmentos, a métrica que utiliza o tamanho médio dos fragmentos de cada classe dilui a contribuição individual dos fragmentos, que vai além de um efeito linear com o tamanho, variando devido à diferentes complexidades de formato (Tischendorf 2001). A heterogeneidade espacial também não leva em consideração os efeitos de cada tipo de componentes da matriz, que podem ter efeitos positivos, neutros ou negativos na contribuição da polinização.

O número de áreas naturais foi importante para a contribuição de polinização biótica no número de frutos formados (Figura 5). Esta é uma medida de fragmentação. Para ser considerado um fragmento diferente, essas áreas não podem ter nenhum tipo de conectividade, o que significa a existência de matriz entre os fragmentos. Isso é uma medida indireta de diminuição de área total de cobertura, porém com maior destaque de processos encontrados em ambientes com pouca conectividade e mesmo em ambientes com alta riqueza de espécies de visitantes florais voadores, a fragmentação pode ter efeito negativo no serviço de polinização (Klein *et al.* 2003a; Carvalheiro *et al.* 2010). O número de fragmentos está negativamente correlacionado tanto com a cobertura total, quanto com a média do tamanho dos fragmentos. Desta forma, apesar de não poderem ser analisados de forma conjunta, o número de fragmentos pode ser considerado uma medida indireta destas, com a adição dos efeitos de fragmentação. Como já falado antes, a magnitude dos processos que ocorrem em pequenos e grandes fragmentos é diferente. A importância funcional destes também é diferente para a diversidade de visitantes florais (Blüthgen & Klein 2011). Espécies generalistas podem não sofrer tanta influência da falta de heterogeneidade ambiental de fragmentos de área natural menores, porém espécies com maiores exigências ambientais para alimentação e nidificação podem ser excluídas destas áreas (Wcislo *et al.* 1993, Brosi *et al.* 2007). A falta de permeabilidade na matriz pela menor conectância entre os fragmentos também pode impedir a dispersão destas espécies, o que pode levar à extinção local de espécies especialistas (Townsend & Levey 2005, Lewis *et al.* 2017). É interessante pensar também no efeito à longo prazo das redes de interações inseto-planta, já que a subsistência de plantas depende da capacidade dos polinizadores de se moverem entre os

fragmentos e, caso isso não ocorra, a perda de diversidade de plantas pode gerar um efeito na comunidade de visitantes florais (Amarasekare 2004). Muitos estudos mostram que a riqueza muitas vezes é mais influente na eficiência de polinização do que a abundância de visitas, devido à complementariedade, contribuição funcional diferentes (Klein *et al.* 2003a; Hoehn *et al.* 2008). Alguns estudos mostram também que a interação entre espécies é importante para promoção de polinização cruzada (Brittain *et al.* 2013).

A média do perímetro das áreas de café também foi importante na determinação da contribuição da polinização biótica na formação de frutos (Figura 6). Neste caso, como as plantações de café seguem padrão de plantação de talhões de tamanho e espaçamento muito similares, a média das áreas reflete mais a realidade do que as médias relacionadas às áreas naturais. Com a floração massiva sincrônica localmente, a densidade de oferta de recursos é muito alta (Holzschuh *et al.* 2013). Como esta floração massiva ocorre isolada temporalmente, a contribuição para a subsistência das espécies de polinizadores ao longo do tempo é baixa, fazendo como que estes dependam de recursos alternativos fora do período de floração do café para manutenção de populações viáveis (Pleasants 1980). Como o aumento da densidade destas populações em relação ao aumento de recursos é atrasada no tempo e a floração é bastante sincrônica dos cultivos de café na região, este possível aumento de polinizadores pela grande disponibilidade de recursos da floração massiva de café não é refletida no aumento de polinização do mesmo. Desta forma, é esperado um nível de saturação da possibilidade de contribuição da polinização biótica nestas áreas (Veddeler *et al.* 2006). Mesmo em locais com alta diversidade, a falta de recursos alternativos em uma grande área de matriz que não oferece recursos ao longo do tempo pode prejudicar a polinização do cultivo (Carvalho *et al.* 2011). O manejo do café em sistema de cultivo tradicional não permite o crescimento de plantas ruderais no meio do plantio, o que torna as áreas de café um verdadeiro deserto de recursos grande parte do ano. Logo, as regiões da borda são as regiões do cultivo onde potencialmente pode se receber maior contribuição da polinização, já que estas estão espacialmente mais próximas das áreas doadoras de visitantes florais (Kremen *et al.* 2002, Carvalho *et al.* 2010). Mesmo em áreas mais distantes de fragmentos de áreas naturais, o entorno costuma ser mais rico em recursos florais

do que o interior da área de cultivo. Desta forma, o aumento do perímetro pode ter influência positiva na polinização.

De forma similar à produtividade, o melhor modelo para explicar a variação da composição de voláteis foi aquele que tinha como variáveis o Número de áreas naturais (Figura 7) e a Média dos perímetros das áreas de café (Figura 8). Encontramos uma correlação negativa com o número de fragmentos naturais, em concordância com o efeito causado no primeiro fator. Acreditamos que a contribuição da polinização biótica para o aumento da frutificação também leva ao aumento do aporte de recursos para estes frutos, fazendo com que estes também possuam composição de voláteis maior do que os provenientes de autopolinização. Contudo, encontramos efeito da média de perímetro de fragmentos contrário ao esperado. Como estes fatores não estão correlacionados, eles podem explicar diferentes efeitos nesta variação. Como a coleta de voláteis foi realizada em frutos maduros e o tempo de desenvolvimento e maturação dos frutos é de quase um ano, fatores de manejo de cultivo podem ter gerado efeitos na composição de voláteis neste período (Clifford 1985, Bos *et al.* 2007). Da mesma forma que a borda é mais susceptível às interações bióticas com visitantes florais, está também pode ser mais afetada por interações negativas e sofrer maiores pressões de predação, parasitas e doenças. Também pode haver ações ambientais envolvidas, já que estas regiões também estão mais susceptíveis às ações de ventos, chuvas e insolação.

Por fim, nós realizamos a análises dos efeitos na escala da paisagem, de forma que os efeitos analisados representam a média dos efeitos da polinização biótica em cada área. Contudo, caso os efeitos da polinização biótica fossem analisados ao nível dos indivíduos, os resultados obtidos poderiam ser diferentes, já que representariam a interação direta entre a produtividade e as interações do indivíduo com os visitantes florais.

6. CONCLUSÃO

Além de parâmetros quantitativos de produtividade, a polinização biótica parece afetar parâmetros qualitativos da produção de café. Este incremento na produção de voláteis pode estar ligado a características que incrementam os parâmetros de classificação do café, permitindo que o mesmo possa ser colocado em classes superiores, agregando valor financeiro. Isso acontece devido ao aumento de concentração de compostos voláteis orgânicos de impacto, responsáveis pelo componente aromático do café. Estes compostos estão dentro de grupos como as pirazinas, cetonas, furanos, piridinas e pirroles; grupos que sofreram alteração de concentração devido à polinização biótica. Ainda, os incrementos verificados na quantidade e qualidade dos frutos resultados dos ramos sujeitos a polinização aberta, parecem estar ligados a estrutura a paisagem. Assim, medidas como criação de corredores entre fragmentos e mudanças no design dos cultivos de maneira à criar áreas de cultivo com uma maior relação de perímetro podem ser algumas medidas tomadas para a maximização da efetividade da polinização.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aizen, M.A., Garibaldi, L.A., Cunningham, S.A., Klein, A.M., 2009. How much does agriculture depend on pollinators? Lessons from long-term trends in crop production. *Ann. Bot.* 103, 1579–1588. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp076>
- Alves, L.C., Magalhães, D.M. De, Labate, M.T.V., Guidetti-Gonzalez, S., Labate, C.A., Domingues, D.S., Sera, T., Vieira, L.G.E., Pereira, L.F.P., 2016. Differentially Accumulated Proteins in *Coffea arabica* Seeds during Perisperm Tissue Development and Their Relationship to Coffee Grain Size. *J. Agric. Food Chem.* 64, 1635–1647. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04376>
- Amarasekare, P., 2004. Spatial dynamics of mutualistic interactions. *J. Anim. Ecol.* 73, 128–142. <https://doi.org/10.1046/j.0021-8790.2004.00788.x>

- Ascher, P.D., Peloquin, S.J., 1968. Pollen tube growth and incompatibility following intra- and inter-specific pollinations in *lilium longiflorum*. *Am. J. Bot.* 55, 1230–1234. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1968.tb07489.x>
- Asquini, E., Gerdol, M., Gasperini, D., Igit, B., Graziosi, G., Pallavicini, A., 2011. S-RNase-like Sequences in Styles of *Coffea* (Rubiaceae). Evidence for S-RNase Based Gametophytic Self-Incompatibility? *Trop. Plant Biol.* 4, 237–249. <https://doi.org/10.1007/s12042-011-9085-2>
- Balmford, A., Green, R., Phalan, B., 2012. What conservationists need to know about farming. *Proceedings. Biol. Sci.* 279, 2714–24. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.0515>
- Banks, M., McFadden, C., Atkinson, C., 1999. *The world encyclopedia of coffee*. Lorenz Books.
- Barrett, S.C.H., Harder, L.D., Worley, A.C., 1996. The comparative biology of pollination and mating in flowering plants. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. B Biol. Sci.* 351, 1271–1280. <https://doi.org/10.1098/rstb.1996.0110>
- Blüthgen, N., Klein, A.M., 2011. Functional complementarity and specialisation: The role of biodiversity in plant-pollinator interactions. *Basic Appl. Ecol.* 12, 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2010.11.001>
- Borgognone, M.G., Bussi, J., Hough, G., 2001. Principal component analysis in sensory analysis: covariance or correlation matrix? *Food Qual. Prefer.* 12, 323–326. [https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(01\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(01)00017-9)
- Bos, M.M., Veddeler, D., Bogdanski, A.K., Klein, A.-M., Tschardtke, T., Steffan-Dewenter, I., Tylianakis, J.M., 2007. Caveats to quantifying ecosystem services: fruit abortion blurs benefits from crop pollination. *Ecol. Appl.* 17, 1841–9.

- BPBES. Wolowski M., Agostini K., Rech A.R., Varassin I.G., Maués M., Freitas L., Carneiro L.T., Bueno R.O., Consolaro H., Carvalheiro L., Saraiva A.M., Silva C.I., 2019. Relatório Temático sobre Polinização, Polinizadores e Produção de Alimentos no Brasil. 93 págs.
- Breeze, T.D., Bailey, A.P., Balcombe, K.G., Potts, S.G., 2011. Pollination services in the UK: How important are honeybees? *Agric. Ecosyst. Environ.* 142, 137–143. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2011.03.020>
- Brittain, C., Kremen, C., Klein, A.M., 2013. Biodiversity buffers pollination from changes in environmental conditions. *Glob. Chang. Biol.* 19, 540–547. <https://doi.org/10.1111/gcb.12043>
- Brosi, B.J., Daily, G.C., Shih, T.M., Oviedo, F., Durán, G., 2007. The effects of forest fragmentation on bee communities in tropical countryside. *J. Appl. Ecol.* 45, 773–783. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01412.x>
- Anderson, D.R., Burnham, K.P., 2002. Avoiding Pitfalls When Using Information-Theoretic Methods. *J. Wildl. Manage.* 66, 912. <https://doi.org/10.2307/3803155>
- Cane, J.H., Minckley, R.L., Kervin, L.J., Roulston, T.H., Williams, N.M., 2006. Complex Responses Within A Desert Bee Guild (Hymenoptera: Apiformes) To Urban Habitat Fragmentation. *Ecol. Appl.* 16, 632–644. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[0632:CRWADB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[0632:CRWADB]2.0.CO;2)
- Cardoso Da Silva, J.M., Bates, J.M., 2002. Biogeographic Patterns and Conservation in the South American Cerrado: A Tropical Savanna HotspotThe Cerrado, which includes both forest and savanna habitats, is the second largest South American biome, and among the most threatened on the continent. *Bioscience* 52, 225–234. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0225:bpacit\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0225:bpacit]2.0.co;2)

- Carvalho, L.G., Seymour, C.L., Veldtman, R., Nicolson, S.W., 2010. Pollination services decline with distance from natural habitat even in biodiversity-rich areas. *J. Appl. Ecol.* 47, 810–820. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01829.x>
- Carvalho, L.G., Veldtman, R., Shenkute, A.G., Tesfay, G.B., Pirk, C.W.W., Donaldson, J.S., Nicolson, S.W., 2011. Natural and within-farmland biodiversity enhances crop productivity. *Ecol. Lett.* 14, 251–259. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01579.x>
- Classen, A., Peters, M.K., Ferger, S.W., Helbig-Bonitz, M., Schmack, J.M., Maassen, G., Schleuning, M., Kalko, E.K. V., Bohning-Gaese, K., Steffan-Dewenter, I., 2014. Complementary ecosystem services provided by pest predators and pollinators increase quantity and quality of coffee yields. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 281, 20133148–20133148. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.3148>
- Clifford, M.N., 1985. Chemical and Physical Aspects of Green Coffee and Coffee Products, in: *Coffee*. Springer US, Boston, MA, pp. 305–374. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1_13
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), 2016. Acompanhamento da safra brasileira - Café 76.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Corbet, S.A., Williams, I.H., Osborne, J.L., 1991. Bees and the Pollination of Crops and Wild Flowers in the European Community. *Bee World* 72, 47–59. <https://doi.org/10.1080/0005772X.1991.11099079>

- Czerny, M., Mayer, F., Grosch, W., 1999. Sensory study on the character impact odorants of roasted Arabica coffee. *J. Agric. Food Chem.* 47, 695–699. <https://doi.org/10.1021/jf980759i>
- DaMatta, F.M., Ronchi, C.P., Maestri, M., Barros, R.S., 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian J. Plant Physiol.* 19, 485–510. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>
- De Marco, P., Coelho, F.M., 2004. Services performed by the ecosystem: Forest remnants influence agricultural cultures' pollination and production. *Biodivers. Conserv.* 13, 1245–1255. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000019402.51193.e8>
- Eilers, E.J., Kremen, C., Smith Greenleaf, S., Garber, A.K., Klein, A.-M., 2011. Contribution of Pollinator-Mediated Crops to Nutrients in the Human Food Supply. *PLoS One* 6, e21363. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021363>
- FAO, 2015. Statistical Pocket Book of the Food And Agricultural Organization for the United Nations.
- Federação dos Cafeicultores do Cerrado, 2015. Plano de Desenvolvimento, Sustentabilidade e Promoção da Região do Cerrado Mineiro 2015/2020.
- Flament, I., Bessière-Thomas, Y., 2002. Coffee flavor chemistry. Wiley.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K., 2005. Global Consequences of Land Use. *Science (80-.)*. 309, 570–574. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1111772>

- Franca, A.S., Oliveira, L.S., Mendonça, J.C.F., Silva, X.A., 2005. Physical and chemical attributes of defective crude and roasted coffee beans. *Food Chem.* 90, 89–94. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2004.03.028>
- Gallai, N., Salles, J.-M., Settele, J., Vaissière, B.E., 2009. Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecol. Econ.* 68, 810–821. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.014>
- Gonzalez-Rios, O., Suarez-Quiroz, M.L., Boulanger, R., Barel, M., Guyot, B., Guiraud, J.P., Schorr-Galindo, S., 2007. Impact of “ecological” post-harvest processing on coffee aroma: II. Roasted coffee. *J. Food Compos. Anal.* 20, 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.12.004>
- Greenleaf, S.S., Kremen, C., Matson, P.A., 2006. Wild bees enhance honey bees’ pollination of hybrid sunflower.
- Greenleaf, S.S., Williams, N.M., Winfree, R., Kremen, C., 2007. Bee foraging ranges and their relationship to body size. *Oecologia* 153, 589–596. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0752-9>
- Hassan, R.M., Scholes, R.J., Ash, N., Millennium Ecosystem Assessment (Program). Condition and Trends Working Group., 2005. *Ecosystems and human well-being : current state and trends : findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*, Millennium Ecosystem Assessment Series. Island Press.
- Hines, H.M., Hendrix, S.D., 2005. Bumble Bee (Hymenoptera: Apidae) Diversity and Abundance in Tallgrass Prairie Patches: Effects of Local and Landscape Floral Resources. *Environ. Entomol.* 34, 1477–1484. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-34.6.1477>

- Hoehn, P., Tschardtke, T., Tylianakis, J.M., Steffan-Dewenter, I., 2008. Functional group diversity of bee pollinators increases crop yield. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 275, 2283–2291. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.0405>
- Holzschuh, A., Dormann, C.F., Tschardtke, T., Steffan-Dewenter, I., 2013. Mass-flowering crops enhance wild bee abundance. *Oecologia* 172, 477–484. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2515-5>
- Ibisch, P.L., Vega E., A., Herrmann, T.M., 2010. Interdependence of biodiversity and development under global change. *CBD Tech. Ser.*
- Illy, A., Viani, R., 2005. *Espresso coffee : the science of quality*. Elsevier Academic.
- IPBES Potts S.G., Imperatriz-Fonseca V.L., Ngo H.T., Biesmeijer J.C., Breeze T.D., Dicks L.V., Garibaldi L.A., Hill R., Settele J., Vanbergen A.J., Aizen M.A., Cunningham S.A., Eardley C., Freitas B.M., Gallai N., Kevan P.G., Koovács-Hostyánszki A., Kwapong P.K., Li J., Li X., Martins D.J., Nates-Parra G., Pettis J.S., Rader R. and Viana B.F. 2016. The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn. 33p.
- Kareiva, P., Marvier, M., 2012. What Is Conservation Science? *Artic.* 962 *Biosci.* 62. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.11.5>
- Kent, M., 2007. Biogeography and landscape ecology. *Prog. Phys. Geogr.* 31, 345–355. <https://doi.org/10.1177/0309133307079059>
- Klatt, B.K., Holzschuh, A., Westphal, C., Clough, Y., Smit, I., Pawelzik, E., Tschardtke, T., 2013. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 281, 20132440–20132440. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2440>

- Klein, A.-M., Steffan-Dewenter, I., Tschardtke, T., 2003a. Fruit set of highland coffee increases with the diversity of pollinating bees. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2306>
- Klein, A.M., Steffan-Dewenter, I., Tschardtke, T., 2003b. Bee pollination and fruit set of *Coffea arabica* and *C. canephora* (Rubiaceae). *Am. J. Bot.* 90, 153–157. <https://doi.org/10.3732/ajb.90.1.153>
- Klein, A.-M., Vaissière, B.E., Cane, J.H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Tschardtke, T., 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proc. R. Soc. London B Biol. Sci.* 274.
- Krauss, J., Bommarco, R., Gardiolo, M., Heikkinen, R.K., Helm, A., Kuussaari, M., Lindborg, R., Öckinger, E., Pärtel, M., Pino, J., Pöyry, J., Raatikainen, K.M., Sang, A., Stefanescu, C., Teder, T., Zobel, M., Steffan-Dewenter, I., 2010. Habitat fragmentation causes immediate and time-delayed biodiversity loss at different trophic levels. *Ecol. Lett.* 13, 597–605. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01457.x>
- Kremen, C., 2005. Managing ecosystem services: What do we need to know about their ecology? *Ecol. Lett.* 8, 468–479. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00751.x>
- Krishnan, S., Kushalappa, C.G., Shaanker, R.U., Ghazoul, J., 2012. Status of pollinators and their efficiency in coffee fruit set in a fragmented landscape mosaic in South India. *Basic Appl. Ecol.* 13, 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2012.03.007>
- Larsen, T.H., Williams, N.M., Kremen, C., 2005. Extinction order and altered community structure rapidly disrupt ecosystem functioning. *Ecol. Lett.* 8, 538–547. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00749.x>
- Leroy, T., Ribeyre, F., Bertrand, B., Charmetant, P., Dufour, M., Montagnon, C., Marraccini, P., Pot, D., 2006. Genetics of coffee quality. *Brazilian J. Plant Physiol.* 18, 229–242. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100016>

- Lewis, R.J., de Bello, F., Bennett, J.A., Fibich, P., Finerty, G.E., Götzenberger, L., Hiiesalu, I., Kasari, L., Lepš, J., Májeková, M., Mudrák, O., Riibak, K., Ronk, A., Rychtecká, T., Vitová, A., Pärtel, M., 2017. Applying the dark diversity concept to nature conservation. *Conserv. Biol.* 31, 40–47. <https://doi.org/10.1111/cobi.12723>
- Loureiro, M.L., Lotade, J., 2005. Do fair trade and eco-labels in coffee wake up the consumer conscience? *Ecol. Econ.* 53, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.11.002>
- Maes, J., Egoh, B., Willemen, L., Liqueste, C., Vihervaara, P., Schägner, J.P., Grizzetti, B., Drakou, E.G., Notte, A. La, Zulian, G., Bouraoui, F., Luisa Paracchini, M., Braat, L., Bidoglio, G., 2012. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosyst. Serv.* 1, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.06.004>
- McManus, B., n.d. Nonlinear Pricing in an Oligopoly Market: The Case of Specialty Coffee. *RAND J. Econ.* 38, 512–532. <https://doi.org/10.2307/25046319>
- Metzger, J.P., 2001. O que é ecologia de paisagens? *Biota Neotrop.* 1, 1–9. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032001000100006>
- Montavon, P., Duruz, E., Rumo, G., Pratz, G., 2003. Evolution of Green Coffee Protein Profiles with Maturation and Relationship to Coffee Cup Quality. *J. Agric. Food Chem.* 51, 2328–2334. <https://doi.org/10.1021/jf020831j>
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., Da Fonseca, G.A.B., Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nat.* www.nature.com 403.
- Oliveira, A.C., Junqueira, C.N., Augusto, S.C., 2019. Pesticides affect pollinator abundance and productivity of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *J. Apic. Res.* 58, 2–8. <https://doi.org/10.1080/00218839.2018.1494441>

- Olschewski, R., Tschardtke, T., Benítez, P.C., Schwarze, S., Klein, A.M., 2006. Economic evaluation of pollination services comparing coffee landscapes in Ecuador and Indonesia. *Ecol. Soc.* 11. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30290-2_13
- Oukabli, A., Lansari, A., Wallali, D.L., Abousalim, A., Egea, J., Michaux-Ferriere, N., 2000. Self and cross pollination effects on pollen tube growth and fertilization in self-compatible almond *Prunus dulcis* 'Tuono.' *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 75, 739–744. <https://doi.org/10.1080/14620316.2000.11511316>
- Palmer, M., 2004. Ecology for a Crowded Planet. *Science* (80-.). 304, 1251–1252. <https://doi.org/10.1126/science.1095780>
- Pereira, H.M., Leadley, P.W., Proença, V., Alkemade, R., Scharlemann, J.P.W., Fernandez-Manjarrés, J.F., Araújo, M.B., Balvanera, P., Biggs, R., Cheung, W.W.L., Chini, L., Cooper, H.D., Gilman, E.L., Guénette, S., Hurtt, G.C., Huntington, H.P., Mace, G.M., Oberdorff, T., Revenga, C., Rodrigues, P., Scholes, R.J., Sumaila, U.R., Walpole, M., 2010. Scenarios for global biodiversity in the 21st century. *Science* 330, 1496–501. <https://doi.org/10.1126/science.1196624>
- Pleasants, J.M., 1980. Competition for Bumblebee Pollinators in Rocky Mountain Plant Communities. *Ecology* 61, 1446–1459. <https://doi.org/10.2307/1939053>
- Poltronieri, P., Rossi, F., 2016. Challenges in Specialty Coffee Processing and Quality Assurance. *Challenges* 7, 19. <https://doi.org/10.3390/challe7020019>
- Potts, S.G., Vulliamy, B., Roberts, S., O'Toole, C., Dafni, A., Ne'eman, G., Willmer, P., 2005. Role of nesting resources in organising diverse bee communities in a Mediterranean landscape. *Ecol. Entomol.* 30, 78–85. <https://doi.org/10.1111/j.0307-6946.2005.00662.x>

- Priess, A.J.A., Mimler, M., Klein, A., Schwarze, S., Tschardtke, T., Applications, S.E., Mar, N., 2013. Linking Deforestation Scenarios to Pollination Services and Economic Returns in Coffee Agroforestry Systems LINKING DEFORESTATION SCENARIOS TO POLLINATION SERVICES 17, 407–417.
- Reis, A.J., Arruda, H.V. de, 1956. Frutificação no cafeeiro. *Bragantia* 15, 93–98. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051956000100009>
- Ricketts, T.H., 2004. Tropical Forest Fragments Enhance Pollinator Activity in Nearby Coffee Crops. *Conserv. Biol.* 18, 1262–1271. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00227.x>
- Ricketts, T.H., Regetz, J., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Bogdanski, A., Gemmill-Herren, B., Greenleaf, S.S., Klein, A.M., Mayfield, M.M., Morandin, L.A., Ochieng', A., Viana, B.F., 2008. Landscape effects on crop pollination services: Are there general patterns? *Ecol. Lett.* 11, 499–515. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01157.x>
- Roubik, D.W., 2002a. The value of bees to the coffee harvest. *Nature* 417, 708. <https://doi.org/10.1038/417708a>
- Roubik, D.W., 2002b. Feral african bees augment neotropical coffee yield, - Pollinating Bees - The Conservation Link Between Agriculture and Nature.
- Sano, E.E., Rosa, R., Luís, J., Brito, S., Laerte, E., Ferreira, G., 2008. Notas Científicas Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado 43, 153–156.
- Sato, Y., Itagaki, S., Kurokawa, T., Ogura, J., Kobayashi, M., Hirano, T., Sugawara, M., Iseki, K., 2011. In vitro and in vivo antioxidant properties of chlorogenic acid and caffeic acid. *Int. J. Pharm.* 403, 136–138. <https://doi.org/10.1016/J.IJPHARM.2010.09.035>

- Saturni, F.T., Jaffé, R., Metzger, J.P., 2016. Landscape structure influences bee community and coffee pollination at different spatial scales. *Agric. Ecosyst. Environ.* 235, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.008>
- Snow, A.A., Spira, T.P., 1991. Pollen vigour and the potential for sexual selection in plants. *Nature* 352, 796–797. <https://doi.org/10.1038/352796a0>
- Soule, M.E., 1985. What is Conservation Biology? A new synthetic discipline addresses the dynamics and problems of perturbed species, communities, and ecosystems. *Soulé Source Biosci.* 35, 727–734.
- Steffan-Dewenter, I., Münzenberg, U., Bürger, C., Thies, C., Tscharntke, T., 2002. Scale-dependent effects of landscape context on three pollinator guilds. *Ecology* 83, 1421–1432. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[1421:SDEOLC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[1421:SDEOLC]2.0.CO;2)
- Steffan-Dewenter, I., Steffan-Dewenter, I., a.M. Klein, a.M. Klein, Gaebele, V., Gaebele, V., Alfert, T., Alfert, T., Tscharntke, T., Tscharntke, T., 2006. Bee diversity and plant-pollinator interactions in fragmented landscapes. *Plant–Pollinator Interact. From Spec. to Gen.* 387–410. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ibmb.2014.03.005>
- Tischendorf, L., 2001. Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landsc. Ecol.* 16, 235–254. <https://doi.org/10.1023/A:1011112719782>
- Toci, A.T., de Moura Ribeiro, M.V., de Toledo, P.R.A.B., Boralle, N., Pezza, H.R., Pezza, L., 2018. Fingerprint and authenticity roasted coffees by 1H-NMR: the Brazilian coffee case. *Food Sci. Biotechnol.* 27, 19–26. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0243-7>
- Toledo, P.R.A.B., Pezza, L., Pezza, H.R., Toci, A.T., 2016. Relationship Between the Different Aspects Related to Coffee Quality and Their Volatile Compounds. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 15, 705–719. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12205>

- Tolessa, K., Rademaker, M., De Baets, B., Boeckx, P., 2016. Prediction of specialty coffee cup quality based on near infrared spectra of green coffee beans. *Talanta* 150, 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.12.039>
- Townsend, P.A., Levey, D.J., 2005. An experimental test of whether habitat corridors affect pollen transfer. *Ecology* 86, 466–475. <https://doi.org/10.1890/03-0607>
- Vamosi, J.C., Knight, T.M., Steets, J.A., Mazer, S.J., Burd, M., Ashman, T.-L., 2006. Pollination decays in biodiversity hotspots. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 103, 956–61. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507165103>
- Vasconcelos, A.L.S., Franca, A.S., Glória, M.B.A., Mendonça, J.C.F., 2007. A comparative study of chemical attributes and levels of amines in defective green and roasted coffee beans. *Food Chem.* 101, 26–32. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2005.12.049>
- Veddeler, D., Klein, A.M., Tschardt, T., 2006. Contrasting responses of bee communities to coffee flowering at different spatial scales. *Oikos* 112, 594–601. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2006.14111.x>
- Vilhena, A.M.G.F., Rabelo, L.S., Bastos, E.M.A.F., Augusto, S.C., 2012. Acerola pollinators in the savanna of Central Brazil: temporal variations in oil-collecting bee richness and a mutualistic network. *Apidologie* 43, 51–62. <https://doi.org/10.1007/s13592-011-0081-1>
- Vinecky, F., Davrieux, F., Mera, A.C., Alves, G.S.C., Lavagnini, G., Leroy, T., Bonnot, F., Rocha, O.C., Bartholo, G.F., Guerra, A.F., Rodrigues, G.C., Marraccini, P., Andrade, A.C., 2017. Controlled irrigation and nitrogen, phosphorous and potassium fertilization affect the biochemical composition and quality of Arabica coffee beans. *J. Agric. Sci.* 155, 902–918. <https://doi.org/10.1017/S0021859616000988>

Wcislo, W.T., Wille, A., Orozco, E., 1993. Nesting biology of tropical solitary and social sweat bees, *Lasioglossum* (*Dialictus*) *figueresi* Wcislo and L. (*D.*) *aeneiventris* (Friese) (Hymenoptera: Halictidae). *Insectes Soc.* 40, 21–40. <https://doi.org/10.1007/BF01338830>

Williams, I.H., Corbet, S.A., Osborne, J.L., 1991. Beekeeping, Wild Bees and Pollination in the European Community. *Bee World* 72, 170–180. <https://doi.org/10.1080/0005772X.1991.11099101>

Wright, H.L., Lake, I.R., Dolman, P.M., 2012. Agriculture—a key element for conservation in the developing world. *Conserv. Lett.* 5, 11–19. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2011.00208.x>

8. ANEXOS

Tabela 1S. Relação de áreas onde foram realizados os experimentos. Listados os municípios, proprietário, variedades de café plantado, temperatura média anual e precipitação anual.

Área	Município	Produtor	Variedades plantadas	Temp. Média	Precipitação anual
01	Araguari	Jaime	IBC12	21.2°C	1566mm
02	Araguari	Pedro	Variadas	21.2°C	1566mm
03	Indianópolis	Edson	Mundo novo	21.5°C	1420mm
04	Indianópolis	Marílio	Topázio/ Catuaí / Mundo novo	21.5°C	1420mm
05	Indianópolis	Rubens	Mundo Novo/ Catuaí	21.5°C	1420mm
06	Indianópolis	Francisco e Daniel	Mundo Novo	21.5°C	1420mm
07	Araguari	Evilásio	Catuaí/ Topázio	21.2°C	1566mm
08	Araguari	Donizete	Mundo Novo/ Catuaí/ Ponta Roxa	21.2°C	1566mm
09	Araguari	Luiz Emerson	Variadas	21.2°C	1566mm
10	Araguari	Neusa	Mundo Novo/ Catuaí/ IBC12	21.2°C	1566mm
11	Indianópolis	UFU	Variadas	21.5°C	1420mm
12	Indianópolis	Anídio	Variadas	21.5°C	1420mm
13	Araguari	Anderson	IBC12	21.2°C	1566mm
14	Araguari	João Tereza	IBC12	21.2°C	1566mm
15	Araguari	Walter	Variadas	21.2°C	1566mm
16	Monte Carmelo	Marcelo	Mundo Novo/ Catuaí	21.2°C	1444mm
17	Araguari	Walter	Variadas	21.2°C	1566mm
18	Araguari	Walter	Variadas	21.2°C	1566mm
19	Araguari	Amarildo e Miltinho	Variadas	21.2°C	1566mm
20	Monte Carmelo	Barbieri	Variadas	21.2°C	1444mm

21	Monte Carmelo	Barbieri	Variadas	21.2°C	1444mm
22	Monte Carmelo	Barbieri	Variadas	21.2°C	1444mm
23	Monte Carmelo	Felipe e Luiz Henrique	Variadas	21.2°C	1444mm
24	Monte Carmelo	Fd. Juliana	Variadas	21.2°C	1444mm
25	Monte Carmelo	Napoleão Jr.	Variadas	21.2°C	1444mm
26	Monte Carmelo	Fábio	Variadas	21.2°C	1444mm
27	Monte Carmelo	Eduardo	Variadas	21.2°C	1444mm
28	Indianópolis	Aldo	Mundo Novo/ Catuaí / Ponta Roxa	21.5°C	1420mm
29	Indianópolis	Jesus	Mundo Novo/ Acaiá/ Catuaí/ Topázio	21.5°C	1420mm
30	Monte Carmelo	Gibelrto Ferrarini	Variadas	21.2°C	1444mm

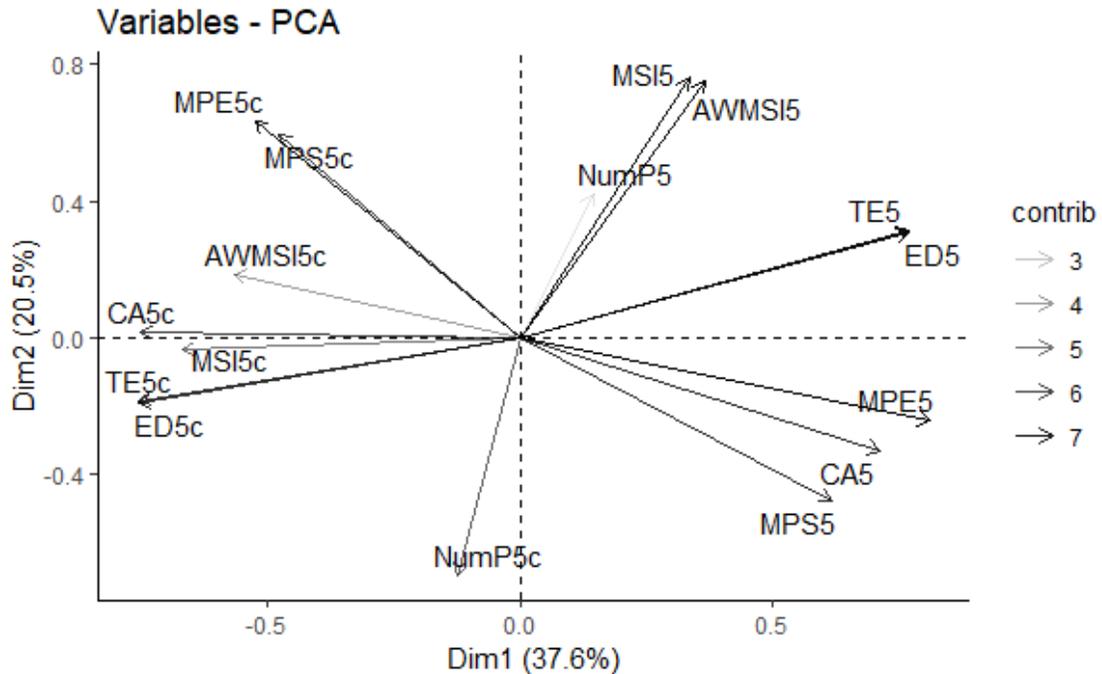


Figura S1. PCA das métricas de paisagem na escala de 500m de raio do centroide. A contribuição de cada métrica está representada pelo gradiente de cores. Cores mais claras tem contribuição menor. Métrica para áreas naturais em 500m (5); métricas para café em 500m (5c). As métricas são: Média do perímetro da classe (MPE); Média da área da classe (MPS); Média ponderada do índice de formato da classe (AWMSI); Número de fragmentos da classe (NumP); Total de perímetro da classe (TE); Densidade de borda da classe (ED); Cobertura total da classe (CA).

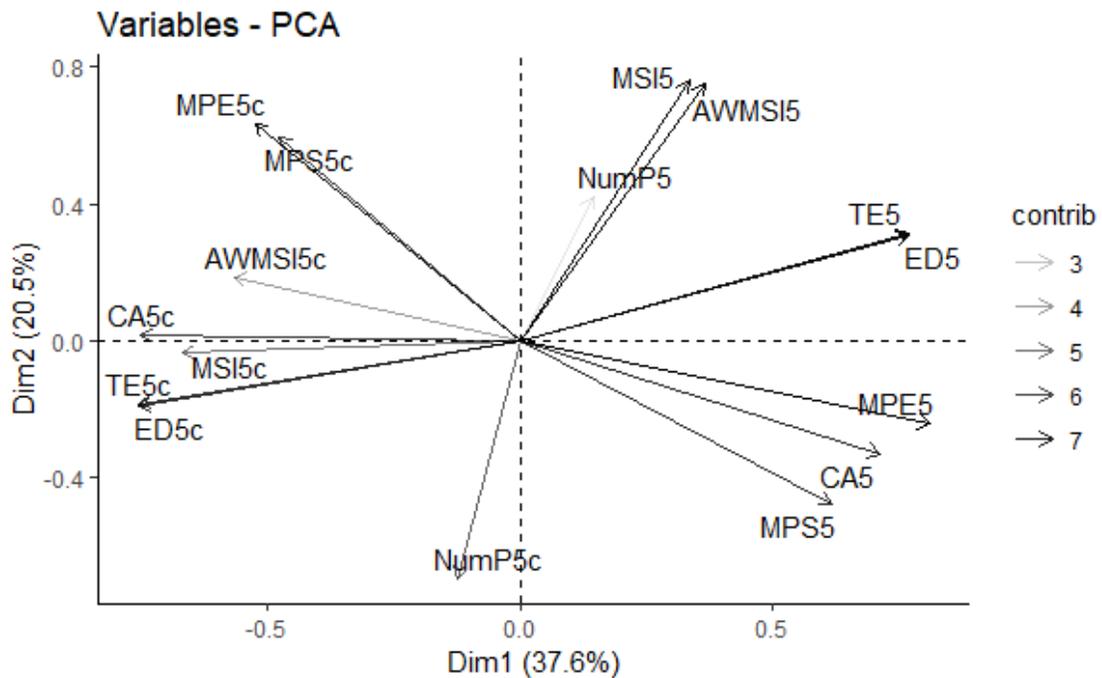


Figura S2. PCA das métricas de paisagem na escala de 1km de raio do centroide. A contribuição de cada métrica está representada pelo gradiente de cores. Cores mais claras tem contribuição menor. Métrica para áreas naturais em 1km (1); métricas para café em 1km (1c). As métricas são: Média do perímetro da classe (MPE); Média da área da classe (MPS); Média ponderada do índice de formato da classe (AWMSI); Número de fragmentos da classe (NumP); Total de perímetro da classe (TE); Densidade de borda da classe (ED); Cobertura total da classe (CA).

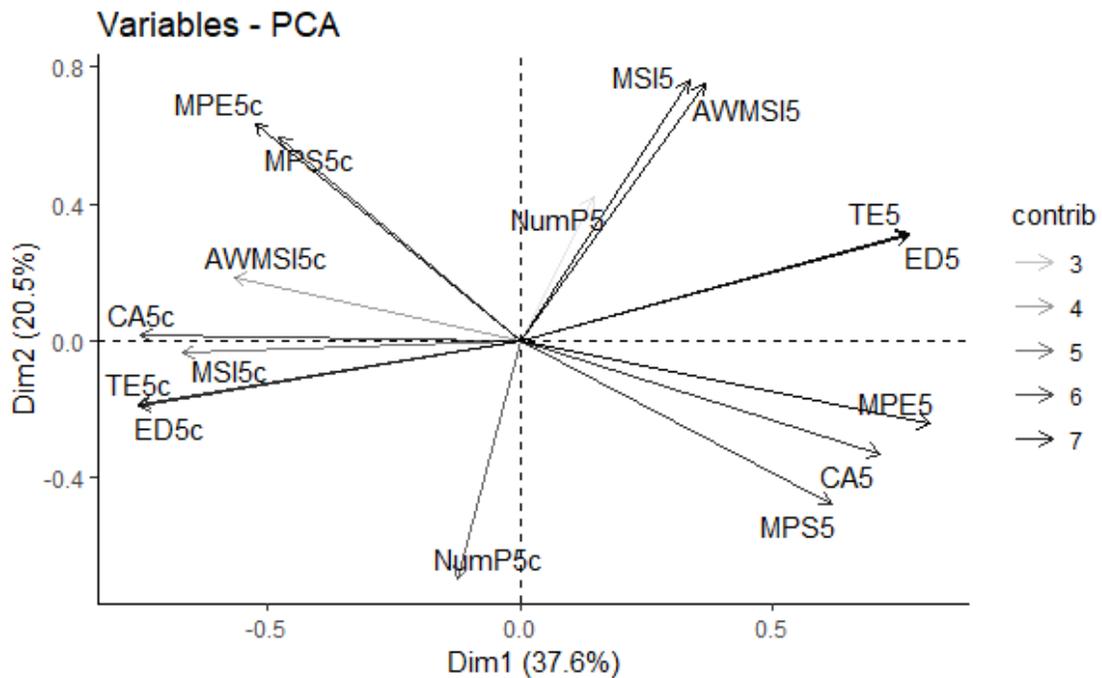


Figura S3. PCA das métricas de paisagem na escala de 2km de raio do centroide. A contribuição de cada métrica está representada pelo gradiente de cores. Cores mais claras tem contribuição menor. As métricas estão divididas em códigos: Métrica para áreas naturais em 1km (2); métricas para café em 1km (2c). As métricas são: Média do perímetro da classe (MPE); Média da área da classe (MPS); Média ponderada do índice de formato da classe (AWMSI); Número de fragmentos da classe (NumP); Total de perímetro da classe (TE); Densidade de borda da classe (ED); Cobertura total da classe (CA).

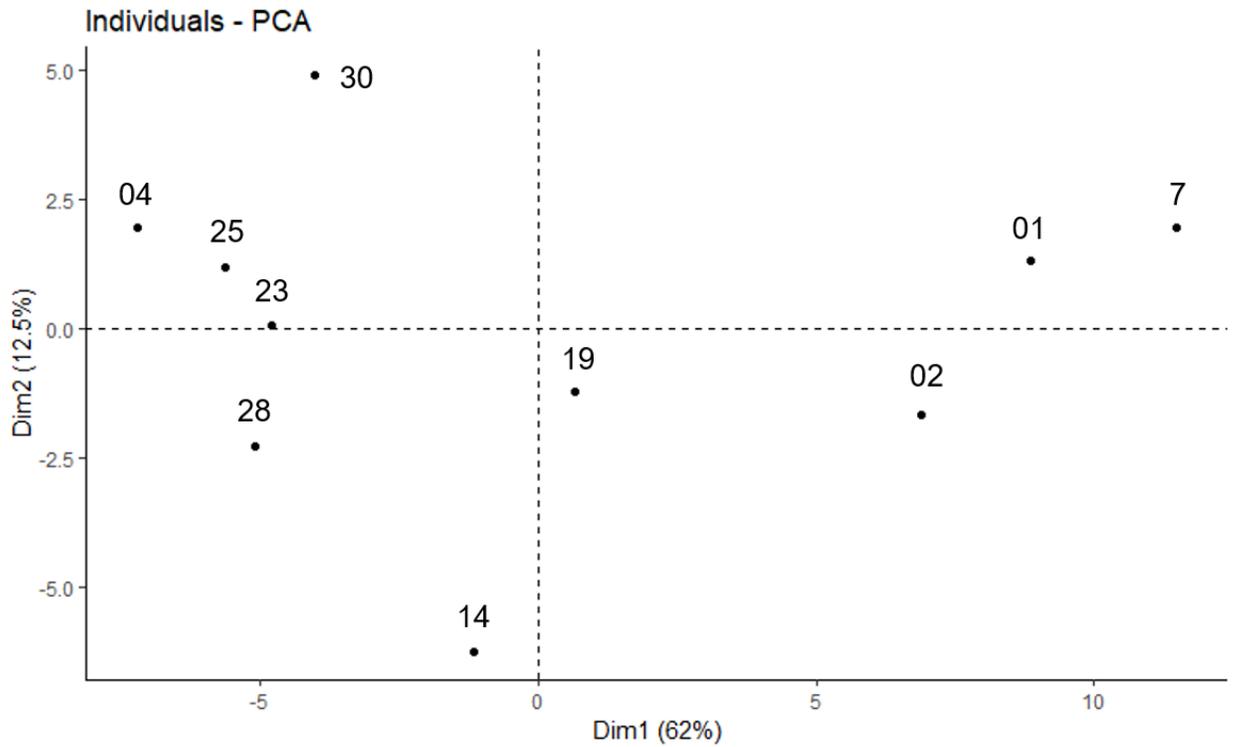


Figura S4. Análise das componentes principais dos compostos em relação as 10 áreas analisadas. Relação das áreas está na tabela 1S.