

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Consórcio café-forrageira tropical: impactos nos indicadores da qualidade
de solo**

Davi Bernardes Moscardini

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área: Fitotecnia.

**Piracicaba
2020**

Davi Bernardes Moscardini
Engenheiro Agrônomo

Consórcio café-forrageira tropical: impactos nos indicadores da qualidade de solo
versão revisada de acordo com a resolução da CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LAÉRCIO FAVARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Moscardini, Davi Bernardes

Consórcio café-forrageira tropical: impactos nos indicadores da qualidade de solo / Davi Bernardes Moscardini - - versão revisada de acordo com a resolução da CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

54 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. *Coffea arabica* L. 2. Café arábica 3. Braquiária 4. Consórcio 5. Qualidade do solo 6. SMAF I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa aos meus pais Luis Marcial Moscardini e Luziene Bernardes Pinto Moscardini pelo suporte e apoio incondicional ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo suporte e apoio incondicional durante a realização deste trabalho.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” meu berço de conhecimento por sete anos, serei sempre grato.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. José Laércio Favarin pelas valiosas trocas de conhecimento que me tornaram verdadeiramente Engenheiro Agrônomo. A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original. Muito obrigado!

Aos produtores Antônio Carlos David, João Paulo Facury e Rafael Facury por deixarem suas propriedades de porteiras abertas para a realização desta pesquisa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro durante o projeto de pesquisa.

Ao amigo Prof. Dr. Paulo Mazzafera pela amizade, solicitude e valiosas discussões sobre ciência.

Ao Prof. Dr. Maurício Roberto Cherubim pelo auxílio na utilização da ferramenta SMAF e pelas dicas fundamentais para realização desta pesquisa.

À Prof.^a Sara Adrian Lopez de Andrade por me receber no IB/UNICAMP e prestar todo o auxílio necessário para realização de análises de fungos micorrízicos arbusculares.

A todos os amigos do Laboratório Multiusuário, em especial João Baptistella pela parceria e auxílio nas coletas de amostras de solo. Adilson Pereira Domingues pelo auxílio nas análises estatísticas. Laís Teles Souza pela parceria nas pesquisas com café e Edson Ademir de Moraes por sua disposição em ajudar.

A Ribersolo, laboratório de análises de solo de minha confiança, em especial ao amigo Victor Monseff pelo apoio para realização das análises granulométricas e químicas de solo.

Ao Prof. Dr. Fernando Dini Andreote e a Dr. Cátia Simon pela grande ajuda na realização das análises enzimáticas.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no návio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.”

Leonardo Da Vinci

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA	10
1.1. Forrageira tropical e atributos físicos de solo	11
1.2. Forrageira tropical e atributos químicos de solo	12
1.3. Forrageira tropical e atributos biológicos de solo	13
1.4. Avaliação da qualidade do solo	14
2. MATERIAL E MÉTODOS	16
2.1. Descrição das áreas experimentais	16
2.2. Amostragem do solo e análises laboratoriais	18
2.3. Avaliação da qualidade do solo - (SMAF).....	20
2.4. Análise estatística	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
3.1. Indicadores biológicos de qualidade do solo	24
3.2. Indicadores químicos de qualidade do solo	28
3.3. Indicadores físicos de qualidade do solo	33
3.5. Índice da qualidade de solo (IQS) e contribuição dos atributos	35
4. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	43

RESUMO

Consórcio café-forrageira tropical: impactos nos indicadores da qualidade de solo

O cultivo de café no Brasil, maior produtor do mundo, é realizado majoritariamente a pleno sol, em sistema de monocultivo, onde cerca de quarenta por cento da área é mantida sem plantas de cobertura, uma prática prejudicial à qualidade do solo. Na última década, o consórcio de café com forrageira tropical ganhou muitos adeptos por supostamente aumentar a produtividade do cafezal. O consórcio em faixas consiste em renques de cafeeiros intercalados com plantas do gênero *Urochloa*, forrageira de notável produção de biomassa e capacidade de melhorar os atributos do solo. A presente pesquisa testou a seguinte hipótese: a inserção da forrageira tropical no cultivo de café arábica é vantajosa ao sistema de produção, pelos benefícios da planta de cobertura aos atributos físicos, químicos e biológicos relacionados à qualidade do solo. Amostras de solo deformadas e indeformadas foram coletadas nas profundidades de 0 a 0,1 m e 0,1 a 0,3 m, em três posições no cafezal (sob a copa, rodado e entrelinha) em dois sistemas de cultivo de café (monocultivo e consórcio com forrageira tropical, ambos durante doze anos). Primeiro avaliou-se o impacto da gramínea em cada indicador de forma isolada, e os resultados evidenciaram melhoria de atributos químicos - aumento do teor de fósforo e potássio; de atributos físicos - maior infiltração de água e redução da densidade do solo e de atributos biológicos - aumento do carbono orgânico total, atividade da B-Glucosidase e dos fatores relacionados a fungos micorrízicos arbusculares. Para integração dos dados foi calculado um índice de qualidade de solo (IQS) através do software SMAF (Soil Management Assessment Framework). Esta pesquisa foi pioneira no uso do SMAF para avaliar a qualidade de solo em cafezais. Por meio dessa ferramenta detectou-se diferenças na qualidade do solo em razão da posição avaliada e do sistema de cultivo de café. A inserção da forrageira tropical melhorou 5% o IQS dos primeiros 0,1 m sob a copa do cafeeiro e 13% na entrelinha do cafezal. Na profundidade entre 0,1 m e 0,3 m o IQS foi 5% superior sob o rodado e 9% na entrelinha, onde era mantida a forrageira. Os resultados dessa pesquisa comprovaram a hipótese, evidenciando que o consórcio do café com a forrageira tropical é uma estratégia efetiva para melhorar a qualidade do solo na cafeicultura nacional.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L.; Café arábica; Braquiária; Consórcio; Saúde do solo; SMAF.

ABSTRACT

Coffee-tropical forage intercrop: impacts on soil quality indicators

The coffee cultivation in Brazil, largest producer in the world, is carried out mainly in full sun, in a monoculture system, where about forty percent of the area is maintained without cover crops, a harmful practice to soil quality. In the last decade, the coffee intercrop with tropical forage has gained many followers for allegedly increasing coffee productivity. This strip consortium consists of rows of coffee plants interspersed with plants of the *Urochloa* genus, a forage remarkable for its biomass production and ability to improve soil attributes. The present research tested the following hypothesis: the cultivation of tropical forage with arabica coffee is advantageous to the production system, due to the benefits of the cover crop to the physical, chemical and biological attributes related to soil quality. Deformed and undisturbed soil samples were collected at depths from 0 to 0.1 m and 0.1 to 0.3 m, in three positions in the coffee plantation (under the canopy, in the machine traffic zone and between the lines) in two coffee cultivation systems (monoculture and intercropped with tropical forage, both with twelve years). First, the impact of the grass on each individual indicator was evaluated, and the results showed an improvement in chemical attributes - increased phosphorus and potassium content; physical attributes - greater water infiltration and reduced soil density and biological attributes - increase in total organic carbon, activity of B-Glucosidase and factors related to arbuscular mycorrhizal fungi. For data integration, a soil quality index (SQI) was calculated using the SMAF (Soil Management Assessment Framework) software. This research was pioneer in the use of SMAF to assess soil quality in coffee plantations. Through this tool, differences in soil quality were detected due to different positions and coffee growing system evaluated. The insertion of tropical forage improved 5% the SQI of the first 0.1 m under the coffee canopy and 13% between the lines. In the depth 0.1 m to 0.3 m, the SQI was 5% superior in the machine traffic zone and 9% between the lines, where the forage was kept. The results of this research proved the hypothesis, showing that the consortium of coffee with tropical forage is an effective strategy to improve soil quality in national coffee production.

Keywords: Coffee; Brachiaria; Intercropping; Soil Health; SMAF.

1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA

O aumento da produtividade agrícola por meio da intensificação da agricultura nos trópicos é uma alternativa viável ambientalmente, porque não avança sobre áreas novas ocupadas com a vegetação nativa. O incremento da produção de alimentos é necessário a fim de suprir a demanda de cerca de 9,6 bilhões de pessoas em 2050 (GERLAND et al., 2014).

O Brasil é o maior produtor mundial de café, onde são cultivados cerca de 2,2 milhões de hectares. A maior média de produtividade da história (1920 kg ha⁻¹) foi obtida na safra 2017/2018, quando produziu 62 milhões de sacas de 60 kg de grãos de café beneficiado. Houve um aumento expressivo da produtividade nos últimos dezoito anos, em que o país saiu de uma média de 15 sacas para 32,5 sacas por hectare (CONAB, 2018). Esse recorde de produtividade é o resultado do avanço do manejo de planta e solo na cafeicultura nacional (FAVARIN et al., 2018).

Em relação ao solo, a qualidade do mesmo pode ser definida de modo simples como a sua capacidade de funcionar e produzir. Esse conceito considera a produção biológica sustentável, a qualidade do ambiente e a saúde de plantas e animais (KARLEN et al., 1994). Essa abordagem é holística e integra atributos de natureza física, química e biológica do solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

O principal sistema de cultivo ainda em uso na cafeicultura brasileira caracteriza-se pela manutenção do cafeeiro como a única planta (monocultivo) do sistema, no qual a área entre as linhas de plantas (renque) é mantida sem plantas de cobertura, pelo uso de herbicida e/ou implemento mecânico, os quais impactam negativamente a qualidade física e biológica do solo (ALCÂNTARA; FERREIRA, 2000). Essas práticas favorecem a erosão e o aquecimento da camada superficial do solo, exposta à radiação solar.

Dentre as práticas adotadas na moderna cafeicultura merece destaque a adoção crescente do consórcio do cafeeiro com forrageiras tropicais do gênero *Urochloa* (SERAFIM, 2011). Estima-se que 40% da produção brasileira de café seja oriunda de áreas montanhosas (ROMERO, 2013). Mesmo que este modelo de cultivo se concentre apenas nas áreas mecanizáveis tal prática ainda tem potencial de ser implementada em propriedades responsáveis por mais de metade do café produzido pelo Brasil. Pouco se sabe, no entanto sobre os seus efeitos sobre qualidade física, química e biológica do solo.

Nesse sistema de produção toda a área agrícola é cultivada, parte com o cafeeiro e parte com a forrageira na entrelinha. A planta de cobertura é manejada com roçadas periódicas, e os resíduos vegetais resultantes permanecem sobre o solo protegendo-o da incidência direta das chuvas tropicais e da radiação solar abundante o ano todo. A ceifa da gramínea da entrelinha pode depositar cerca de 5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de biomassa vegetal da parte aérea (RAGASSI; PEDROSA; FAVARIN, 2013), a qual é distribuída sob a copa do café e nas áreas de trânsito (rodado) das máquinas agrícolas. Ressalte-se que a cada corte da parte aérea da forrageira uma quantidade significativa de raiz morre e muita biomassa estará disponível dentro do solo. O fornecimento contínuo de grande quantidade de biomassa radicular, igual ou superior a quantidade depositada na superfície do solo (parte aérea) é uma fonte rica de carbono (C) que mantém uma grande diversidade de organismos. A biomassa do sistema radicular promove ações física (agregação, aeração e infiltração) e biológica (C-oxidável), as quais em conjunto, propiciam a melhoria do solo.

Nos trópicos, sistema de produção que mantenha o solo coberto com resíduo vegetal é benéfico à qualidade dos mesmos, a exemplo do que ocorre na agricultura sem a lavração do solo ou semeadura direta de plantas anuais (KARLEN et al., 1994; LISBOA et al., 2019). Espera-se, portanto, que a capacidade de produzir grandes quantidades de biomassa radicular e da parte aérea da forrageira tropical, da ordem de 50 Mg ha⁻¹ (RAZUK, 2002), impacte positivamente os vários indicadores de qualidade do solo, nos cafezais brasileiros.

1.1. Forrageira tropical e atributos físicos de solo

Plantas do gênero *Urochloa* são notáveis pela capacidade de melhorar os atributos físicos e biológicos do solo. O crescimento radicular associado à presença de bactérias e fungos micorrízicos arbusculares é fundamental para formar, recuperar e manter a estrutura e a agregação das partículas do solo (GOSS; KAY, 2005).

Essa forrageira tropical é a chave para a melhoria da estrutura do solo, pelas seguintes razões: (i) produz de 5 a 12 vezes mais biomassa radicular do que da parte aérea (RAZUK, 2002), (ii) associa facilmente a fungos micorrízicos arbusculares (BARBOSA et al., 2019) e (iii) aumenta a biomassa microbiana no solo (GICHANGI et al., 2016) por causa da grande quantidade de C-oxidável adicionado no interior do solo, via raízes. O potencial dessa planta para recuperar solo fisicamente degradado foi comprovado em área explorada por mineração e cultivada com eucalipto (CAVALCANTE et al., 2019; RIZZO; CASTRO, 2000; STUMPF; PAULETTO; PINTO, 2016).

A quantidade de poros de aeração do solo (macroporos) pode ser aumentada graças à biomassa de raízes associadas aos microrganismos (FEENEY et al., 2006). Motivo pelo qual o expressivo desenvolvimento radicular da braquiária aumenta taxa de infiltração de água no solo e diminui a erosão (CARVALHO et al., 2014; MORAES et al., 2004). Outro benefício que advém desse fato é a redução da compactação (NETO et al., 2015). Pelos macroporos dá-se a difusão do oxigênio (O_2) da atmosfera para o interior do solo e subsolo, ambiente menos concentrado. Este gás é indispensável à respiração e crescimento das raízes (ERICKSON, 1946), especialmente no subsolo. Por último a inserção da gramínea no consórcio com o cafeeiro promove maior reposição da reserva hídrica e reduz a evaporação e, assim, aumenta o teor de água facilmente disponível (ROCHA et al., 2015).

Em suma, são muitos os benefícios da introdução da braquiária nos atributos físicos do solo, com reflexo positivo no desenvolvimento radicular do café arábica (SILVA et al., 2015). Em última instância isso propicia um ambiente favorável à produtividade por conta de a planta transpirar por mais tempo, em razão da exploração da água do solo e subsolo (abaixo de 0,3 m de profundidade).

1.2. Forrageira tropical e atributos químicos de solo

Basicamente quatro processos estão associados à distribuição dos nutrientes no perfil do solo: (i) intemperismo, (ii) deposição atmosférica, (iii) lixiviação e (iv) ciclagem biológica (TRUDGILL, 1977). A distribuição dos nutrientes no solo é heterogênea, por isso quanto maior o volume explorado maior será a capacidade de a planta acessar os nutrientes e absorvê-los.

O extenso sistema radicular da braquiária influencia pelo menos dois processos de distribuição de nutrientes no solo: a lixiviação e a ciclagem biológica. Em sistema de produção de cereais, a forrageira cultivada na segunda safra, após a colheita da soja, absorveu 40% do K contido na biomassa da zona abaixo de 0,3 m e 34% abaixo de 0,6 m de profundidade (DIAS, 2018; OLIVEIRA et al., 2020).

A grande capacidade de recuperação de K do solo e subsolo pela gramínea é interessante no sistema de produção café-forrageira, pelos seguintes motivos: (i) é nutriente mais absorvido e removido pela colheita de café (DE SOUZA, 2018), (ii) a dose de potássio em cafezal produtivo chega a 400 kg ha^{-1} de K_2O (QUAGGIO et al., 2018) e (iii) cerca de 30% do sistema radicular do cafeeiro concentra-se nos primeiros 0,1 m de solo (DEFRENET et al., 2016), situação favorável a lixiviação (N e K). A dose de N é da mesma ordem de grandeza de K e

ambos os nutrientes são os que mais encarecem o custo com a nutrição da planta, uma vez que mais de 70% do N e 94% do K consumido na agricultura brasileira são importados pelo país (NASCIMENTO; MIRANDA, 2015).

O fósforo (P) também é um nutriente beneficiado pela presença da gramínea. Ao longo do processo evolutivo em solos de baixa fertilidade, a forrageira desenvolveu uma série de mecanismos que facilitam o acesso ao nutriente. A exsudação de ácidos orgânicos (LAMBERS et al., 2006), liberação de enzimas fosfatases (ROSOLEM; MERLIN; BULL, 2014) e a solubilização de frações recalcitrantes de P orgânico (ALMEIDA et al., 2018a) podem aumentar a disponibilidade de P lábil no solo (ALMEIDA; ROSOLEM, 2016; CORAZZA et al., 2003; MERLIN; HE; ROSOLEM, 2013). Ainda que alguns trabalhos não tenham constatado aumento do nutriente à cultura semeada depois do cultivo da braquiária (ALMEIDA et al., 2018a, 2018b).

Na cultura do café especula-se que a braquiária pode, também, auxiliar a absorção de P por causa do aumento da superfície de absorção proporcionada pela superfície das hifas dos fungos micorrízicos arbusculares (FMA's). De um modo bem simples pode-se dizer aumenta a quantidade de zonas com gradiente de concentração de P, causa da difusão do nutriente na direção das zonas deplecionadas pela absorção da planta. As zonas deplecionadas nesse caso é a rizosfera propriamente dita e o solo imediatamente ao lado da extensão das hifas. Além disso, o P absorvido pela gramínea também é liberado ao cafeeiro após a deposição e degradação dos resíduos sob sua copa.

1.3. Forrageira tropical e atributos biológicos de solo

A atividade biológica no solo está diretamente relacionada com o fornecimento de C, temperatura, umidade do solo, vento e compactação (SANCHES, 2000). Por causa dos fatores envolvidos percebe-se o potencial da braquiária como planta recuperadora das propriedades biológicas do solo. Essa gramínea é notável em relação ao incremento de C do solo, pois pode fornecer quantidade superior ao depositado por florestas tropicais (SEGNINI et al., 2019).

No consórcio café-forrageira praticamente toda a área é cultivada. Desse modo, o solo fica protegido pela vegetação ou pelo resíduo da ceifa periódica da parte aérea. Além da proteção contra as intempéries, a cobertura com a biomassa caulinar (parte aérea) pode tornar o sistema de produção resiliente à compactação. O trânsito de máquinas em solo sem vegetação

(viva ou morta) compacta mais do que o tráfego em solo coberto com resíduo vegetal (ROSIM et al., 2013).

Em cafezal consorciado com a forrageira tropical também foi observado 49% a mais de água nos primeiros 0,1 m de profundidade (PEDROSA, 2013). Essa condição favorece a atividade dos organismos do solo e a bioquímica do sistema (BOROWIK; WYSZKOWSKA, 2016). O cultivo da braquiária aumenta ainda a atividade de enzimas indicadoras de atividade biológica do solo (SIMON et al., 2017). Práticas como a adubação orgânica (LAMMEL et al., 2015) e o cultivo de leguminosas na entrelinha (BALOTA; CHAVES, 2010) estimularam a atividade dessas enzimas, diferente do que fora observado em solo lavrado em que usou herbicida na entrelinha (NUNES et al., 2009). Tais fatos evidenciam que a braquiária poderá beneficiar a biologia do solo do cafezal.

Outro importante indicador da qualidade biológica do solo são os fungos micorrízicos arbusculares (FMA's), os quais representam a maior parte da biomassa de organismos do mesmo (GIANINAZZI et al., 2010). Os fungos micorrízicos arbusculares melhoram as propriedades físicas do solo pela ação mecânica das hifas extrarradiculares e por causa da exsudação de glicoproteínas agregadoras das partículas do solo (RILLIG, 2004).

As práticas culturais também influenciam a abundância e a diversidade de FMA's (ANDRADE et al., 2009). O uso de planta de cobertura na entrelinha pode aumentar a quantidade de FMA's em sistemas de agricultura intensiva (LEHMANN et al., 2012). Assim, a inserção da braquiária no sistema possivelmente beneficiaria esses organismos, por causa da facilidade de simbiose entre ambos (SMITH; READ, 2008).

1.4. Avaliação da qualidade do solo

A reação às mudanças de manejo e uso do solo é geralmente lenta. Esse é o motivo pelo qual é difícil detectar os impactos antes que dano irreversível seja causado (NORTCLIFF, 2002). Portanto, é preciso que um conjunto de atributos do solo sensível a mudança pelo manejo seja selecionado e caracterizado como indicador de qualidade do mesmo (BÜNEMANN et al., 2018). Desse modo, será possível avaliar o potencial de degradação da prática agrícola, a fim de evitar impacto negativo no sistema de produção.

Da década de 1990 em diante, diversos modelos de avaliação da qualidade do solo foram desenvolvidos, com destaque para o Soil Management Assessment Framework (SMAF), por causa da sua adaptabilidade à várias situações de manejo e ecossistemas (ANDREWS;

KARLEN; CAMBARDELLA, 2004; KARLEN et al., 2008). Esta abordagem é recente e bem sucedida no Brasil, pois esse modelo mostrou sensibilidade na detecção de impactos na qualidade do solo associada a expansão da cana-de-açúcar (CHERUBIN et al., 2016), no cultivo com a remoção da palha da planta (LISBOA et al., 2019) e, também, pelas práticas de uso e manejo de solos diferentes (CHERUBIN; TORMENA; KARLEN, 2017; LUZ et al., 2019). Ressalte-se, no entanto, a ausência de pesquisa que tenha avaliado o impacto da forrageira tropical no consórcio com o café sobre a qualidade do solo, apesar do uso crescente desse sistema de produção (SERAFIM, 2011).

A presente pesquisa foi realizada com o objetivo de testar a seguinte hipótese: a inserção da forrageira tropical no cultivo de café arábica é vantajosa ao sistema de produção, pelos benefícios da planta de cobertura aos atributos físicos, químicos e biológicos relacionados à qualidade do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição das áreas experimentais

A pesquisa foi realizada em duas propriedades na região cafeeira da Alta Mogiana, no município de Franca, São Paulo. No período da pesquisa, os tratos culturais e fitossanitários foram semelhantes e realizados pelos cafeicultores, de acordo com o padrão adotado na região.

Os cafezais diferem substancialmente em relação ao manejo de plantas na entrelinha da lavoura. Em uma propriedade o cafeeiro é consorciado com a forrageira tropical (*Urochloa decumbens*) (Figura 1) há doze anos. Nesse sistema a gramínea é controlada com 4 a 5 roçadas durante o ano, e o resíduo vegetal é depositado sob a copa da planta pela própria roçadora. Na outra área o sistema caracteriza-se pelo monocultivo de café há 12 anos (Figura 2). No monocultivo a entrelinha é mantida sem plantas pelo uso de enxada rotativa (trincha) e aplicação de herbicida (glifosato) em área total. Outros dados das duas áreas experimentais estão descritos nas Tabelas 1.



Figura 1. Consórcio café-forrageira tropical. No rodado e sob a copa da planta o solo é coberto com resíduos oriundos da ceifa da gramínea cultivada na entrelinha.



Figura 2. Monocultivo de café. O solo de toda a entrelinha fica descoberto durante o ano, onde há somente folhas senescentes da própria cultura.

Tabela 1. Dados climáticos, de solo e histórico do manejo nos dois sistemas de produção de café (café-forrageira tropical e monocultivo de café).

Parâmetros	Descrição
Café-forrageira tropical	
Localidade	Franca, nordeste do estado de São Paulo, Brasil (20° 30' 19'' S, 47° 30' 40'' O) e 935 m de altitude.
Clima	Tropical de altitude (Cwb), temperatura média anual de 20°C e precipitação anual de 1600 mm.
Solo	Latossolo Vermelho Amarelo, com 20% de argila.
Histórico de manejo	Mundo Novo IAC 379/19, espaçamento 3,5 m x 0,7 m implantado sobre pasto de braquiária (<i>Urochloa decumbens</i>) em 2004 e desde então é mantida a braquiária na entrelinha (consórcio). Depois da quinta safra fez-se a poda lateral a cada dois anos, prosseguindo com adubação com 300 kg ha ⁻¹ N (ano de vegetação) e 360 kg ha ⁻¹ N, 60 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅ e 305 kg ha ⁻¹ K ₂ O (ano de produção). Tratos culturais realizados com trator de 3 Mg. Produtividade média de 50 sacas ha ⁻¹ nos últimos 6 anos.
Monocultivo de café	
Localidade	Franca, nordeste do estado de São Paulo, Brasil (20° 27' 56'' S, 47° 30' 23'' O) e 935 m de altitude.
Clima	Tropical de altitude (Cwb), temperatura média anual de 20°C e precipitação anual de 1600 mm.
Solo	Latossolo Vermelho Amarelo, com 23% de argila.
Histórico de manejo	Catuaí Vermelho IAC 99, espaçamento 3,5 m x 0,7 m implantado sobre pasto de braquiária (<i>Urochloa decumbens</i>) em 2004 e desde então faz-se o monocultivo de café. Adubação com 300 kg ha ⁻¹ N e 300 kg ha ⁻¹ K ₂ O na carga alta e 250 kg ha ⁻¹ N e 250 kg ha ⁻¹ K ₂ O na carga baixa. Tratos culturais com trator de 2 Mg. Produtividade média de 35 sacas ha ⁻¹ nos últimos 6 anos.

2.2. Amostragem do solo e análises laboratoriais

Todas as amostras de solo foram coletadas na mesma data, novembro/2018, com sonda, nos dois sistemas de cultivo (café-braquiária e monocultivo de café), em três posições perpendiculares à linha de café, em duas profundidades (0 a 0,1 e 0,1 a 0,3 m) e quatro repetições (Figuras 3 e 4). Configurou-se então um delineamento fatorial 2x3x2. Os pontos foram escolhidos de forma aleatória no cafezal, uma vez que as áreas de coleta eram planas e homogêneas quanto aos tratos culturais e tipo de solo.

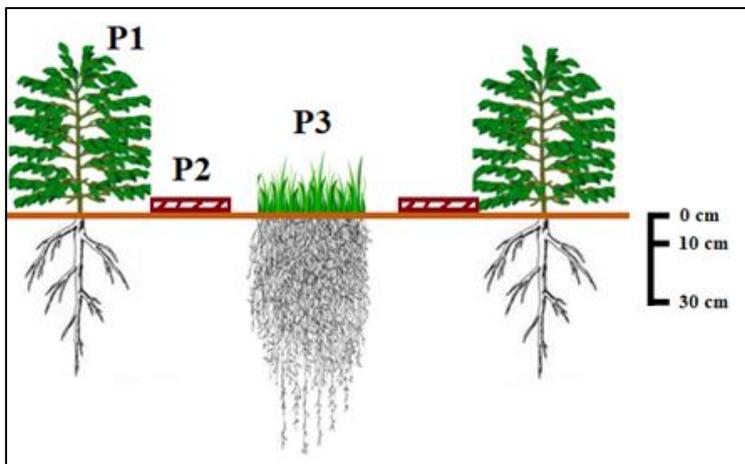


Figura 3. Posições de coleta de solo (P1, P2 e P3) em relação à linha de café. P1, sob a copa; P2, rodado do trator; P3, entrelinha de café, nos dois sistemas de cultivo. A direita detalhe das posições P1, P2 e P3 in loco.



Figura 4. Sonda utilizada para amostra indeformada de solo e amostra em anel volumétrico.

Um primeiro conjunto de amostras e análises de solo foram realizadas para avaliar o impacto da forrageira sobre os parâmetros relativos aos FMA's, como: (i) número de esporos viáveis de FMA e (ii) teor de glomalina.

Os esporos viáveis foram obtidos pelo método do peneiramento úmido, no qual 40 mL de solo (GERDEMANN; NICOLSON, 1963) foram lavados, peneirados e depois procedia a centrifugação em solução de sacarose a 70%. O número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares foi determinado pela contagem com o auxílio de uma placa canelada e microscópio estereoscópio (40x).

O conteúdo de glomalina no solo obteve-se após a extração conforme metodologia de (WRIGHT; UPADHYAYA, 1998), no qual a proteína é extraída de 1 g de solo (3 replicatas técnicas de 1 g para cada repetição) com 8 mL de citrato de sódio (50 mmol L^{-1} pH 8). Após agitação vigorosa a solução foi autoclavada a $121 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 hora, centrifugada ($8.000xg$ por 15 minutos) e o sobrenadante separado. Esse procedimento foi repetido até que a solução do sobrenadante ficasse translúcida, a fim de determinar a quantidade de proteínas pelo método de BRADFORD (1976).

Outro conjunto de amostras de solo foi usado para avaliar nove indicadores da qualidade de solo, com base nos atributos químicos, físicos e biológicos, conforme apresentado a seguir:

a) indicadores químicos: determinou-se o teor disponível de fósforo (P), potássio (K) trocável e acidez ativa (pH em H₂O) por meio da metodologia proposta por RAIJ (2001),

b) indicadores biológicos: (i) carbono orgânico total do solo (COT), determinada por meio da oxidação da matéria orgânica via úmida (WALKLEY; BLACK, 1934); (ii) carbono da biomassa microbiana (CBM), obtida em amostras na capacidade de campo (VANCE; BROOKES; JENKINSON, 1987); (iii) atividade da enzima β -Glucosidase (BG), determinada por meio da metodologia proposta por TABATABAI (1994).

c) indicadores físicos: (i) densidade do solo (DS), obtida pelo quociente entre a massa seca de solo e o volume do cilindro metálico (100 cm³); (ii) condutividade hidráulica de solo saturado (kfs), obtida pelo método de BAGARELLO et al. (2004), em que foram feitas quatro medições de kfs para cada ponto de amostragem com cilindros de PVC de 0,15 m de altura por 0,15 m de diâmetro interno, inseridos a 0,08 m de profundidade e aplicação de 330 ml de água, como descrito por CHERUBIN et al. (2016); (iii) estabilidade de agregados em água (EA), por meio do oscilador vertical (Yoder Model MA-148) equipado com um kit de três peneiras (2000, 250 e 53 μ m) operando em 30 oscilações por minuto, durante 10 minutos (SIX; ELLIOTT; PAUSTIAN, 2000). A porcentagem de macroagregados estáveis em água (EM) obteve-se pelo somatório da massa de agregados retidos nas peneiras 2000 μ m e 250 μ m dividida pela massa total de solo, e o resultado foi multiplicado por 100 (%).

2.3. Avaliação da qualidade do solo - Soil Management Assesment Framework (SMAF)

A ferramenta SMAF (Soil Management Assesment Framework) foi utilizada para avaliar a qualidade do solo nos cafezais da presente pesquisa. Para tanto, foram selecionados oito indicadores de qualidade (pH, P, K, Ds, EA, COT, CBM e BG), de acordo com o proposto por KARLEN et al. (2008). Esses pesquisadores recomendam o uso de no mínimo cinco indicadores, desde que pelo menos um deles represente os processos e atributos físico, químico e biológico do solo.

Os atributos químicos (pH, P e K) foram utilizados para avaliar a fertilidade do solo, uma vez que há relação entre a acidez do solo e a disponibilidade de nutrientes. Os indicadores físicos (DS e EA) avaliam indiretamente a resistência do solo ao crescimento de raízes, aeração, condutividade hidráulica e a susceptibilidade ao selamento superficial e, portanto, o risco de erosão. Por fim, foram selecionados os atributos biológicos como o COT, CBM e BG. O COT

é importante para vários processos: agregação, disponibilidade de nutrientes e energia para os microrganismos do solo, cujas atividades avaliou-se por meio do CBM e BG.

A ferramenta SMAF foi utilizada para interpretar os valores medidos dos indicadores por meio da curva de pontuação. As curvas de pontuação (algoritmos) permitem transformar os valores medidos em notas de 0 a 1, levando em consideração fatores inerentes do solo (tipo de solo, textura e mineralogia), do clima (classificação climática, época de amostragem), do relevo (declividade), da cultura (exigência nutricional) e dos métodos analíticos utilizados (ANDREWS; KARLEN; CAMBARDELLA, 2004; STOTT et al., 2010; WIENHOLD et al., 2009).

Os cafezais da presente pesquisa foram cultivados no mesmo tipo de clima e solo, por isso adotou-se os mesmos fatores para as duas áreas. Para a classe de matéria orgânica utilizou o fator 4 (baixo conteúdo de matéria orgânica). Em relação à classe de textura adotou-se o fator 2 (textura média), para a classe climática o fator 1 (≥ 170 graus dias e ≥ 550 mm de precipitação anual). Para a estação de coleta optou pelo fator 2 (verão). Para o teor de óxidos de ferro empregou-se o fator 2, uma vez que o solo da área experimental pertence à classe dos Latossolos e quanto para a classe mineralógica do solo usou o fator 3 (argila 1:1 e óxidos de Fe e Al). Finalmente, em relação a classe declividade adotou o fator 2 (2 a 5% de declividade) e para a classe relativa ao nível de intemperismo do solo (intemperismo elevado).

Utilizou-se o método da resina para a determinação do fósforo disponível (Classe 5). Os fatores de cultura foram alterados para as condições brasileiras, onde se cultiva café arábica, com base nas recomendações oficiais (RAIJ et al., 1997). Os valores considerados para P e pH (água) foram 30 mg dm^{-3} de P e pH 5,6 (RAIJ et al., 1997). Adotou-se curvas calibradas para o K por WIENHOLD et al. (2009), de modo a se ajustar a recomendação de K usada no Brasil.

As notas calculadas para cada atributo (físico, químico e biológico) foram integradas em um índice geral IQS (Índice de Qualidade de Solo), seguindo o método simples aditivo (1). Esse índice (IQS) varia de 0 a 1 e expressa a taxa de funcionamento do solo em relação ao seu potencial máximo:

$$IQS = \sum_{i=1}^n \frac{NI}{n} \quad (1)$$

em que, **IQS** corresponde ao Índice de Qualidade de Solo (adimensional), **NI** é a nota do indicador e **n** o número de indicadores integrados no índice.

O índice total também foi subdividido em químico (pH, P, K), físico (DS, EA) e biológico (COT, CBM, BG) para avaliar a contribuição de cada atributo do solo na nota total. Desta maneira foi possível identificar os componentes a serem melhorados por meio do manejo, a fim de propiciar um ambiente com qualidade de solo que favoreça a produtividade do café arábica.

2.4. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise da variância (ANOVA) para testar a influência da forrageira consorciada com café nos indicadores de solo, na nota calculada pelo SMAF e no SQI geral. Quando a ANOVA foi significativa ($p < 0.05$) as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. As análises foram separadas por profundidade. Comparou-se a diferença entre a nota geral de cada posição entre os sistemas e a diferença da nota calculada pelo SMAF para os indicadores químicos, físicos e biológicos de cada posição, em cada sistema de produção de café. Ainda, comparou a diferença entre o IQS das posições dentro do mesmo sistema para avaliar a qualidade do solo dentro do sistema de produção de café. As análises estatísticas foram realizadas com o programa GraphPad Prism, versão 5.00 para Windows (Microsoft) (GraphPad Software, San Diego, Califórnia, EUA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Indicadores biológicos de qualidade do solo

No geral, houve diferença significativa dos parâmetros relacionados aos FMAs entre os sistemas de cultivo de café (Tabela 3). Sob a copa da planta no café-forrageira observou o dobro de esporos de FMA na camada superficial (0,1 m) e 38% de incremento no subsolo (0,1 a 0,3 m) em relação ao monocultivo de café. Com relação a proteína glomalina presente no solo (PGS) observou aumento de 25% nos primeiros 0,1 m de solo sob a copa do café-braquiária.

Tabela 2. Médias do número de esporos de FMA's e proteína glomalina (PGS) no solo (0,1 m) e subsolo (0,1 a 0,3 m) nos dois sistemas de produção (café-forrageira e monocultivo de café) e posições em relação ao renque de café.

Profundidade (m)	Sistemas de produção	Posição	Nº de esporos	PGS
			40 g solo	mg g ⁻¹
00 a 0,1	Café-forrageira tropical	Sob a copa	1157 a	10,8 a
		Rodado	479 a	11,9 a
		Entrelinha	1094 a	11,0 a
	Monocultivo de café	Sob a copa	578 b	8,6 b
		Rodado	438 a	10,8 a
		Entrelinha	609 b	7,3 b
0,1 a 0,3	Café-forrageira tropical	Sob a copa	704 a	5,0 a
		Rodado	340 b	5,7 a
		Entrelinha	700 a	5,0 a
	Monocultivo de café	Sob a copa	508 b	5,3 a
		Rodado	459 a	6,7 a
		Entrelinha	866 a	5,6 a

Comparações feitas entre posições a uma mesma profundidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

Sabe-se que a adoção do consórcio café-forrageira aumenta a colonização micorrízica de café (LAMMEL et al., 2015), as braquiárias são gramíneas muito micotróficas e possivelmente aumentam o número de propágulos de FMA passíveis de se associarem ao cafeeiro. Também é importante ressaltar que o consórcio com braquiária na presente pesquisa fora submetido a poda a cada dois anos de produção. Há relatos de essa prática estimular a colonização micorrízica, verificado em algumas espécies de árvores e arbustos (INGLEBY et al., 2007; MARTIN; WHITCOMB; STUTZ, 2010). A combinação das duas práticas, consórcio com braquiária e poda bianual favoreceu a colonização pelos FMA's e, indiretamente,

aumentou o teor de PGS e o número de esporos de FMA's. Essas variáveis apresentam correlação com a colonização micorrízica como constatado por KHAKPOUR & KHARA (2012) e ROSIER et al. (2008).

O aumento do teor de glomalina no solo do cafezal consorciado é positivo, porque essa glicoproteína contribui muito para a agregação de partículas do solo (LUNA et al., 2016). Outra vantagem é o sequestro de C necessário para a manutenção da fertilidade (WANG et al., 2017), especialmente nos solos tropicais. Nesses solos, a matéria orgânica (MO) responde por mais de 70% da capacidade de troca de cátions (CTC), ainda que essa fração represente menos de 4% da parte sólida do solo. Nos solos tropicais, como se depreende, as cargas negativas são geradas majoritariamente pela MO, cujo coloide correlaciona positivamente com o teor de glomalina (NAUTIYAL et al., 2019).

Na entrelinha do cafezal, a presença da forrageira aumentou 80% o número de esporos de FMA nos primeiros 0,1 m de solo, em relação ao monocultivo de café (Tabela 3). Esse resultado era esperado, pois os fungos micorrízicos arbusculares são simbioses obrigatórios, ou seja, dependem da planta para a sua sobrevivência. Há diferenças entre as plantas quanto à capacidade de associação com esses fungos (PLENCHETTE; FORTIN; FURLAN, 1983), no entanto a forrageira tem alta capacidade de micotrofismo (CARNEIRO et al., 1999). No café-braquiária, a forrageira é controlada por meio de roçadas periódicas, prática favorável à manutenção dos propágulos de FMA (MELLONI et al., 2017). Essa prática leva a renovação contínua do sistema radicular, não desagrega mecanicamente as partículas do solo e, tampouco, sofre a ação nociva de herbicidas sobre os FMA.

O menor teor de PGS (-32 %) e o menor número de esporos de FMA's encontrados nos primeiros 0,1 m de solo na entrelinha do monocultivo de café se deve à ausência de planta micotrófica (forrageira) e, provavelmente, ao uso de herbicidas para o controle das plantas daninhas. O uso frequente de glifosato em toda a entrelinha prejudica a esporulação e a colonização micorrízica (ZALLER et al., 2014). Do mesmo modo, o controle mecânico com enxada rotativa, em que há lavração por impacto da camada superficial do solo, também pode facilitar a diminuição do teor de PGS. A lavração do solo destrói os agregados e expõe material orgânico à degradação pelos organismos do solo. Ainda que a glomalina seja uma proteína muito recalcitrante especula-se que o menor teor da glicoproteína também possa ser explicado em parte pelo dano físico (radiação solar) e em parte pela ação biológica, diferentemente do que acontece no solo cultivado com gramíneas (WRIGHT; STARR; PALTINEANU, 1999).

Curiosamente, observou incremento de 35% no número de esporos de FMA's na subsuperfície (0,1 a 0,3 m) sob o rodado do trator no monocultivo de café (Tabela 3). Isso possivelmente tem a ver com a menor densidade do solo (Tabela 4) comparada à mesma posição no café-forrageira. O uso de trator mais leve no monocultivo (Tabela 1) compactou menos em subsuperfície, sem prejuízo à esporulação de FMA's como fora constatada em pesquisa sobre o assunto (SALES et al., 2018). Sabe-se que o desenvolvimento dos fungos micorrízicos arbusculares depende de altas concentrações de oxigênio no solo (SAIF, 1981). A difusão de O₂ da atmosfera para o interior do solo depende de macroporos, o qual é menor na zona do solo de maior densidade. Outra hipótese é de que a menor densidade do solo nesta posição (solo menos compactado) favoreceu o desenvolvimento de raízes do cafeeiro em relação ao cafezal em consórcio. A associação com FMA's nesta profundidade pode ter elevado o número de esporos viáveis no cafezal em monocultivo.

O sistema de produção café-forrageira com poda bianual aumentou mais de 6% o teor de C nos primeiros 0,1 m de solo sob a copa da planta, enquanto na entrelinha do cafezal foi 37% superior (Tabela 4). Esses dados corroboram os observados por CERRI et al. (2017), os quais verificaram que os resíduos da poda da planta e da biomassa da gramínea da entrelinha mantêm alto o estoque de C do solo, semelhante ao de pastagem.

O teor de C dos primeiros 0,1m do solo da entrelinha no café-braquiária pode ser explicada pela quantidade e qualidade do resíduo aportado, uma vez que as raízes produzem de 5 a 12 vezes mais biomassa do que a parte aérea (RAZUK, 2002). Esta quantidade de material orgânico, naturalmente incorporado no solo, possui quantidade significativa de lignina, substância de difícil degradação, possível precursora do húmus (TYURIN, 1965; GUL; YANNI; WHALEN, 2012; CREME et al., 2017).

O menor teor de C na superfície do solo da entrelinha do monocultivo de café tem a ver com sistema de produção, em que o manejo da cultura é feito sem plantas de cobertura por meio de herbicidas e lavração mecânica via enxada rotativa. Métodos de controle de plantas daninhas, similar ao utilizado no monocultivo de café, prejudicam o acúmulo de matéria orgânica em cafezais no sul de Minas Gerais (ALCÂNTARA; FERREIRA, 2000).

Curiosamente, o teor de C da subsuperfície (0,1 a 0,3m) foi superior na entrelinha do monocultivo de café (+22%). Uma hipótese é de que o C proveniente da pastagem de *Brachiaria* que ocupava a área antes do plantio de café ainda responda por esse fato, uma vez que a amostra da subsuperfície seja menos afetada pelo manejo. Cabe mencionar que maior teor

de argila contribuí para maior estabilização do C (JENKINSON; RAYNER, 1977; TISDALL; OADES, 1982).

A curva SMAF para C do solo (formato sigmoide “maior é melhor”) leva em conta a classe de solo, a textura e o clima. No sistema café-braquiária a nota do C na superfície da entrelinha (1,0) aumentou em relação ao monocultivo de café (0,99). A maior quantidade de C em profundidade na entrelinha do monocultivo também influenciou a maior nota (0,89) em relação ao café-braquiária (0,77).

De maneira geral as curvas para C não foram sensíveis o suficiente para evidenciar as consideráveis diferenças no teor desse atributo entre os sistemas, especialmente na superfície do solo sob a copa do café e da entrelinha. O algoritmo interpretou que ambos os sistemas apresentaram elevados teores de C para a classe de solo da presente pesquisa. Ressalte-se a possibilidade de calibrar novas curvas para teor de C nos solos tropicais, pois foram atribuídas notas similares mesmo com diferença de 6 g kg^{-1} de C do solo entre os sistemas de produção.

No café-forrageira tropical o teor de C da biomassa microbiana (CBM) aumentou 38% na superfície do solo sob o rodado do trator, e nas duas profundidades na entrelinha +46% (0,1 m) e +50% (0,1 a 0,3 m). A ausência da lavração do solo associada à deposição de resíduos vegetais das roçadas frequentes contribuíram para a maior população microbiana do solo, a exemplo do que fora observada em semeadura direta, na cana-de-açúcar sem a remoção da palha e no consórcio laranja-braquiária (BALOTA; AULER, 2011; POPIN et al., 2019; WANG et al., 2012). As gramíneas translocam 50% do C fotoassimilado para dentro do solo, por meio da exsudação radicular (KUZUYAKOV; DOMANSKI, 2000). Essa quantidade expressiva de C oxidável incorporada via raízes favorece o desenvolvimento da biota, estimada por meio do CBM.

As notas atribuídas pelo SMAF variaram de 0,99 a 1,0 sem diferença entre os sistemas de produção e posições avaliadas (Tabela 5). Para LOPES et al. (2013), CBM maior do que 375 mg kg^{-1} é considerado alto para os Latossolos argilosos do cerrado brasileiro. Na presente pesquisa obteve-se valores superiores no café-braquiária, um forte indício dos benefícios da forrageira para a biologia do solo.

A ciclagem de nutriente depende de processos bioquímicos mediados por organismos do solo (TABATABAI, 1983). A degradação de material orgânico do solo é catalisada por enzimas como a B-glucosidase (BG), a qual atua na celulose, polissacarídeo mais abundante do

planeta. O aumento de atividade dessa enzima está ligado ao aumento da biomassa microbiana e reflete indiretamente capacidade de os microrganismos degradarem resíduos orgânicos e liberar os nutrientes às culturas (STOTT et al., 2010).

A atividade da enzima BG na entrelinha do monocultivo de café foi inferior nas duas profundidades -39% (0,1 m) e -59% (0,1 a 0,3 m) (Tabela 3). Os algoritmos do SMAF para BG (STOTT et al., 2010) detectaram diferenças nas entrelinhas entre os sistemas de produção. O cultivo da forrageira na entrelinha aumentou a nota da BG de 0,21 para 0,6 nos primeiros 0,1 m de solo e de 0,04 para 0,13 na camada subsuperficial. A maior atividade da enzima evidencia a melhoria da biologia do solo pela inserção da braquiária no sistema de produção de café e, em consequência, a capacidade de degradar resíduos e fornecer nutrientes à planta.

Na presente pesquisa, o teor de C, de CBM e atividade da BG foi maior no sistema café-braquiária, a exemplo do que fora constatado em sistema de semeadura direta de cereais (ACAR et al., 2018). Tais resultados corroboram os dados obtidos por LOPES et al. (2013), os quais encontraram correlação entre essas variáveis (CBM e BG) e o teor de C em Latossolos do cerrado brasileiro.

3.2. Indicadores químicos de qualidade do solo

Os atributos químicos do solo estão apresentados na Tabela 4. O algoritmo utilizado pelo SMAF detectou mudança dos mesmos (Tabela 5). Os fatores de cultivo da ferramenta SMAF foram alterados para as condições brasileiras onde se planta café arábica, com base na recomendação oficial (RAIJ et al., 1997). No SMAF as curvas de pH e P são parabólicas e o K é do tipo maior-melhor de modo que há um intervalo considerado ótimo para o desenvolvimento da planta (ANDREWS; KARLEN; CAMBARDELLA, 2004; WIENHOLD et al., 2009).

Houve diferença significativa do pH e da nota para pH sob a copa do café, em razão do sistema de produção. A acidez da camada superficial aumentou 10% sob a copa da planta e 28% em subsuperfície no café-forrageira. Na safra 2017/2018 aplicou-se 350 kg ha⁻¹ de N como nitrato de amônio no cafezal consorciado com braquiária, na qual 50% do N é N-NH₄⁺. O amônio sofre nitrificação no solo, em que a cada íon de NH₄⁺ gera dois cátion ácido (H⁺) (BRADY; WEIL, 2013) e o pH diminui (maior acidez). No consórcio, a degradação do resíduo da braquiária sob a copa do café também acidifica o solo pela mesma razão. A degradação do resíduo vegetal produz amônia (NH₃), a qual se combina com a água e forma o N-NH₄⁺, processo denominado amonificação. Em seguida, ocorre a nitrificação e a geração de cátion

ácido (H^+). Até a coleta das amostras no café-forrageira não fora aplicado calcário, ao contrário do que acontecera no monocultivo de café. Essa foi muito provavelmente a causa da acidificação do solo sob a copa da planta, nas duas profundidades (0 a 0,1m e 0,1 a 0,3m).

Os teores de P determinados em todas as posições no café-forrageira foram maiores do que no monocultivo de café (Tabela 4). Nos primeiros 0,1 m de profundidade, o teor de P sob a copa da planta aumentou 52%, o qual pode ser atribuído às aplicações de formulados contendo P (19-04-19) e também à ciclagem proporcionada pela forrageira. Na área do rodado do trator o teor de P aumentou 79% na camada superficial e três vezes em subsuperfície. A adubação é feita sob a copa e parte fora da copa, na área de trânsito de máquina, o que explica o maior teor do nutriente. O teor de P também foi alto neste local por causa de vários anos seguidos de deposição de resíduos da forrageira, a qual tem cerca de 2 g de P por kg de biomassa (COSTA et al., 2017; CRUZ et al., 2008; MAGALHÃES; OLIVEIRA; KLIEMANN, 2002). Ainda, houve a deposição bienal de resíduos pela poda do café no sistema consorciado, em cuja biomassa há cerca de 1,5 g de P por kg de resíduo (DE SOUZA, 2018). Estas foram as possíveis razões do teor alto de P nas amostras de solo dessa posição. Essas mesmas causas explicam os maiores teores de P em subsuperfície (0,1 a 0,3 m) de profundidade, embora a ordem de grandeza seja menor por causa da baixa mobilidade do P mineral no solo.

O maior teor de P na entrelinha do café-forrageira na camada superficial (+114%) e em profundidade (+86%) é explicado do mesmo modo. Em pastagens a forrageira aumentou até 45% o teor de P abaixo da touceira (CORAZZA et al., 2003), a exemplo do que verificaram outros pesquisadores (ALMEIDA; ROSOLEM, 2016; MERLIN; HE; ROSOLEM, 2013). A liberação de exsudatos radiculares também pode aumentar o teor de P lábil (RANDALL et al., 2001), obviamente isso é mais intenso no café-braquiária. Cabe mencionar ainda que a área sob o rodado do trator muda com o tempo, por causa do crescimento dos ramos laterais. Assim, a avaliação feita no rodado na presente pesquisa fora ocupada, em anos anteriores, pela forrageira. Por fim, a presença de mais macroporos no café-forrageira também facilitou a migração de P orgânico para a camada subsuperficial. Finalmente, os teores baixos de P em profundidade sob o rodado do trator e na entrelinha do monocultivo de café prejudicaram as notas para P nesses locais (Tabela 5).

O teor de K no café-forrageira foi superior ao monocultivo em todas as posições e profundidade (Tabela 4). A curva de avaliação de K do SMAF detectou mudança significativa em todas as posições nos primeiros 0,1 m de solo (Tabela 5), ainda que tenha recebido a mesma

dose de K e exportado mais K na carga alta, por causa da grande produtividade de café (50 sacas ha⁻¹).

Tabela 3. Médias dos atributos químico, físico e biológico, indicadores da qualidade de solo na camada superficial (0,1 m) e subsuperficial (0,1-0,3 m), em diferentes posições nos dois sistemas de produção (café-forrageira tropical e monocultivo de café).

Profundidade (m)	Sistema produção	Posição	Indicadores de qualidade								
			químicos			físicos			biológicos		
			pH	P	K	DS	EA	KFS	COS	CBM	BG
			Mg m ⁻³	%	mm h ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	μg g ⁻¹ h ⁻¹			
0 a 0,1	Café-forrageira tropical	sob a copa	5,2 b	88 a	289 a	1,15 b	74 b	-	16 a	284 a	50 a
		rodado	7,2 a	61 a	141 a	1,61 a	68 b	-	16 a	422 a	41 a
		entrelinha	6,8 a	45 a	90 a	1,33 b	70 b	16 a	22 a	502 a	81 a
	Monocultivo de café	sob a copa	5,7 a	58 b	102 b	1,33 a	83 a	-	15 b	308 a	38 a
		rodado	6,7 a	34 b	86 b	1,55 a	79 a	-	16 a	304 b	37 a
		entrelinha	6,9 a	21 b	64 b	1,50 a	80 a	11 b	16 b	344 b	49 b
0,1 a 0,3	Café-forrageira tropical	sob a copa	4,5 b	12 a	80 a	1,39 a	69 b	-	11 a	211 a	21 a
		rodado	6,8 a	21 a	88 a	1,59 a	75 a	-	10 a	274 a	23 a
		entrelinha	6,5 a	13 a	93 a	1,46 a	66 b	-	9 b	361 a	37 a
	Monocultivo de café	sob a copa	5,8 a	10 a	65 b	1,45 a	81 a	-	11 a	230 a	21 a
		rodado	6,4 a	7 b	24 b	1,48 b	79 a	-	10 a	290 a	27 a
		entrelinha	6,7 a	7 b	68 b	1,51 a	82 a	-	11 a	241 b	15 b

Comparações feitas entre posições da mesma profundidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

Tabela 4. Médias dos índices SMAF dos atributos químico, físico e biológico na camada superficial (0,1 m) e subsuperficial (0,1 a 0,3 m) em diferentes posições nos dois sistemas de produção (café-forrageira tropical e monocultivo de café).

Profundidade (m)	Sistema produção	Posições	Índices SMAF							
			químicos			físicos		biológicos		
			pH	P	K	DS	EA	COS	CBM	BG
			mg dm ⁻³			Mg m ⁻³	%	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	µg g ⁻¹ h ⁻¹
0 a 0,1	Café-forrageira tropical	sob a copa	0,90 b	1,0 a	0,99 a	0,99 a	1,0 a	0,99 a	1,0 a	0,23 a
		rodado	0,30 a	1,0 a	0,78 a	0,42 a	1,0 a	0,99 a	1,0 a	0,15 a
		entrelinha	0,52 a	0,99 a	0,62 a	0,95 a	1,0 a	1,0 a	1,0 a	0,6 a
	Monocultivo café	sob a copa	0,99 a	1,0 a	0,67 b	0,95 b	1,0 a	0,99 a	0,99 a	0,14 a
		rodado	0,58 a	0,98 a	0,59 b	0,5 a	1,0 a	0,99 a	1,00 a	0,13 a
		entrelinha	0,47 a	0,81 a	0,49 b	0,6 b	1,0 a	0,99 b	1,00 a	0,21 b
0,1 a 0,3	Café-forrageira tropical	sob a copa	0,56 b	0,71 a	0,52 a	0,83 a	1,0 a	0,86 a	1,0 a	0,06 a
		rodado	0,53 a	0,93 a	0,61 a	0,43 b	1,0 a	0,82 a	1,0 a	0,06 b
		entrelinha	0,65 a	0,78 a	0,63 a	0,69 a	1,0 a	0,77 b	1,0 a	0,13 a
	Monocultivo café	sob a copa	0,96 a	0,66 a	0,49 a	0,70 a	1,0 a	0,9 a	0,99 a	0,06 a
		rodado	0,74 a	0,42 b	0,22 b	0,63 a	1,0 a	0,84 a	1,0 a	0,08 a
		entrelinha	0,58 a	0,35 b	0,54 a	0,56 a	1,0 a	0,89 a	1,0 a	0,04 b

Comparações feitas entre posições da mesma profundidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

A forrageira é capaz de absorver formas trocáveis e não trocáveis de K (GARCIA et al., 2008), além da capacidade de recuperar esse nutriente, principalmente do subsolo abaixo de 0,3 m e 0,6 m de profundidade (DIAS, 2018; OLIVEIRA et al., 2020). A braquiária diminui o risco de perda de K (KAYSER; ISSELSTEIN, 2005) e extrai e posteriormente libera até 80 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O ao cafeeiro através da biomassa da forrageira, após a ceifa e deposição da mesma sob a copa da planta, onde concentra a maior parte das raízes de café (RAGASSI; PEDROSA; FAVARIN, 2013). Esses processos explicam o acúmulo K observado no consórcio café-forrageira.

3.3. Indicadores físicos de qualidade do solo

A ausência de cobertura vegetal na entrelinha por meio do uso de herbicidas ou controle mecânico com lavração da camada superficial do solo contribuiu para a compactação dos primeiros 0,1 m de profundidade. Nessa situação, a densidade do solo foi 13% maior (Tabela 4), corroborando resultado anterior (ALCÂNTARA; FERREIRA, 2000). A menor densidade da superfície do solo (0,1 m) na entrelinha do café-forrageira deve-se a grande quantidade de biomassa radicular (RAZUK, 2002). As raízes são efetivas na descompactação do solo (CARTER, 2002; NETO et al., 2015) e aumentam o teor de C (Tabela 4). Essa melhoria refletiu no aumento de 45% da condutividade hidráulica do solo saturado (Kfs) na entrelinha do café-braquiária, uma evidência do potencial da forrageira à conservação do solo e reposição hídrica (infiltração). Assim, o cafeeiro pode manter a transpiração por mais tempo, o que é benéfico à fotossíntese e a produtividade. O benefício não é só para o cafeeiro, mas também do sistema de produção pela diminuição do risco de erosão do solo por escoamento superficial.

A densidade dos primeiros 0,1 m de solo foi 13% menor sob a copa do café-forrageira. A realização da poda bianual em conjunto com o consórcio levam a uma tênue redução da massa específica (CERRI et al., 2017). A cada poda da parte aérea do café há morte de parte do sistema radicular, o que representa matéria orgânica incorporada de dois em dois anos, além das raízes da gramínea. A constante regeneração do sistema radicular por conta da poda possivelmente aumenta o volume de poros (YU et al., 2018) e de matéria orgânica do solo (POIRIER; ROUMET; MUNSON, 2018), atributos associados a menor densidade.

Curiosamente, a densidade do solo aumentou 8% na camada de 0,1 m a 0,3 m de profundidade sob o rodado do trator no consórcio (Tabela 4). É importante esclarecer que no sistema café-braquiária as operações mecanizadas são feitas com trator mais pesado. Portanto,

a maior carga sobre o solo (LEBERT; BURGER, 1989) associada ao trânsito mais frequente (BAKKER; DAVIS, 1995) são, provavelmente, as causas da compactação dessa zona do solo.

As curvas de avaliação do SMAF para densidade do solo (sigmóides do tipo “menor é melhor”) identificaram diferença significativa entre os sistemas de produção de café. As notas para densidade da entrelinha e sob a copa do café no café-braquiária reduziram de 0,95 e 0,99 para 0,6 e 0,95 no monocultivo de café (Tabela 5). No rodado do trator em subsuperfície, a nota do sistema café-braquiária (0,43) aumentou para 0,63 no monocultivo, por causa da menor compactação no monocultivo.

De modo geral no café-forrageira foi maior o teor de substâncias estabilizadoras como o teor de C e de glomalina. No entanto, os maiores valores para estabilidade de agregados (EA) ocorreram no monocultivo de café (Tabela 4). Isto pode ser explicado pela forte correlação entre o teor de argila e a estabilidade de agregados (LADO; BEN-HUR; SHAINBERG, 2004). O teor de argila variou entre os solos das áreas experimentais. No monocultivo de café o teor de argila (23% ou 230 g kg⁻¹) foi 15% superior ao teor de argila do solo da área café-braquiária (20% ou 200 g kg⁻¹) (Tabela 1). A agregação foi similar entre os dois sistemas de produção no rodado do trator em subsuperfície. Essa observação se deve, provavelmente, à aproximação das partículas do solo por causa do peso de máquina de maior porte no café-braquiária. Pode-se especular que a compactação, dentro de limite, contribui para a agregação das partículas do solo, uma vez que esse fenômeno ocorre pelo contato das partículas de solo (menor estado de energia no contato).

A curva do SMAF para estabilidade de agregados (sigmóides do tipo “maior é melhor”) não foi sensível o suficiente para identificar diferença entre os sistemas de produção de café (Tabela 5). Em todas as situações avaliadas, a agregação foi superior a 50%, valor a partir do qual atribui-se a nota máxima (1,0) para esse atributo (EA). Valor alto para EA é geralmente observado em solo muito intemperizado como os Latossolos da presente pesquisa, por causa do alto conteúdo de caulinita, óxidos de ferro e hidróxidos de alumínio, minerais estabilizadores dos agregados (AMÉZKETA, 1999).

A estabilidade de agregados é muito importante na avaliação da qualidade de solo (KARLEN et al., 2008). No entanto, esse indicador não foi sensível o suficiente para detectar diferenças entre os sistemas de produção de café, a exemplo do observado para diferentes usos

da terra (CHERUBIN et al., 2017). São necessárias mais pesquisas para elaborar novas curvas que se ajustem melhor às condições dos solos tropicais, os quais são agregados fortemente.

3.5. Índice da qualidade de solo (IQS) e contribuição dos atributos

Os valores do IQS e as notas dos atributos físico, químico e biológico estão apresentados na figura 5 (0,1 m) e na figura 6 (0,1 a 0,3 m). Os melhores IQS foram observados na camada superficial do solo nos dois sistemas de produção de café, corroborando dados de CHERUBIN et al. (2016), os quais avaliaram mata nativa, canavial e pastagem. Esse fato pode ser atribuído à grande quantidade de C depositada no solo pelas raízes do cafeeiro, resíduos da poda da planta (parte aérea e parte do sistema radicular), resíduos da forrageira (raízes e parte aérea) e de folhas e plantas daninhas no monocultivo de café. Essa deposição de C oxidável estimula a atividade biológica, bioquímica, a mineralização e a ciclagem de nutrientes dos resíduos, com reflexo na qualidade do solo cultivado.

Outro fator que contribuiu positivamente para o IQS da superfície do solo foi o maior teor de nutrientes, provenientes das correções, adubações e ciclagem do material vegetal. É importante frisar que a nota para profundidade superior a 0,15 m precisa ser interpretada criteriosamente, haja vista que os algoritmos do SMAF foram calibrados para a camada superficial do solo.

Nos dois sistemas de produção as melhores notas para IQS foram obtidas sob a copa do cafeeiro na camada superficial 0,1 m de solo, região onde concentra a maior parte do nutriente e do sistema radicular. No café-forrageira tropical, o solo exerceu suas funções a 89% do seu potencial sob a copa da planta, diferente do que ocorre na mesma posição no monocultivo de café, no qual o solo executou suas funções a 84% do seu potencial. Essa diferença pode ser atribuída, principalmente, à melhoria dos atributos físico e químico (Figura 5). O cafezal em consórcio, com poda lateral e decote a cada 2 anos, proporciona cerca de 20 toneladas de matéria seca por hectare na superfície do solo (GARCIA et al., 1986). Parte desse resíduo é de difícil degradação, ainda assim espera-se uma expressiva ciclagem de nutrientes na parte menos lignificada dessa biomassa. Essa biomassa mais a biomassa proveniente da forrageira (raízes e parte aérea) fornece muito C, com vantagem à retenção de água e nutrientes do solo.

É preciso esclarecer ainda que no sistema de produção café-braquiária a varrição ou a retirada dos resíduos debaixo da copa da planta e amontoa no centro da entrelinha para facilitar o recolhimento dos frutos do solo também é feita a cada dois anos, enquanto no monocultivo

de café é anual. Essa operação não é desejável para a qualidade do solo, porque os rastelos mecânicos pressionam o solo e retiram a cobertura vegetal, expõe o solo à radiação solar e ao impacto das chuvas tropicais, potencialmente erosivas. A manutenção dos resíduos sob a copa do cafeeiro por mais tempo, varrição menos frequente, pode ter contribuído para o melhor IQS dessa posição. Não houve diferença no IQS sob a copa nos dois sistemas de produção em subsuperfície (0,1 a 0,3 m), apesar de o solo no monocultivo apresentar atributos químicos ligeiramente superiores por conta da aplicação de calcário. Esse resultado era de certo modo esperado, uma vez que os benefícios da poda e dos resíduos vegetais se concentram na camada mais superficial do solo.

O IQS não variou sob o rodado do trator nos dois sistemas de produção na camada superficial do solo (0,1 m). A degradação das propriedades físicas e biológicas do solo pelo trânsito frequente de máquinas agrícolas levou a notas mais baixas nessa posição (Figura 5). Em profundidade, a melhor nota do IQS no rodado do trator no café-braquiária (0,67) em relação à mesma posição no monocultivo de café (0,62) pode ser atribuída aos nutrientes da ciclagem dos resíduos da poda do café da ceifa da braquiária. O uso de maquinário mais leve e o menor número de operações mecanizadas no monocultivo de café compactou menos a camada subsuperficial do solo, como evidencia a melhora sutil dos atributos físicos.

O sistema café-braquiária melhorou o IQS da camada superficial da entrelinha, o qual aumentou de 0,70 para 0,83 (Figura 5). O aumento de 13% na performance do solo foi a mais pronunciada na presente pesquisa. Na entrelinha do consórcio (0,1 m), as notas de todos os atributos físicos, químicos e biológicos foram superiores as notas da entrelinha no monocultivo de café (Figura 4). Uma evidência do amplo espectro de melhoria do solo proporcionada pela forrageira tropical. Também foi observada melhoria significativa do IQS da entrelinha em subsuperfície por causa, principalmente, da maior quantidade de nutrientes (adubo e ciclagem), especialmente pelo teor alto de P.

É interessante frisar que a qualidade do solo superficial (0,1 m) da entrelinha do sistema de monocultivo de café não difere do rodado do trator, a qual teve a pior nota nos dois sistemas de produção de café. Esse dado revela a magnitude dos malefícios para o cafezal sem plantas de cobertura na entrelinha. Quando a forrageira é cultivada com o café o IQS da entrelinha melhorou 12% em relação ao rodado do trator. Isso é muito relevante, pois a entrelinha pode representar até 40% da área de um cafezal.

No café-braquiária não houve diferença entre posições em subsuperfície, evidenciando que no consórcio a qualidade de solo foi semelhante àquela sob a copa da planta ($>$ IQS). Por sua vez, no monocultivo de café o IQS sob a copa foi superior à do rodado e da entrelinha em profundidade (0,1 a 0,3 m). Essa constatação indica que a forrageira tropical tem potencial para melhorar a qualidade do solo da entrelinha e sob o rodado do trator, geralmente prejudicado pelo trânsito de máquinas até na camada subsuperficial.

A qualidade de solo baseada na SMAF sugere que o sistema café-braquiária (forrageira cultivada na entrelinha) melhora significativamente a performance do solo em relação ao que se faz tradicionalmente - monocultivo de café. Portanto, adotar esse sistema conservacionista traz benefícios de várias naturezas e presta importantes serviços ecossistêmicos como: sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes, estruturação do solo, diminuição do risco de erosão, menor contaminação de rios e mananciais e abrigo para a biodiversidade presente no solo e no cafezal. Finalmente, o consórcio também favorece aspectos de ordem socioeconômica pela criação de condições favoráveis a produtividade do cafeeiro, por sua dependência da qualidade do solo (físico, químico e biológico).

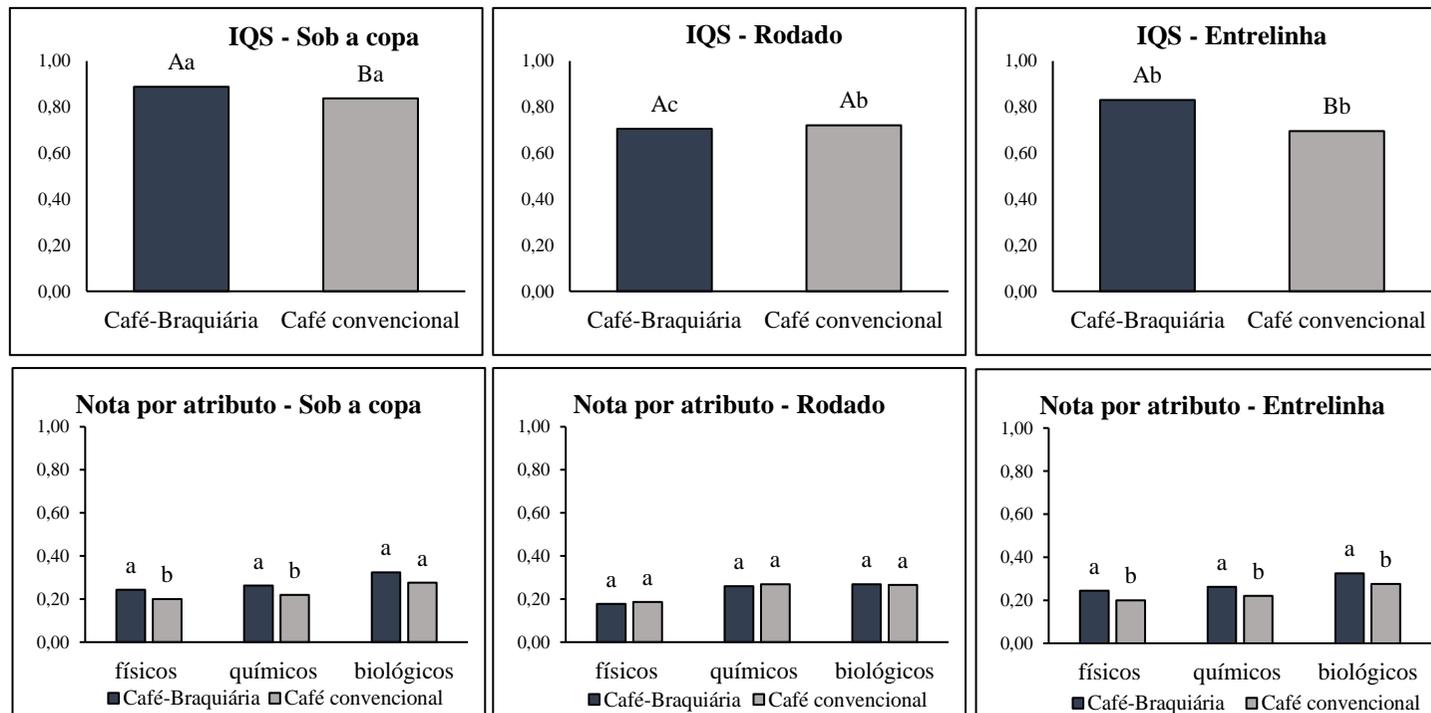


Figura 5. Índice de qualidade de solo (IQS) e nota por atributo avaliado na profundidade de 0,1 m. Médias de IQS na mesma posição seguidas de mesma letra maiúscula não diferem pelo teste Tukey ($p < 0.05$). Médias de IQS de posições diferentes dentro do mesmo sistema de produção seguida de mesma letra minúscula não diferem pelo teste Tukey ($p < 0.05$). Médias por atributos na mesma posição seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste Tukey ($p < 0.05$).

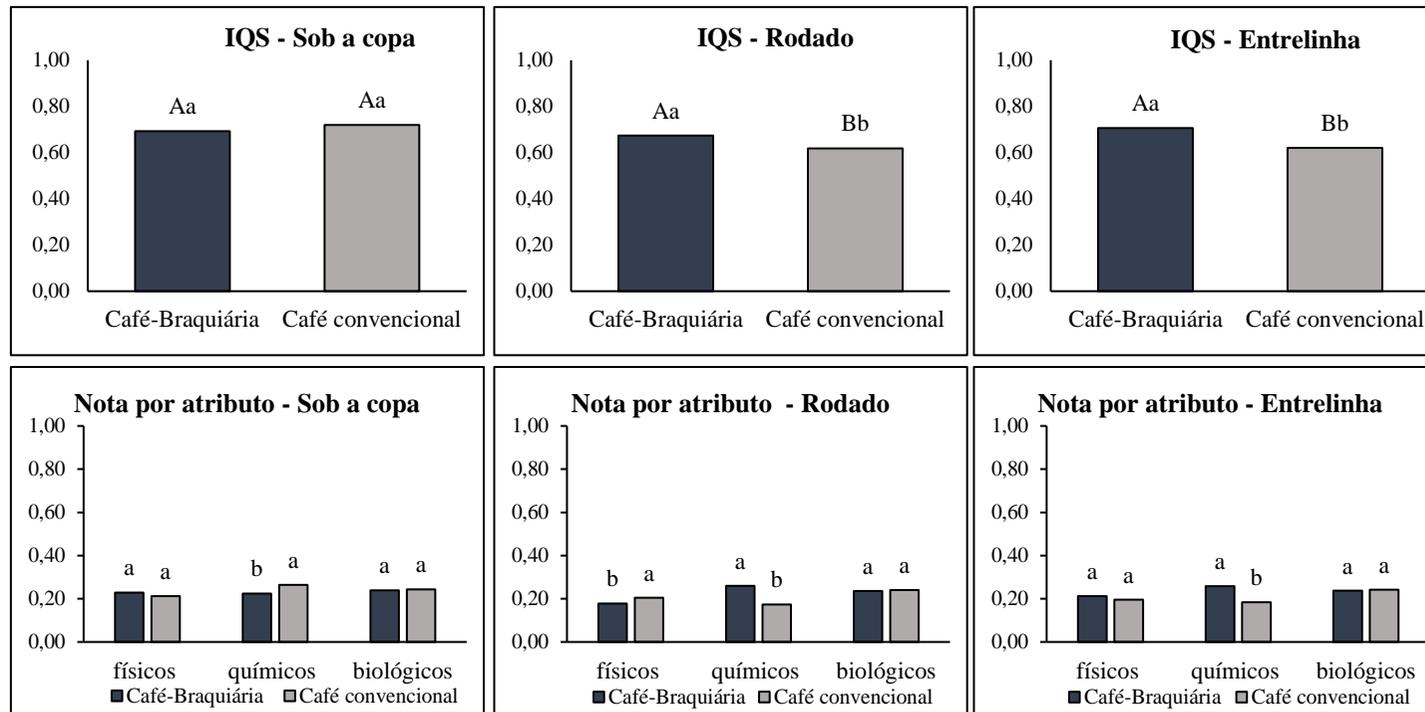


Figura 6. Índice de qualidade de solo (IQS) e nota por atributo avaliado na subsuperfície (0,1 a 0,3 m). Médias de IQS na mesma posição entre diferentes sistemas de produção seguidas de mesma letra maiúscula não diferem pelo teste Tukey ($p < 0.05$). Médias de IQS de posições diferentes dentro do mesmo sistema de produção seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste Tukey ($p < 0.05$). Médias por atributos na mesma posição seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste Tukey ($p < 0.05$).

4. CONCLUSÃO

Essa pesquisa é a primeira a aplicar o SMAF para avaliar a qualidade de solo em sistema de produção de café. Os resultados evidenciam variabilidade espacial significativa da qualidade do solo a curta distância no cafezal. O consórcio do cafeeiro com a braquiária melhora a qualidade do solo e parâmetros relacionados aos FMA principalmente na entrelinha, local ocupado pela gramínea. É preciso mais pesquisas para aprimorar as curvas de calibração do SMAF para as condições tropicais, onde está inserida a cafeicultura nacional.

Os resultados evidenciam que o sistema baseado no consórcio café-forrageira tropical melhora a performance da camada superficial do solo sob a copa do café (5%) e na entrelinha do renque de plantas (13%), aumento mais pronunciado obtido nesta pesquisa. Em profundidade o consórcio melhora a performance do solo sob o rodado do trator (5%) e na entrelinha do cafezal (9%).

Ainda, a presente pesquisa evidencia que a inserção dessa forrageira tropical em consórcio com o cafeeiro é uma estratégia efetiva para a recuperação da qualidade de solo. Políticas públicas de incentivo à adoção da mesma podem tornar a produção do café brasileiro uma referência para a comunidade internacional em relação a conservação e qualidade de solo.

REFERÊNCIAS

ACAR, Mert; ÇELİK, İsmail; GÜNAL, Hikmet; ACIR, Nurullah; BARUT BEREKET, Zeliha; BUDAK, Mesut. Tillage effects on soil organic carbon, microbial biomass carbon and beta-glucosidase enzyme activity in a typic haploxerert soil. *[S. l.]*, n. November, 2018.

ALCÂNTARA, E. N.; FERREIRA, M. M. Efeitos de métodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, *[S. l.]*, v. 24, n. 4, p. 711–721, 2000. DOI: 10.1590/S0100-06832000000400003. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832000000400003&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 18 abr. 2020.

ALMEIDA, Danilo S.; MENEZES-BLACKBURN, Daniel; ROCHA, Kassiano F.; DE SOUZA, Murilo; ZHANG, H.; HAYGARTH, P. M.; ROSOLEM, Ciro A. Can tropical grasses grown as cover crops improve soil phosphorus availability? **Soil Use and Management**, *[S. l.]*, v. 34, n. 3, p. 316–325, 2018. a. DOI: 10.1111/sum.12439.

ALMEIDA, Danilo S.; ROCHA, Kassiano F.; DE SOUZA, Muril; DELAI, Lucas B.; ROSOLEM, Ciro A. Soil phosphorus bioavailability and soybean grain yield impaired by Ruzigrass. **Agronomy Journal**, *[S. l.]*, v. 110, n. 2, p. 654–663, 2018. b. DOI: 10.2134/agronj2017.08.0451.

ALMEIDA, Danilo S.; ROSOLEM, Ciro A. Ruzigrass grown in rotation with soybean increases soil labile phosphorus. **Agronomy Journal**, *[S. l.]*, v. 108, n. 6, p. 2444–2452, 2016. DOI: 10.2134/agronj2015.0478.

AMÉZKETA, E. Soil aggregate stability: a Review. **Journal of Sustainable Agriculture**, *[S. l.]*, v. 14, n. 2–3, p. 83–151, 1999. DOI: 10.1300/J064v14n02_08. Disponível em: https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08.

ANDRADE, Rui S.; STONE, Luís F.; SILVEIRA, Pedro M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto Cover crops and physical quality of a Latosol under no-tillage. *[S. l.]*, n. 63, p. 411–418, 2009.

ANDREWS, Susan S.; KARLEN, Douglas L.; CAMBARDELLA, Cynthia A. The Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society of America Journal**, *[S. l.]*, v. 68, n. 6, p. 1945–1962, 2004. DOI: 10.2136/sssaj2004.1945. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>.

BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; ELRICK, D. A simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, *[S. l.]*, v. 68, n. 1, p. 66–73, 2004. DOI: 10.2136/sssaj2004.6600. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.6600>.

BAKKER, D. M.; DAVIS, R. J. Soil deformation observations in a vertisol under field traffic. **Soil Research**, *[S. l.]*, v. 33, n. 5, p. 817–832, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/SR9950817>.

BALOTA, Elcio Liborio; AULER, Pedro Antonio Martins. Soil microbial biomass under different management and tillage systems of permanent intercropped cover species in an orange orchard. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 35, n. 6, p. 1873–1883, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000600004. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832011000600004&lng=en&tlng=en. Acesso em: 18 abr. 2020.

BALOTA, Elcio Liborio; CHAVES, Julio César Dias. Microbial activity in soil cultivated with different summer legumes in coffee crop. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [S. l.], v. 54, n. 1, p. 35–44, 2010. DOI: 10.1590/S1516-89132011000100005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-89132011000100005&lng=en&tlng=en. Acesso em: 18 abr. 2020.

BARBOSA, Marisângela Viana et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and *Urochloa brizantha*: symbiosis and spore multiplication. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 49, 2019. DOI: 10.1590/1983-40632019v49s4530. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-40632019000100221&tlng=en. Acesso em: 18 abr. 2020.

BOROWIK, A.; WYSZKOWSKA, J. Soil moisture as a factor affecting the microbiological and biochemical activity of soil. **Plant, Soil and Environment**, [S. l.], v. 62, n. 6, p. 250–255, 2016. DOI: 10.17221/158/2016-PSE.

BRADFORD, Marion M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, [S. l.], v. 72, n. 1, p. 248–254, 1976. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003269776905273>.

BRADY, N. C.; WEIL, Raymond. **The Nature and Properties of Soil**. [s.l.: s.n.].

BÜNEMANN, Else K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 120, p. 105–125, 2018. DOI: 10.1016/J.SOILBIO.2018.01.030. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071718300294>. Acesso em: 18 abr. 2020.

CARNEIRO, Marco Aurélio Carbone; SIQUEIRA, José Oswaldo; CURI, Nilton; MOREIRA, Fátima Maria Souza. Efeitos da inoculação de fungos micorrízicos arbusculares e da aplicação de fósforo no estabelecimento de forrageiras em solo degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 34, n. 9, p. 1669–1677, 1999. DOI: 10.1590/s0100-204x1999000900018.

CARVALHO, Paulo César de Faccio; MORAES, Anibal De; PONTES, Laíse da Silveira; ANGHINONI, Ibanor; SULC, Reuben Mark; BATELLO, Caterina. Definições e terminologias para sistema integrado de produção agropecuária. **Revista Ciência Agronômica**, [S. l.], v. 45, n. 5SPE, p. 1040–1046, 2014.

CAVALCANTE, Douglas Monteiro; CASTRO, Marllon Fialho De; CHAVES, Maria Tatiane Leonardo; SILVA, Ivo Ribeiro Da; OLIVEIRA, Teógenes Senna De. Effects of rehabilitation strategies on soil aggregation, C and N distribution and carbon management index in coffee cultivation in mined soil. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 107, p. 105668, 2019. DOI: 10.1016/J.ECOLIND.2019.105668. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X19306612?via%3Dihub>. Acesso em: 19 abr. 2020.

CERRI, Carlos Clemente et al. Estoques de carbono e nitrogênio no solo devido a mudança do uso da terra em áreas de cultivo de café em Minas Gerais. **Coffee Science**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 30–41, 2017. DOI: 10.25186/cs.v12i1.1194. Disponível em: http://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/viewFile/1194/pdf_1194 PP - Lavras.

CHERUBIN, Maurício R.; KARLEN, Douglas L.; FRANCO, André L. C.; CERRI, Carlos E. P.; TORMENA, Cássio A.; CERRI, Carlos C. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 80, n. 1, p. 215–226, 2016. DOI: 10.2136/sssaj2015.09.0328. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>.

CHERUBIN, Maurício Roberto; TORMENA, Cássio Antônio; KARLEN, Douglas L. Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 41, n. 0, 2017. DOI: 10.1590/18069657rbc20160148. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832017000100503&lng=en&tlng=en. Acesso em: 19 abr. 2020.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira: café. **Monitoramento agrícola- Safra 2018**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 1–98, 2018. DOI: ISSN 2318-6852. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.

CORAZZA, Edemar Joaquim; BROSSARD, Michel; MURAOKAI, Takashi; COELHO FILHO, Maurício Antonio. Spatial variability of soil phosphorus of a low productivity *Brachiaria brizantha* pasture. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 60, n. 3, p. 559–564, 2003. DOI: 10.1590/S0103-90162003000300022. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162003000300022&lng=en&tlng=en. Acesso em: 18 abr. 2020.

COSTA, Newton de Lucena; TOWNSEND, Claudio Ramalho; MAGALHÃES, João Avelar; FOGAÇA, Fabíola Helena dos Santos; SANTOS, Francisco José de Seixas. Dinâmica do acúmulo de forragem e morfogênese de *Urochloa brizantha* cv. Xaraés sob períodos de descanso. **Pubvet**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. 513–518, 2017. DOI: 10.22256/pubvet.v11n5.513-518. Disponível em: <http://www.pubvet.com.br/artigo/3862/dinamica-do-acuacutemulo-de-forragem-e-morfogecircnese-de-urochloa-brizantha-cv-xaraeacutes-sob-periacuteodos-de-descanso>.

CREME, Alexandra; CHABBI, Abad; GASTAL, François; RUMPEL, Cornelia. Biogeochemical nature of grassland soil organic matter under plant communities with two nitrogen sources. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 415, n. 1–2, p. 189–201, 2017. DOI: 10.1007/s11104-016-3158-9.

CRUZ, Simério Carlos Silva; PEREIRA, Francisco Rafael da Silva; BICUDO, Silvio José; DE ALBUQUERQUE, Abel Washington; SANTOS, José Roberto; MACHADO, Carla Gomes. Nutrição do milho e da *Brachiaria decumbens* cultivados em consórcio em diferentes preparos do solo. **Acta Scientiarum - Agronomy**, [S. l.], v. 30, n. 5 SUPPL, p. 733–739, 2008. DOI: 10.4025/actasciagron.v30i5.5975.

DE SOUZA, Laís Teles. **Nutrient demand for vegetation and fruiting of *Coffea arabica***. 2018. [S. l.], 2018.

DEFRENET, Elsa et al. Part of a special issue on root biology: Root biomass, turnover and net primary productivity of a coffee agroforestry system in Costa Rica: Effects of soil depth, shade trees, distance to row and coffee age. **Annals of Botany**, [S. l.], v. 118, n. 4, p. 833–851, 2016. DOI: 10.1093/aob/mcw153.

DIAS, Danyllo Santos. **Contribuição relativa do K de zonas do solo para o conteúdo na soja e plantas em sucessão**. 2018. [S. l.], 2018.

ERICKSON, Louis C. Growth of Tomato Roots as Influenced by Oxygen in the Nutrient Solution. **American Journal of Botany**, [S. l.], v. 33, n. 6, p. 551–561, 1946. DOI: 10.2307/2437590. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2437590>.

FAVARIN, José Laércio; SOUZA, Laís Teles De; MOSCARDINI, Davi B.; BAPTISTELLA, João Leonardo Corte. Caminhos para aumentar a produtividade do café arábica. **Infomações Agrônomicas**, [S. l.], n. 164, p. 13–18, 2018.

FEENEY, Debbie S.; CRAWFORD, John W.; DANIELL, Tim; HALLETT, Paul D.; NUNAN, Naoise; RITZ, Karl; RIVERS, Mark; YOUNG, Iain M. Three-dimensional Microorganization of the Soil–Root–Microbe System. **Microbial Ecology**, [S. l.], v. 52, n. 1, p. 151–158, 2006. DOI: 10.1007/s00248-006-9062-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00248-006-9062-8>.

GARCIA, A. W. R.; CORRÊA, J. B.; GONÇALVES, S.; SANTANA, J.; ROMERO, J. B.; MALAVOLTA, M. L.; MALAVOLTA, E.; CARVALHO, J. G. Fitomassa e conteúdo de macro e micronutrientes no material podado do cafeeiro. In: 13 CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS 1986, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 158–164.

GARCIA, R. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, [S. l.], v. 28, n. 4, p. 579–585, 2008. DOI: 10.1016/j.eja.2008.01.002.

GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. **Transactions of the British Mycological Society**, [S. l.], v. 46, n. 2, p. 235–244, 1963. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007153663800790>.

GERLAND, Patrick et al. World population stabilization unlikely this century. **Science**, [S. l.], v. 346, n. 6206, p. 234 LP – 237, 2014. DOI: 10.1126/science.1257469. Disponível em: <http://science.sciencemag.org/content/346/6206/234.abstract>.

GIANINAZZI, Silvio; GOLLOTTE, Armelle; BINET, Marie-Noëlle; VAN TUINEN, Diederik; REDECKER, Dirk; WIPF, Daniel. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. **Mycorrhiza**, [S. l.], v. 20, n. 8, p. 519–530, 2010. DOI: 10.1007/s00572-010-0333-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00572-010-0333-3>.

GICHANGI, Elias M.; NJARUI, Donald M. ...; GATHERU, Mwangi J.; MAGIROI, Keziah W. ...; GHIMIRE, Sita R. Effects of Brachiaria grasses on soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in soils of the semi arid tropics of Kenya. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, [S. l.], v. 19, n. 2, 2016. Disponível em: <http://www.revista.cba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2205>. Acesso em: 18 abr. 2020.

GOSS, Michael J.; KAY, Beverley D. **Soil Aggregation Roots and Soil Management: Interactions between Roots and the Soil**: Agronomy Monographs., 2005. DOI: doi:10.2134/agronmonogr48.c9. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr48.c9>.

GUL, Shamin; YANNI, Sandra F.; WHALEN, Joann K. Lignin controls on soil ecosystem services: implications for biotechnological advances in biofuel crops. *In: American Journal of Agricultural Economics*. [s.l: s.n.]. v. 88p. 1160–1166.

INGLEBY, K.; WILSON, J.; MUNRO, R. C.; CAVERS, S. Mycorrhizas in agroforestry: spread and sharing of arbuscular mycorrhizal fungi between trees and crops: complementary use of molecular and microscopic approaches. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 294, n. 1, p. 125–136, 2007. DOI: 10.1007/s11104-007-9239-z. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9239-z>.

JENKINSON, D. S.; RAYNER, J. H. THE TURNOVER OF SOIL ORGANIC MATTER IN SOME OF THE ROTHAMSTED CLASSICAL EXPERIMENTS. **Soil Science**, [S. l.], v. 123, n. 5, 1977. Disponível em: https://journals.lww.com/soilsci/Fulltext/1977/05000/THE_TURNOVER_OF_SOIL_ORGANIC_MATTER_IN_SOME_OF_THE.5.aspx.

KARLEN, D. L.; WOLLENHAUPT, N. C.; ERBACH, D. C.; BERRY, E. C.; SWAN, J. B.; EASH, N. S.; JORDAHL, J. L. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 31, n. 2–3, p. 149–167, 1994. DOI: 10.1016/0167-1987(94)90077-9. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167198794900779>. Acesso em: 18 abr. 2020.

KARLEN, Douglas L.; ANDREWS, Susan S.; WIENHOLD, Brian J.; ZOBECK, Ted M. Soil quality assessment: past, present and future. **J. Integr. Biosci.**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 3–14, 2008.

KAYSER, M.; ISSELSTEIN, J. Potassium cycling and losses in grassland systems: a review. **Grass and Forage Science**, [S. l.], v. 60, n. 3, p. 213–224, 2005. DOI: 10.1111/j.1365-2494.2005.00478.x. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2005.00478.x>.

KHAKPOUR, Olfat; KHARA, Jalil. Spore density and root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi in some species in the northwest of Iran. **International Research Journal of Applied and Basic Sciences**, [S. l.], v. 3, n. 5, p. 977–982, 2012.

KUZYAKOV, Yakov; DOMANSKI, Grzegorz. Carbon input by plants into the soil. Review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [S. l.], v. 163, n. 4, p. 421–431, 2000. DOI: 10.1002/1522-2624(200008)163:4<421::AID-JPLN421>3.0.CO;2-R. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200008\)163:4%3C421::AID-JPLN421%3E3.0.CO](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200008)163:4%3C421::AID-JPLN421%3E3.0.CO).

LADO, M.; BEN-HUR, M.; SHAINBERG, I. Soil Wetting and Texture Effects on Aggregate Stability, Seal Formation, and Erosion. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 68, n. 6, p. 1992–1999, 2004. DOI: 10.2136/sssaj2004.1992. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1992>.

LAMMEL, D. R.; AZEVEDO, L. C. B.; PAULA, A. M.; ARMAS, R. D.; BARETTA, D.; CARDOSO, E. J. B. N. Microbiological and faunal soil attributes of coffee cultivation under different management systems in Brazil. **Brazilian journal of biology = Revista brasleira de biologia**, [S. l.], v. 75, n. 4, p. 894–905, 2015. DOI: 10.1590/1519-6984.02414.

LEBERT, M.; BURGER, N. Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. In: LARSON W.E.; G.R., Blake; R.R., Allmaras; W.B., Voorhees; S.C, Gupta (org.). **Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils**. [s.l: s.n.]. v. 58p. 99–104. Disponível em: <https://www.unhcr.org/publications/manuals/4d9352319/unhcr-protection-training-manual-european-border-entry-officials-2-legal.html?query=excom> 1989.

LEHMANN, Anika; BARTO, E. Kathryn; POWELL, Jeff R.; RILLIG, Matthias C. Mycorrhizal responsiveness trends in annual crop plants and their wild relatives—a meta-analysis on studies from 1981 to 2010. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 355, n. 1, p. 231–250, 2012. DOI: 10.1007/s11104-011-1095-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1095-1>.

LISBOA, Izaias P. et al. Applying Soil Management Assessment Framework (SMAF) on short-term sugarcane straw removal in Brazil. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 129, p. 175–184, 2019. DOI: 10.1016/J.INDCROP.2018.12.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669018310562>. Acesso em: 18 abr. 2020.

LOPES, André Alves de Castro; DE SOUSA, Djalma Martinhão Gomes; CHAER, Guilherme Montandon; REIS JUNIOR, Fábio Bueno Dos; GOEDERT, Wenceslau J.; MENDES, Iêda de Carvalho. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 77, n. 2, p. 461–472, 2013. DOI: 10.2136/sssaj2012.0191. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191>.

LUNA, Lourdes; MIRALLES, Isabel; ANDRENELLI, Maria Costanza; GISPERT, Maria; PELLEGRINI, Sergio; VIGNOZZI, Nadia; SOLÉ-BENET, Albert. Restoration techniques affect soil organic carbon, glomalin and aggregate stability in degraded soils of a semiarid Mediterranean region. **CATENA**, [S. l.], v. 143, p. 256–264, 2016. DOI: 10.1016/J.CATENA.2016.04.013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816216301503>. Acesso em: 18 abr. 2020.

LUZ, Felipe Bonini Da; DA SILVA, Vanderlei Rodrigues; KOCHER MALLMANN, Fábio Joel; BONINI PIRES, Carlos Augusto; DEBIASI, Henrique; FRANCHINI, Julio Cezar; CHERUBIN, Maurício Roberto. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S. l.], v. 281, p. 100–110, 2019. DOI: 10.1016/J.AGEE.2019.05.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880919301422>. Acesso em: 18 abr. 2020.

MAGALHÃES, Roberto Toledo De; OLIVEIRA, Itamar Pereira De; KLIEMANN, Huberto José. Relações da produção de massa seca e as quantidades de nutrientes exportadas por *Brachiaria brizantha* em solos sob o manejo pelo sistema “Barreirão”. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 13–20, 2002.

MARTIN, Chris A.; WHITCOMB, Sean A.; STUTZ, Jean C. Effects of Frequent Shearing on Root Growth and Mycorrhizal Colonization of Two Landscape Shrubs. **HortScience horts**, Washington, DC, v. 45, n. 10, p. 1573–1576, 2010. DOI: 10.21273/HORTSCI.45.10.1573. Disponível em: <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/45/10/article-p1573.xml>.

MELLONI, Rogério; SILVE, Emilienne Margueritte; ALVARENGA, Maria Inês Nogueira; MELLONI, Eliane Guimarães Pereira; ALCÂNTARA, Elifas Nunes De. Impact of weed control on amf propagules and mycorrhization of coffee trees. **Coffee Science**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 207–215, 2017.

MERLIN, Alexandre; HE, Zhenli Li; ROSOLEM, Ciro Antonio. Ruzigrass affecting soil-phosphorus availability. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 48, n. 12, p. 1583–1588, 2013. DOI: 10.1590/S0100-204X2013001200007.

MORAES, A.; FAVARETTO, N.; LANG, C. R.; CARVALHO, P. C. F. Conservação do solo e da água em pastagens. *In*: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM 2004, Viçosa. **Anais [...]**. Viçosa: UFV, 2004. p. 110–158.

NASCIMENTO, Rodrigo Limp; MIRANDA, Luiz Almeida. Exploração de potássio no Brasil 2015. p. 23.

NAUTIYAL, Prachi; RAJPUT, Richa; PANDEY, Deepshikha; ARUNACHALAM, Kusum; ARUNACHALAM, Ayyanadar. Role of glomalin in soil carbon storage and its variation across land uses in temperate Himalayan regime. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [S. l.], v. 21, p. 101311, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101311>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878818119304955>.

NETO, José Flávio; SEVERIANO, Eduardo da Costa; COSTA, Kátia Aparecida de Pinho; GUIMARÃES JUNNYOR, Wellington Silva; GONÇALVES, Wainer Gomes; ANDRADE, Renata. Descompactação biológica do solo por capins do gênero *Brachiaria* em Integração Agricultura-Pecuária. **Acta Scientiarum - Agronomy**, [S. l.], v. 37, n. 3, p. 375–383, 2015. DOI: 10.4025/actasciagron.v37i3.19392.

NORTCLIFF, Stephen. Standardisation of soil quality attributes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S. l.], v. 88, n. 2, p. 161–168, 2002. DOI: 10.1016/S0167-8809(01)00253-5. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880901002535?via%3Dihub>. Acesso em: 18 abr. 2020.

NUNES, A. S.; TIMOSSI, P. C.; PAVANI, M. C. M. D.; ALVES, P. L. C. A. **Épocas de manejo químico de *Brachiaria decumbens* antecedendo o plantio direto de soja Planta Daninha** sciELO , , 2009.

DE OLIVEIRA, S. M., DIAS, D. S., DE BORJA REIS, A. F., CRUZ, S. C. S., and FAVARIN, J. L. (2020). Vertical stratification of K uptake for soybean-based crop rotation. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 117, 185–197. doi: 10.1007/s10705-020-10059-9

PANG, Jiayin; BANSAL, Ruchi; ZHAO, Hongxia; BOHUON, Emilien; LAMBERS, Hans; RYAN, Megan H.; RANATHUNGE, Kosala; SIDDIQUE, Kadambot H. M. The carboxylate-releasing phosphorus-mobilizing strategy can be proxied by foliar manganese concentration in a large set of chickpea germplasm under low phosphorus supply. **New Phytologist**, [S. l.], n. 2007, 2018. DOI: 10.1111/nph.15200. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/nph.15200>.

PEDROSA, Adriene Woods. **Eficiência da adubação nitrogenada no consórcio entre cafeeiro e *Brachiaria brizantha***. 2013. [S. l.], 2013.

PLENCHETTE, C.; FORTIN, J. A.; FURLAN, V. Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility - I. Mycorrhizal dependency under field conditions. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 70, n. 2, p. 199–209, 1983. DOI: 10.1007/BF02374780.

POIRIER, Vincent; ROUMET, Catherine; MUNSON, Alison D. The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 120, n. August 2017, p. 246–259, 2018. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.02.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.016>.

POPIN, Gustavo V; SANTOS, Arthur K. B.; OLIVEIRA, Thiago de P.; DE CAMARGO, Plínio B.; CERRI, Carlos E. P.; SIQUEIRA-NETO, Marcos. Sugarcane straw management for bioenergy: effects of global warming on greenhouse gas emissions and soil carbon storage. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1007/s11027-019-09880-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09880-7>.

QUAGGIO, José Antonio; THOMAZIELLO, Roberto Antonio; CANTARELLA, Heitor; VAN RAIJ, Bernardo. Recomendações para calagem e adubação de café. In: 1º SIMPÓSIO SOBRE OS AVANÇOS NA NUTRIÇÃO DE CITROS E CAFÉ 2018, **Anais [...]**. [s.l: s.n.]

RAGASSI, Carlos Francisco; PEDROSA, Adriene Woods; FAVARIN, José Laércio. Aspectos positivos e riscos no consórcio cafeeiro e braquiária. **Revista Visão Agrícola**, [S. l.], v. 12, p. 29–32, 2013.

RANDALL, Peter J.; HAYES, Julie E.; HOCKING, Peter J.; RICHARDSON, Alan E. Root Exudates in Phosphorus Acquisition by Plants. **Plant Nutrient Acquisition**, [S. l.], p. 71–100, 2001. DOI: 10.1007/978-4-431-66902-9_3.

RAZUK, Renata Barbosa. **Avaliação do sistema radicular de acessos de *Brachiaria brizantha* e suas relações com atributos químicos e físicos do solo.** 2002. [S. l.], 2002.

RILLIG, Matthias C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. **Canadian Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 84, n. 4, p. 355–363, 2004. DOI: 10.4141/S04-003. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/S04-003>.

RIZZO, Luiz Toledo Barros; CASTRO, Selma Simões de P. P. São Paulo. **Indicadores da resiliência do latossolo vermelho escuro cultivado com citros e eucalipto em Itapetininga-SP: recuperação de um solo degradado pela compactação**, 2000.

ROCHA, Omar Cruz; GUERRA, Antonio Fernando; RAMOS, Maria Lucrecia Gerosa; VEIGA, Adriano Delly; BARTHOLLO, Gabriel Ferreira; RODRIGUES, Gustavo Costa; AMÁBILE, Renato Fernando; SILVA, Thiago Paulo Da. Relação solo-água em função da brachiaria nas entrelinhas do café no cerrado. **IX Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil**, [S. l.], v. d, 2015.

ROMERO, João Carlos. Café de montanha perfaz cerca de 40% da produção brasileira. **Revista Visão Agrícola**, [S. l.], v. 12, p. 90–91, 2013.

ROSIER, Carl L.; PIOTROWSKI, Jeffrey S.; HOYE, Andrew T.; RILLIG, Matthias C. Intraradical protein and glomalin as a tool for quantifying arbuscular mycorrhizal root colonization. **Pedobiologia**, [S. l.], v. 52, n. 1, p. 41–50, 2008. DOI: 10.1016/J.PEDOBI.2008.02.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0031405608000085>. Acesso em: 18 abr. 2020.

ROSIM, Daniel Coelho; DE MARIA, Isabella Clerici; SILVA, Renato Lemos e; SILVA, Álvaro Pires Da. Compactação de um latossolo vermelho distroférico com diferentes quantidades e manejos de palha em superfície. **Bragantia**, [S. l.], v. 71, n. 4, p. 502–508, 2013. DOI: 10.1590/S0006-87052013005000003. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052012000400008&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 18 abr. 2020.

ROSOLEM, Ciro Antonio; MERLIN, Alexandre; BULL, Júlio Cesar Longo. Soil phosphorus dynamics as affected by Congo grass and P fertilizer. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 71, n. 4, p. 309–315, 2014. DOI: 10.1590/0103-9016-2013-0345.

SAIF, S. R. THE INFLUENCE OF SOIL AERATION ON THE EFFICIENCY OF VESICULAR-ARBUSCULAR MYCORRHIZAE I. **New Phytologist**, [S. l.], v. 88, n. 4, p. 649–659, 1981. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1981.tb01741.x. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1981.tb01741.x>.

SALES, Luciane Reis et al. Arbuscular mycorrhizal fungi on the biomass and nutrition of *Urochloa decumbens* at different soil densities. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 53, n. 8, p. 943–951, 2018. DOI: 10.1590/s0100-204x2018000800009. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X20180008000943&lng=en&tlng=en. Acesso em: 18 abr. 2020.

SANCHES, A. C. Manejo para a produção sustentável de citros. In: SIMPÓSIO SOBRE FISIOLOGIA, NUTRIÇÃO, ADUBAÇÃO E MANEJO PARA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE CITROS 2000, Piracicaba - SP. **Anais [...]**. Piracicaba - SP

SEGNINI, Aline et al. Soil carbon stock and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 76, n. 1, p. 33–40, 2019. DOI: 10.1590/1678-992x-2017-0131. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162019000100033&lng=en&tlng=en. Acesso em: 18 abr. 2020.

SERAFIM, Milson Evaldo. Sistema conservacionista e de manejo intensivo na melhoria de atributos do solo para a cultura do cafeeiro. [S. l.], p. 120, 2011. Disponível em: http://bdtd.ufla.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3412.

SILVA, Bruno Montoani; OLIVEIRA, Geraldo César; SERAFIM, Milson Evaldo; SILVA, Érika Andressa; FERREIRA, Mozart Martins; NORTON, Lloyd Darrell; CURI, Nilton. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 154, p. 103–113, 2015. DOI: 10.1016/J.STILL.2015.06.013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198715001300?via%3Dihub>. Acesso em: 18 abr. 2020.

SIMON, Cátia Aparecida; CORDEIRO, Meire Silvestrini; LIMA, Sebastião Ferreira De; BRASIL, Marivaine Da Silva; DE DAVID, Carlos Henrique; SECCO, Vinícius Andrade. Microbial activity in a soil with cover crops in succession with maize in a no-tillage system. **BRAZILIAN JOURNAL OF AGRICULTURE - Revista de Agricultura**, [S. l.], v. 92, n. 2, p. 198, 2017. DOI: 10.37856/bja.v92i2.3210.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil Structure and Soil Organic Matter II. A Normalized Stability Index and the Effect of Mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 64, n. 3, p. 1042–1049, 2000. DOI: 10.2136/sssaj2000.6431042x. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431042x>.

SMITH, S. E.; READ, David J. **Mycorrhizal symbiosis**. [s.l.] : Academic Press, 2008.

STOTT, D. E.; ANDREWS, S. S.; LIEBIG, M. A.; WIENHOLD, B. J.; KARLEN, D. L. Evaluation of β -Glucosidase Activity as a Soil Quality Indicator for the Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 74, n. 1, p. 107–119, 2010. DOI: 10.2136/sssaj2009.0029. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0029>.

STUMPF, Lizete; PAULETTO, Eloy Antonio; PINTO, Luiz Fernando Spinelli. Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 161, p. 71–78, 2016. DOI: 10.1016/J.STILL.2016.03.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198716300290?via%3Dihub>. Acesso em: 10 jan. 2020.

TABATABAI, M. A. **Soil Enzymes Methods of Soil Analysis**: Agronomy Monographs., 1983. DOI: doi:10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c43. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c43>.

TABATABAI, M. A. **Soil Enzymes Methods of Soil Analysis**: SSSA Book Series., 1994. DOI: doi:10.2136/sssabookser5.2.c37. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37>.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>.

TRUDGILL, Stephen Thomas. Soil and vegetation systems. **Soil and Vegetation Systems**, [S. l.], 1977.

TYURIN, I. V. Soil organic matter and its role in fertility. **M.: Nauka**, [S. l.], v. 320, 1965.

VAN RAIJ, Bernardo. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. [s.l.] : IAC, 2001.

VAN RAIJ, Bernardo; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Campinas, IAC. 285p.(IAC, Boletim técnico, 100), 1997.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987. DOI: 10.1016/0038-0717(87)90052-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038071787900526>. Acesso em: 18 abr. 2020.

VEZZANI, Fabiane Machado; MIELNICZUK, João. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 743–755, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000400001. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832009000400001&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 18 abr. 2020.

WALKLEY, Aldous; BLACK, I. Armstrong. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil science**, [S. l.], v. 37, n. 1, p. 29–38, 1934.

WANG, J. J.; LI, X. Y.; ZHU, A. N.; ZHANG, X. K.; ZHANG, H. W.; LIANG, W. J. Effects of tillage and residue management on soil microbial communities in north china. **Plant, Soil and Environment**, [S. l.], v. 58, n. 1, p. 28–33, 2012. DOI: 10.17221/416/2011-pse.

WANG, Wenjie; ZHONG, Zhaoliang; WANG, Qiong; WANG, Humei; FU, Yujie; HE, Xingyuan. Glomalin contributed more to carbon, nutrients in deeper soils, and differently associated with climates and soil properties in vertical profiles. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 13003, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-12731-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12731-7>.

WIENHOLD, B. J.; KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S.; STOTT, D. E. Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). **Renewable Agriculture and Food Systems**, [S. l.], v. 24, n. 4, p. 260–266, 2009. DOI: 10.1017/S1742170509990093.

WRIGHT, S. F.; STARR, J. L.; PALTINEANU, I. C. Changes in Aggregate Stability and Concentration of Glomalin during Tillage Management Transition. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 63, n. 6, p. 1825–1829, 1999. DOI: 10.2136/sssaj1999.6361825x. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361825x>.

WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 198, n. 1, p. 97–107, 1998. DOI: 10.1023/A:1004347701584. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1004347701584>.

YU, Bingqin; XIE, Changkun; CAI, Shize; CHEN, Yan; LV, Yongpeng; MO, Zulan; LIU, Tianlei; YANG, Zhiwen. Effects of tree root density on soil total porosity and non-capillary porosity using a ground-penetrating Tree Radar Unit in Shanghai, China. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 10, n. 12, 2018. DOI: 10.3390/su10124640.

ZALLER, Johann G.; HEIGL, Florian; RUESS, Liliane; GRABMAIER, Andrea. Glyphosate herbicide affects belowground interactions between earthworms and symbiotic mycorrhizal fungi in a model ecosystem. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 5634, 2014. DOI: 10.1038/srep05634. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep05634>.