Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Agregação de solo em pastagens sob diferentes índices de qualidade e sua influência na infiltração de água

Igor Crabi Freitas Eliane Guimarães Pereira Melloni Rogério Melloni

Engenheiro ambiental e mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, pela Universidade Federal de Itajubá. igorcrabi@hotmail.com Engenheira agrônoma, mestre e doutora em Agronomia, e docente da Universidade Federal de Itajubá, no Instituto de Recursos Naturais. eliane.melloni@gmail.com Engenheiro agrônomo, mestre e doutor em Agronomia, e docente da Universidade Federal de Itajubá, no Instituto de Recursos Naturais. rogerio.melloni@gmail.com

Artigo recebido em 01/06/2020 e aceito em 14/06/2021

RESUMO

No Brasil predomina a pecuária extensiva, muitas vezes em solos de baixo potencial agrícola e passíveis de degradação, principalmente quanto aos aspectos físicos e de infiltração de água. Assim, este trabalho visa analisar o impacto causado pelo processo de sucessão em solo de diferentes áreas de pastagem, com ênfase à sua qualidade física e características físico-hídricas, relacionando-as com o papel desempenhado pelos serviços ecossistêmicos naturalmente observados. Para isso, foram selecionadas 4 áreas de pastagem, em ARGISSOLO VERMELHO distrófico, em diferentes níveis de sucessão natural: pastagem em boas condições visuais (PB); pastagem sob capoeira baixa (CB); pastagem sob capoeira alta (CA); pastagem sob capoeirão (CAO), na microbacia do Ribeirão José Pereira (Itajubá - MG). Dos atributos físicos foram determinados: densidade do solo, porosidade, tamanho e estabilidade de agregados, assim como sua classificação quanto à via de formação. A análise de infiltração foi feita com auxílio de permeâmetro de Guelph e a de resistência à penetração mecânica do solo com penetrômetro de impacto. Para análise dos resultados, foi empregada a análise de variância e teste Tukey a 5%, correlação de Pearson e estatística multivariada de componentes principais. A sucessão natural em pastagens abandonadas melhora a qualidade física do solo, com produção de agregados maiores, mais estáveis e de formação biogênica ao longo do tempo. As áreas puderam ser classificadas em relação à sua qualidade, na seguinte ordem crescente: PB < CB < CA < CAO, a qual respeitou a ação da sucessão natural, por conseguinte, dos serviços ecossistêmicos. Palavras-chave: sucessão natural, qualidade do solo, serviços ecossistêmicos, infiltração de água.

Soil aggregation in pastures under different quality indexes and their influence on water infiltration

ABSTRACT

In Brazil, extensive livestock farming predominates, often in soils with low agricultural potential and susceptible to degradation, mainly in terms of physical aspects and water infiltration. Thus, this work aims to analyze the impact caused by the succession process in soil of different pasture areas, with an emphasis on their physical quality and physical-hydric characteristics, relating them to the role played by naturally observed ecosystem services. For this, 4 grazing areas were selected, in Red Ultisol, under different levels of natural succession: grazing in good visual conditions (PB); pasture under low scrub (CB); pasture under high scrub (CA); pasture under "capoeirão" (CAO), in the Ribeirão José Pereira microbasin (Itajubá - MG). The physical attributes were determined: soil density, porosity, size and stability of aggregates, as well as their classification as to the formation path. The infiltration analysis was carried out with the aid of a Guelph permea meter and the resistance to mechanical penetration of the soil with an impact penetrometer. For analysis of the results, analysis of variance and Tukey test at 5%, Pearson's correlation and multivariate statistics of main components were used. The natural succession in abandoned pastures improves the physical quality of the soil, with the production of larger, more stable aggregates and of biogenic formation over time. The areas could be classified according to their quality, in the following increasing order: PB < CB < CA < CAO, which respected the action of natural succession and, therefore, of ecosystem services.

Keywords: natural succession, soil quality, ecosystem services, infiltration of water.

Introdução

O solo é formado por complexas misturas de fatores climáticos, edáficos e topográficos, bem como interações bióticas, que resultam em padrões biogeográficos únicos (Crowther et al., 2019), sendo responsável pelos mais variados processos relacionados à vida. No entanto, é considerado um recurso não renovável em escala humana e, com isto, requer atenção. A FAO (2015), no livro “Estado da Arte do Recurso Solo no Mundo”, que traz uma perspectiva global sobre as condições atuais do solo, destaca que, apesar do papel fundamental na prestação de serviços ecossistêmicos, como produção de água e sequestro de carbono, cerca de 30% dos solos no mundo estão sob algum nível de degradação, o que pode causar ameaças à sua contribuição para a produção desses serviços.

Assim, se faz necessária a diversificação de ambientes naturais que disponibilizem funções ecossistêmicas desejáveis, a fim de diminuir os efeitos negativos do processo de antropização, e elevar a quantidade e melhorar a qualidade de bens e serviços ecossistêmicos (Ferreira et al., 2019). Segundo Altmann (2020), a percepção dos conceitos de serviços ecossistêmicos, bem como sua adoção, teriam o papel de ressignificar as medidas agroambientais e climáticas, como um instrumento de gestão de territórios conectado aos demais instrumentos de gestão da biodiversidade e dos ecossistemas.

A pecuária, em especial aquela sob manejo extensivo, muito comum no mundo e, em especial, no Brasil, acarreta grandes danos ao solo, principalmente ligados à agregação. Entre estes, Silva et al. (2015) destacam que áreas agrícolas e sob pastagem favorecem a compactação do solo, em relação a solos de florestas, com explicação relacionada à perda da qualidade física do solo, como agregação das partículas e redução da densidade do solo, proporcionada pela redução da matéria orgânica, atividade microbiana e de raízes, que auxiliam na formação de bioporos (Garcia e Romeiro, 2019). Nesse sentido, segundo Furquim et al. (2020), pastagens degradadas apresentam maiores valores de resistência do solo à penetração e menor velocidade de infiltração, se comparadas a sistemas onde há uma maior diversidade de espécies e a não presença de animais.

A pecuária brasileira, segundo Dias Filho (2016), teve uma transição de pastagens nativas para pastagens plantadas a partir do século 20. No entanto, pouca diferença houve em relação ao manejo utilizado, ou seja, ainda prevalece um

baixo investimento em insumos e tecnologias. E isto ocorre porque a agropecuária extensiva, embora com baixo rendimento, permite este menor investimento em estrutura em relação às atividades agrícolas. Tal fato, faz com que no Brasil, áreas de baixo potencial agrícola sejam transformadas em áreas de pastagens.

Desta forma, o Brasil, como um país de grandes proporções, se torna ideal para a pecuária extensiva, mesmo com sua produtividade reduzida, ao apresentar áreas de expansão. Assim, produtores tendem a expandir suas fronteiras agrícolas sob áreas de vegetação natural, à medida que necessitam manter ou aumentar a produção ao longo do tempo, ao invés de priorizar manejos mais eficientes aos solos (Maria et al., 1999; Dias-Filho, 2011). No Relatório Anual do Perfil da Pecuária no Brasil, feito pela Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne – ABIEC, em 2018, vê-se retrato disto: os maiores rebanhos brasileiros se concentram em solos com limitações agrícolas. Destaque para o estado de Mato Grosso, primeiro do ranking, seguido pelos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, este último exemplo de condições de relevo acidentando, com aproximadamente 22 milhões de cabeça de gado (ABIEC, 2018).

Hoje, com a devida importância da pecuária no Brasil, as pastagens plantadas ocupam quase 112 milhões de hectares (ha), totalizando cerca de 13% do território brasileiro. E, como visto antes, o baixo investimento em manejos conservacionistas leva o Brasil a ter cerca de 12% de suas pastagens em más condições (IBGE, 2017).

Assim, segundo Flach et al. (2020), os principais pontos, que associados, levam à degradação do solo são: baixo uso de técnicas de manejo e conservação do solo, limitações naturais dos solos e declividades acentuadas, que juntos atuam como condicionantes para a alteração das condições físicas do solo e o desencadeamento de processos erosivos.

Portanto, a mudança no uso e ocupação do solo é um fator de grande importância, na qualidade do solo. Mesmo fortemente fragmentados, remanescentes de vegetação, assim como áreas de pastagem em sucessão, são capazes de garantir a proteção ao solo e, indiretamente, influenciar na qualidade e disponibilidade de água, por evitar o transporte de sedimentos, o assoreamento e a poluição de canais e reservatórios (Pereira et al., 2018).

Desta maneira, evidencia-se quão obsoleto se encontra grande parte dos sistemas de produção a pasto no Brasil. Entretanto, mesmo conhecido o

problema, as pastagens continuarão sendo a principal base da alimentação do rebanho no país, com isso informações sobre manejo das pastagens se tornaram cada vez mais indispensáveis (Freitas et al., 2019).

No entanto, a busca pela sustentabilidade em pastagens e manutenção da qualidade do solo, leva à necessidade de conciliar os interesses dos animais com as necessidades do meio, que são, normalmente, conflitantes. Para isto, Parron et al. (2015) sugerem que o avanço em novas metodologias de valoração de serviços ambientais pode contribuir para a melhor compreensão do funcionamento dos ecossistemas.

Nesse sentido, Silveira et al. (2018) ressaltam a importância desses serviços ambientais, principalmente no controle de erosão e conservação de recursos hídricos, destacando a importância da vegetação ao demonstrar a relação de impacto entre atividades antrópicas e a manutenção de fragmentos de vegetação.

Assim, para aproveitar os serviços ecossistêmicos, Parron et al. (2019) recomendam a implementação de novas formas de manejo visando melhorias na redução e controle da erosão, conservação da água, de nutrientes, controle biológico de pragas e doenças, aumento da matéria orgânica do solo, dentre outros.

Portanto, sistemas que integram pastagens com florestas, por exemplo, se tornam alternativas viáveis do ponto de vista técnico, ambiental e socioeconômico, em detrimento aos modelos tradicionais, já que visam a melhoria da capacidade produtiva do solo, por meio da otimização dos recursos disponíveis através dos serviços ecossistêmicos. (Alves e Karvatt Junior, 2019).

Além disto, áreas de pastagem degradadas também podem se regenerar, por meio dos mesmos serviços ecossistêmicos. Segundo Coutinho et al. (2019), pastagens abandonadas, mesmo com limitações, possuem potencial para a ocorrência da sucessão e início e estabelecimento natural de espécies florestais. No entanto, a regeneração natural, com espécies arbóreas e/ou herbáceo-arbustivas, é mais limitada pela presença da *Urochloa humidicola*, sendo mais determinante do que características químicas e físico-hídricas do solo (Silva et al., 2019).

Assim, pela falta de trabalhos sobre o assunto na região de estudo, mesmo sendo de domínio de pastagens extensivas em declividades acentuadas, este presente trabalho visa analisar o impacto causado pelo processo de sucessão em solo de diferentes áreas de pastagem, com ênfase à sua qualidade física e características físico-hídricas, relacionando-as com o papel

desempenhado pelos serviços ecossistêmicos naturalmente observados.

Material e métodos

Caracterização da área experimental

O trabalho foi desenvolvido na microbacia do Ribeirão José Pereira, situada entre as coordenadas planas 7524 km, 7516 km N e 452 km, 464 km E, inserida integralmente no município de Itajubá, região sul de Minas Gerais. Com aproximadamente 40 km², é delimitada ao sul, pela Serra da Pedra Amarela, a leste, pela Serra da Água Limpa, a norte, pelas serras do Juru e dos Toledos, e a oeste por pequenos divisores que a separam da bacia do rio Sapucaí.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a microbacia apresenta as duas variações do Clima Tropical de Altitude (CW), o tipo Cwa, predominante em grande parte da área, e Cwb, restrito a uma pequena porção noroeste da microbacia. Além disso, a área de estudo está inserida no bioma Mata Atlântica, com vegetação primária, como Floresta Estacional Semidecidual.

De acordo com Lima (2012), os Argissolos constituíram a classe de solo dominante na microbacia, representando 56% da área, ocupando o relevo ondulado e forte ondulado. A autora destaca que para relevos forte ondulados, argissolos vermelhos são comumente encontrados na região de estudo, já que encostas com declividades entre 15 e 45%, que caracterizam relevo Forte Ondulado, predominam na microbacia.

Pelo mapeamento de uso e ocupação do solo feito por Flauzino et al. (2016), as pastagens representam a forma de uso predominante na área de estudo, responsáveis por, aproximadamente, 50% da cobertura do solo. A pecuária leiteira, praticada de maneira extensiva, é a principal atividade econômica na área rural, abrangida pelas porções alta e média da microbacia.

Dentro do contexto proposto e discurrido no referencial teórico, as áreas de estudo selecionadas apresentam similaridades pedológicas, onde o tipo de solo selecionado foi o ARGISSOLO VERMELHO distrófico latossólico, porém com cobertura vegetal distinta entre si, em função de processos sucessionais. Assim, foram determinados os seguintes níveis de sucessão: a) pastagem (PB), área atualmente utilizada para pasto, 100 % coberta e visualmente não degradada; b) capoeira baixa (CB), definida como pastagem, com estágio inicial de sucessão; c) capoeira alta (CA), definida como uma pastagem em estágio mais avançado de sucessão que CB; d) capoeirão

(CAO), definida como uma pastagem que, atualmente, apresenta em estágio bem avançado de sucessão, com forte presença de espécies arbóreas e extratos arbustivos. O histórico de uso e

características das áreas podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Histórico de uso e características das áreas de estudo, em Itajubá (MG), 2020.

Áreas	Características
PB	Com área aproximada de 7500 m ² , destina-se seu uso, principalmente, à pecuária de corte, mas também se divide com a produção de leite e de equinos. Com altitude máxima de 924 e mínima de 889 metros, classifica-se como uma área de relevo forte ondulado, com 38% de declividade média.
CB	Com área aproximada de 4000 m ² , que a exemplo de PB, destina-se à pecuária de corte, produção de leite e de equinos. Com altitude máxima de 886 e mínima de 871 metros, com 26% de declividade média classifica-se como uma área de relevo forte ondulado, com o esperado em áreas de argissolo dentro da microbacia.
CA	Com área aproximada de 4100 m ² , destina-se seu uso misto à pecuária de corte e a equinocultura. Com altitude máxima de 889 e mínima de 871 metros, enquadra-se na classe de relevo forte ondulado da região, com declividade média de 22%.
CAO	Com área aproximada de 4200 m ² , que apesar de estar em um elevado estágio de sucessão natural, destina-se seu uso misto à pecuária de corte e à equinocultura. Com altitude máxima de 889 e mínima de 873 metros, e apresenta declividade média de 18%, sendo a área de menor declividade, mas, ainda sim, com relevo classificado como forte ondulado.

Pastagem (PB), capoeira baixa (CB), capoeira alta (CA) e capoeirão (CAO).

Descrição das amostragens

Cada área foi submetida à caracterização de atributos de natureza física, química e hidráulica. Assim, para as avaliações dos atributos físicos do solo foram coletadas amostras em três pontos aleatórios para cada sistema de manejo. As amostras com estrutura indeformada foram feitas com um amostrador de Uhland na profundidade 0-10 cm, e as de estrutura deformada como auxílio de um trado holandês, na profundidade de 0-20 cm. As amostras de solo coletadas, antes de serem utilizadas para determinação das análises físicas, foram submetidas, respectivamente, aos seguintes processos: verificação de umidade atual, conforme Teixeira et al. (2017), e secagem ao ar, por um período de 48 horas, para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

Na avaliação de atributos físicos, as amostras foram submetidas às análises de: densidade do solo; porosidade total; diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), ambos por via úmida e seca e índice de estabilidade dos agregados (IEA), sendo todos os métodos segundo Teixeira et al. (2017).

Sendo assim, para análise de DMG e DMP, cada amostra de solo amostrado foi fracionada, observando-se os pontos de fraqueza e, após secagem, transpassada em peneiras de 9,52 mm. Posteriormente, submetida à separação dos agregados em classes de tamanho (4,76; 2,0; 1,0;

0,5; 0,25 e 0,105 mm) em agitador mecânico, via seca, e agitador com oscilação vertical, via úmida.

Além disso, foram coletadas seis amostras aleatórias de 100 gramas de solo que foram submetidas a peneiramento, em um conjunto de peneiras de 9,7 e 8 mm, onde os agregados retidos foram classificados em padrões morfológicos, segundo Bullock et al. (1985). Segundo os autores supracitados, classificam-se em três tipos os padrões morfológicos de agregados: fisiogênicos, biogênicos e intermediários (Batista et al., 2013).

Para determinação da matéria orgânica, como atributo químico, foram analisadas três amostras compostas aleatórias de solo por área, as quais foram secas e peneiradas em malha de 2 mm, seguindo metodologia proposta por Teixeira et al. (2017). Os valores obtidos foram: 2,3; 2,0; 2,4 e 2,3 dag kg⁻¹, respectivamente para as áreas PB, CB, CA e CAO.

Para as análises de densidade de raízes (Maria et al., 1999), utilizou-se uma amostra composta por área, a exemplo das análises físicas. A separação das raízes foi feita por dissolução e fracionamento de um volume conhecido de solo em água abundante, utilizando-se peneira com abertura de 0,5 mm. As raízes retidas na peneira foram lavadas e, posteriormente, secas em estufa a 60 °C, por 24 h. Em seguida, pesadas e os resultados expressos em matéria seca de raízes (mg) por volume de solo (cm³).

A capacidade de infiltração do solo em campo foi calculada utilizando-se o permeâmetro

de Guelph, permeâmetro de furo e de carga hidráulica constante, que mede a condutividade hidráulica saturada de campo acima do lençol freático (Ribeiro, 2010). Para este ensaio o permeâmetro de Guelph foi instalado a uma profundidade de 20 cm. O ensaio é iniciado com a abertura do furo de 20 cm, profundidade desejada, com auxílio do trado que acompanha o equipamento. Em seguida, o permeâmetro é montado e abastecido de água. Posteriormente, é estabelecida uma carga constante de 5 cm, e quando o nível de água se estabiliza, iniciam-se as leituras em intervalos de 2 minutos, até atingir, no mínimo, 3 leituras constantes. Em seguida, o permeâmetro é, novamente, abastecido com água, porém antes de iniciar as leituras, uma carga de 10 cm é estabelecida. Os ensaios foram realizados nos mesmos pontos de coletas das amostras indeformadas, e, portanto, 3 testes foram feitos por área.

A compactação do solo foi avaliada por meio da resistência do solo à inserção de um penetrômetro. Análogo ao ensaio com o permeâmetro, os mesmos pontos foram avaliados, totalizando 3 testes por área. A profundidade máxima do ensaio foi de 40 cm. O princípio de funcionamento do penetrômetro consiste no recebimento de um impacto de um bloco, com altura de lançamento conhecida (60 cm), no solo e correlação dos impactos com a penetração

correspondente, em intervalos de 10 cm. Dos dados obtidos, um gráfico é gerado, relacionando o número de impactos com a profundidade analisada.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), com quatro tratamentos/áreas (PB, CB, CA e CAO) e três repetições por tratamento, exceto para a análise de padrões morfológicos, onde se utilizaram seis repetições por tratamento.

Os dados foram submetidos à análise de variância, empregando-se o teste de Tukey a 5 %, pelo *software* Sisvar (Ferreira, 2011). Também foram avaliados pela análise de componentes principais (PCA) e correlação de Pearson para determinação dos principais fatores/atributos que afetam a formação e estabilidade dos agregados, por meio do *software* Past (Hammer et al., 2001). Além disto, todos os dados foram submetidos, inicialmente, ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$), onde para os dados com distribuição anormal, foi realizada transformação dos dados por raiz quadrada de $y+1$.

Resultados e discussão

Os resultados expressos na Tabela 2 referem-se às médias do DMG e DMP, via úmida e via seca, relacionados a suas respectivas áreas, avaliados na profundidade de 0-20 cm.

Tabela 2. Resultados das análises do DMG e DMP para as áreas de estudo, em Itajubá (MG), 2020.

Áreas	Diâmetro médio geométrico (DMG) - úmido	Diâmetro médio ponderado (DMP) - úmido	Diâmetro médio geométrico (DMG) - seco	Diâmetro médio ponderado (DMP) - seco	Índice de estabilidade dos agregados (IEA)
	mm				%
PB	3,82a	3,60a	3,37b	3,98b	90,45cb
CB	2,51b	3,72a	3,35b	4,14a	89,86c
CA	3,14a	4,12a	3,28b	4,28a	96,26a
CAO	3,48a	4,32a	4,26a	4,53a	95,15ba
CV%	8,7	6,1	7,1	5,2	2,0

Pastagem em boas condições visuais (PB), capoeira baixa (CB), capoeira alta (CA) e capoeirão (CAO). CV (coeficiente de variação)

Comparam-se letras na vertical. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si (Tukey a 5%).

Pela Tabela 2, os valores de DMP seco variaram de 3,98 mm (PB) a 4,53 mm (CAO), sendo a área PB a única que apresentou diferença estatística. Já os valores de DMP úmido variaram de 3,60 mm (PB) a 4,32 mm (CAO), onde para as áreas PB e CB, por apresentarem diferenças estatísticas, menores valores são esperados relação às outras áreas. Para o DMG via seca a variação foi de 3,28 mm (CA) a 4,26 mm (CAO), e via

úmida de 2,51 mm (CB) a 3,82 mm (PB), onde a área CAO apresentou o maior DMG via seca e a área CB a menor DMG úmida. O DMP está ligado à porcentagem de agregados grandes e o DMG representa uma estimativa do tamanho da classe de maior ocorrência entre os agregados. E, portanto, quanto maior for o agregado, mais espaços porosos, melhor a infiltração e menor risco a erosão hídrica, já que exigem maior capacidade de

transporte do escoamento superficial (Dexter, 1988; Šimanský, 2013; Bocuti et al., 2019).

Assim, valores relativamente altos garantem à área uma boa infiltração e resistência à erosão, sendo a área de capoeirão (CAO) a de maior destaque, visto que em todas as outras áreas foi observada, ao menos, uma classificação com valores inferiores de DMG e DMP.

O índice de estabilidade dos agregados (IEA), pela Tabela 2, variou de 89,86% (CB) a 96,26% (CA), onde a área CA apresentou o maior valor, seguida pela área CAO. Este índice varia de 0 a 100%, sendo mais estáveis os agregados próximos ao valor de 100%. Assim, verifica-se que todas as áreas apresentaram altos valores de IEA, fato que caracteriza os agregados de alta coesão, quando submetidos à água, garantindo alta estabilidade de suas estruturas.

Os valores aqui encontrados corroboram os de Flauzino et al. (2016) em áreas de pastagens na Ribeirão José Pereira, onde os valores médios de DMG e DMP superiores a 3 mm indicam boa agregação do solo e se relacionam aos altos valores de IEA, cuja média, por vezes, supera os 90%. No entanto, apesar de todas as áreas apresentarem boa estabilidade dos agregados, a sucessão vegetal, por meio de seus serviços ecossistêmicos, garantiu uma estabilidade maior aos agregados, visto que quanto mais avançado o estágio da sucessão, mais estáveis

são os agregados (CA e CAO). Isto porque, segundo (Ozório et al., 2019) a presença de espécies arbustivas e arbóreas, comum em florestas e em pastagens em sucessão, promove alterações nas variáveis estruturais de agregação do solo, o que leva a um ganho da qualidade do solo em camadas superficiais.

Pela Tabela 3, a densidade do solo variou de 1,25 g/cm³ (CAO) a 1,35 g/cm³ (CB), porém sem diferenças estatísticas entre as áreas. A densidade exerce influência direta na infiltração e retenção de água no solo, bem como indica seu arranjo das partículas e poros, visto que permite avaliar a suscetibilidade a processos erosivos. Assim, os valores de densidade do solo podem ser atribuídos ao tipo de manejo utilizado, condições climáticas e a umidade do solo, tráfego de animais (Silva et al., 2015). Os valores críticos de densidade, para solos argilosos, segundo Reichert et al. (2003), estão em torno 1,4 g/cm³ a 1,6 g/cm³, e, portanto, as áreas em questão estão com valores ainda baixos. No entanto há uma certa dificuldade para a definição deste valor crítico, já que os fatores de crescimento de plantas e infiltração de água não devem ser analisados isoladamente, e sim em conjunto com outros atributos.

Tabela 3. Densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade das amostras de solo das áreas de estudo, em Itajubá (MG), 2020.

Áreas	Densidade	Porosidade total	Microporosidade	Macroporosidade
	g cm ⁻³	-----m ³ m ⁻³ -----		
PB	1,32a	0,49a	0,41a	0,08b
CB	1,35a	0,51a	0,36a	0,11ab
CA	1,29a	0,52a	0,41a	0,14aab
CAO	1,25a	0,54a	0,38a	0,16a
CV (%)	6,9	7,2	10,4	15,7

Pastagem em boas condições visuais (PB), capoeira baixa (CB), capoeira alta (CA) e capoeirão (CAO). CV (coeficiente de variação)

Comparam-se letras na horizontal. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si (Tukey a 5%).

Assim, de maneira complementar, os valores de porosidade foram calculados a partir da densidade do solo, e apresentaram variação de 0,49 m³/m³, para a área PB, até 0,54 m³/m³ para a área CAO, como pode ser observado na Tabela 3. A intensidade do uso do solo pode acarretar modificações indesejáveis ao solo como a compactação, e o consequente aumento da densidade, aqui já discutido, e a diminuição da porosidade. A porosidade relaciona os espaços não ocupados por sólidos, mas sim por água e ar. Sendo assim, ela tem papel importante na aeração,

condução e retenção de água, além de auxiliar na penetração de raízes. (Balota, 2018). Mas sabe-se que os poros totais do solo se constituem pelos macro e microporos. Assim, apesar dos valores de porosidade não apresentarem diferença estatística entre as áreas, ainda há a necessidade de subdividi-los para a melhor compreensão dos resultados.

De acordo com a Tabela 3, a microporosidade variou de 0,36 m³/m³ (CB) a 0,41 m³/m³ (PB e CA) e não apresentou diferença estatística. No entanto, ao levar em consideração a macroporosidade observou-se uma variação de

0,08 m³/m³ (PB) a 0,16 m³/m³, onde o aumento neste índice está relacionado à prestação de um serviço ecossistêmico pelo aumento da diversidade vegetativa entre as áreas. Deste modo, área de capoeirão (CAO), área com gramíneas e outras espécies arbustivas e arbóreas, apresenta uma maior concentração de macroporos do que a área de pastagem em boas condições visuais (PB), onde sua cobertura se dá apenas por gramíneas. Tal resultado corrobora outro proposto por Dalposso et al. (2020), os quais observaram menor densidade e maior macroporosidade nos primeiros 20 cm de solo em solos sob espécies arbóreas, favorecendo o desenvolvimento das raízes.

Segundo Azizsoltani et al. (2019), ambientes antropizados refletem em uma menor porcentagem de macroporos e mesoporos em relação aos microporos, sendo a adição de biomassa de serapilheira, em ambientes naturais,

como um dos fatores responsáveis. No entanto, Tarrá et al. (2010) discutem que o volume de macroporos tende a diminuir significativamente com o aumento do tempo de uso, mesmo sob influência de bons manejos, e que mesmo após a recuperação destas pastagens por sistemas agroflorestais ou por capoeiras, ainda haverá evidências dos efeitos do pisoteio animal, principalmente nas camadas superiores (0-5 cm).

Com relação às três vias de formação de agregados, na Tabela 4 são mostrados os agregados intermediários com os maiores valores, em porcentagem, na composição dos agregados do solo, variando de 59,55% (CAO) a 84,81% (CB). Quanto à via de formação fisiogênica, os valores em porcentagem estão entre 3,90% (CB) a 17,41% (CAO). Por fim, os agregados biogênicos variaram de 10,95% (PB) a 23,04% (CAO).

Tabela 4. Resultado da análise das três vias de formação de agregados do solo para as áreas de estudo, em Itajubá (MG), 2020.

Áreas	Fisiogênico	Intermediário	Biogênico
	-----%-----		
PB	16,04a	73,01b	10,95c
CB	3,90b	84,81a	11,29bc
CA	4,74b	79,90a	15,36b
CAO	17,41a	59,55c	23,04a
CV (%)	28,2	5,7	17,1

Pastagem (PB), capoeira baixa (CB), capoeira alta (CA) e capoeirão (CAO). CV (coeficiente de variação). Comparam-se letras na horizontal. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si (Tukey a 5%).

Ainda de acordo com a Tabela 4, a formação destes agregados mostra sensibilidade aos processos regenerativos onde, com o avanço da sucessão natural, maior foi a porcentagem de agregados formados via biogênica, modificando a composição da agregação do solo. Vale lembrar que os agregados biogênicos são formados por auxílio de indivíduos da macrofauna edáfica e raízes e, portanto, quanto maior a porcentagem destes agregados, espera-se uma melhoria da capacidade de infiltração e retenção de água, visto que tais fatores têm influência direta na densidade e porosidade do solo. Isto acontece visto que tais agregados formam poros e galerias de diversas formas e tamanhos (Brussaard et al, 2007).

Quanto à densidade de raízes relativa à camada de 0-20 cm de solo, não houve diferença estatística entre as áreas, com variação de 0,309 g cm⁻³, para a área de PB, a 0,111 g cm⁻³, para a área CAO. As atividades pecuárias acarretam, além de modificações nos atributos físicos, como a agregação, também alteração da oferta de forragem

pelas gramíneas. Assim, o sistema radicular destas forrageiras tende a aumentar sua massa à medida que se eleva a intensidade de pastejo. Isto ocorre porque com a diminuição da oferta de forragem, há uma menor cobertura do solo, o que pode levar a uma consequente degradação desta pastagem. E, a partir disto, sabe-se que tal dinâmica de degradação promove a diminuição do número de raízes no perfil do solo e favorece, ainda mais, sua concentração nas camadas superficiais (Conte et al., 2011; Silva, 2021). Desta forma, além da diminuição da oferta de forragem e maior concentração de raízes superficiais, processos degradativos como a compactação, por pisoteio de animais, dispersão de agregados, pelo efeito de salpicamento e um possível selamento superficial podem diminuir a infiltração de água no solo e promover um maior escoamento superficial e risco de erosão (Muller et al., 2001).

Os resultados de resistência à penetração, oferecida pelo solo, em cada subárea, estão na Figura 1. Tais resultados foram subdivididos em

quatro classes de profundidade: 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm. A unidade MPa corresponde à pressão necessária para perfurar o solo, assim quanto maior este valor maior a resistência do solo à penetração. Desta forma, para a subárea PB, apesar dos valores de resistência variarem de 3,07 a 6,86 MPa não houve diferença estatística pelo teste de Tukey, não evidenciando uma zona compactada na profundidade amostrada. O mesmo acontece para a subárea CA, onde não foi detectada diferença estatística que comprove um possível incremento da resistência do solo de 0 a 40 cm, com valores de resistência de 5,39 a 7,95 MPa. No entanto, para as subáreas CB e CAO observou-se uma estratificação dos valores de resistência com o

aumento da profundidade. Para a primeira área, a camada de 0-10 cm do solo apresentou um valor de resistência superior às camadas subjacentes, com 4,37 MPa, enquanto as de 10-20 e 20-30 cm variaram de 3,41 a 4,28 MPa, respectivamente. Porém, na camada de 30-40 cm notou-se uma mudança abrupta na resistência do solo, com valores médios de 6,43 MPa. Já para a subárea CAO houve um aumento gradativo da resistência do solo de acordo com as camadas analisadas. Na profundidade 0-10 cm, a resistência média foi de 3,55 MPa, seguidos por 5,52 MPa, na classe 10-20 cm, 7,63 MPa, na classe 20-30 cm, e, por fim, de 30-40 cm com o valor médio de 9,92 MPa.

Figura 1. Resistência mecânica do solo à penetração, avaliada por penetrômetro de impacto, para as áreas de estudo, em diferentes profundidades, Itajubá (MG), 2020.

Pastagem (PB), capoeira baixa (CB), capoeira alta (CA) e capoeirão (CAO).

Comparam-se letras minúsculas entre as áreas e maiúsculas entre as classes de profundidade. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si (Tukey a 5%). CV (0-10) - 27,5%; CV (10-20) - 18,2%; CV (20-30) - 51,1%; CV (30-40) - 28,2%.

Ainda pela Figura 1, comparando as classes de profundidade com as subáreas, em questão, nota-se que nas classes de 0-10, 20-30 e 30-40 cm não houve diferenças estatísticas significativas entre as subáreas estudadas pelo teste de Tukey. Somente na classe de 10-20 cm foi observada diferença estatística, onde as subáreas PB e CB apresentaram menores valores de resistência à penetração, com 3,67 e 3,41 MPa, respectivamente. Na sequência tem-se a subárea CAO com 5,82 MPa e, por fim, a subárea CA apresentou a maior resistência à penetração em tal classe, com 6,45 MPa.

O pisoteio animal, segundo Parentee Maia (2011), pode ocasionar alterações nas propriedades físicas do solo, e acarretar no comprometimento da aeração e acessibilidade de nutrientes, e, com isto,

refletir no crescimento das plantas. Para os autores, o penetrômetro traz boas estimativas da resistência do solo à penetração de raízes, já que as plantas, ao identificarem uma camada compactada, têm seu crescimento radicular estabilizado, e precisam explorar a porosidade do solo ou estimular a abertura de novos poros (Dexter, 1988). Para Arshad et al. (1996), o valor crítico para o crescimento radicular é de 2 a 4 MPa, e para Camargo e Alleoni (1997) o valor crítico é de 2,5 MPa, o que implica a quase todas as áreas estudadas restrições ao desenvolvimento radicular, já que todas apresentam valores considerados muito altos (4 a 8 MPa) e até extremamente altos (>8 MPa) (Soil Survey Division Staff, 1993).

Silveira et al. (2010), em um estudo de resistência à penetração de um ARGISSOLO

AMARELO, destacaram que os valores muito altos nessa variável podem decorrer em virtude da textura do solo, neste caso franco arenosa. Isto ocorre, pois a resistência à penetração possui relação direta com a umidade do solo, e a diferença textural ao longo do perfil, característica de argissolos, e faz com que concentração de água seja diferente à medida em que se aprofunda no perfil do solo, característica também encontrada por Cunha et al. (2019). Assim, a classe textural pode acentuar a rapidez com que os solos perdem água que, do ponto de vista prático, implicam na necessidade de técnicas para a manutenção da umidade no solo próxima à capacidade de campo, a fim de oferecer condições satisfatórias para o desenvolvimento radicular e o consequente crescimento das plantas.

Nas áreas em questão, observaram-se valores de condutividade hidráulica (K) de 2,71 (CA), 3,15 (PB), 6,55 (CB) e 11,8 mm/h (CAO), que não se diferem entre si pelo teste de Tukey 5%. Como os valores de condutividade não se diferiram entre si, espera-se que os diferentes manejos adotados para pastagens não alteram a capacidade de infiltração inferior a esta camada de solo (ARGISSOLO VERMELHO distrófico latossólico).

Desta maneira, segundo a classificação de Terzaghi et al. (1967) e Mello e Teixeira (1967) o solo da região pode ser o responsável por atribuir tais características, visto que os valores são esperados para solos de textura argilosa e de textura fina, o que condiz com o tipo de solo da região de estudo (Argissolo). Assim, ainda de acordo com os autores supracitados, tais áreas são classificadas, quanto ao seu grau de permeabilidade hidráulica, como solos de média à baixa condutividade hidráulica. No entanto, Parente e Maia (2011), em uma revisão de literatura, destacaram a importância da camada superficial na partição da quantidade de água recebida pelo solo, tanto na infiltração quanto no escoamento superficial. E, em especial para pastagens, que são suscetíveis a compactação, há uma maior possibilidade de arraste de solo e nutrientes (Brito et al., 2019).

Assim, ainda que os valores de condutividade hidráulica não tenham apresentado diferença estatística entre os manejos, a camada superficial tem que ser levada em consideração, visto que condições de superpastoreio podem comprometer as propriedades físicas do solo. Nesse sentido, segundo Silva et al. (2019) manejos com intensa mobilização do solo, como pastagem e monocultura, tendem a apresentar menores valores de velocidade de infiltração, quando comparados a áreas sem manejo (floresta) e em sistema de

manejo agrícola com a floresta (Lavoura-floresta). Além disto, Velasquez e Righes (2019) ressaltam a influência de prováveis canais deixados no solo pela decomposição da matéria orgânica (raízes, formigas etc.) passando, dessa forma, maior volume de água pela amostra, entre valores da condutividade hidráulica saturada, e comprovando a importância da cobertura vegetal e da fauna, na conservação da matéria orgânica do solo.

Visando compreender melhor a agregação do solo e sua influência na infiltração de água, submeteram-se os atributos à análise de correlação de Pearson. O coeficiente de relação de Pearson (r) permite interpretações com base na força da correlação, sendo fortes correlações com $r > |0,7|$ e muito fortes com $r > |0,9|$. Além disto, aqui, foram consideradas apenas correlações com nível de significância (denotado como α ou alfa) menores que 0,05.

Assim, pela Figura 2, com um nível de significância de 95%, pode-se afirmar que o DMP úmido apresenta uma correlação negativa muito forte ($r = -0,99$) com a densidade do solo. Também se observa que o DMG seco apresenta uma correlação negativa muito forte com a densidade de raízes ($r = -0,96$) e uma correlação positiva muito forte com a condutividade hidráulica ($r = 0,96$). A condutividade hidráulica ainda apresenta uma correlação negativa muito forte com a densidade de raízes ($r = -0,99$). Além disto, a porosidade do solo apresenta uma correlação positiva muito forte com a macroporosidade ($r = 0,98$).

Segundo Dexter (1988), os agregados do solo possuem grande importância na manutenção de diversas condições edáficas como aeração, porosidade, infiltração, controle de processos erosivos e crescimento e desenvolvimento de raízes. Assim, como o esperado para as áreas em estudo, o DMG e DMP apresentam correlação com tais processos. Contudo, no que se diz respeito à densidade de raízes, Conte et al. (2011) discutem sua contribuição para a agregação do solo, onde à medida que se eleva o pastejo mais expressiva é a massa de raízes. Porém, a densidade de raízes do presente trabalho não apresentou diferença significativa entre as áreas e, diferentemente do discutido, uma maior quantidade de raízes não implica, necessariamente, em maiores valores do tamanho dos agregados. Uma das explicações para isto se dá pelos maiores valores de resistência à penetração na camada de 10-20 cm das áreas CA e CAO em relação às outras. Além disto, em virtude de processos de sucessão natural, têm-se uma diferenciação de cobertura, onde novas espécies arbustivas e arbóreas, que possuem sistemas

radiculares diferentes das gramíneas, podem competir entre si.

Figura 2. Correlação de Pearson (p-value <0,05) entre os atributos do solo das áreas de estudo, em Itajubá (MG), 2020. DMGu – Diâmetro médio geométrico via úmida, DMPu – Diâmetro médio ponderado via úmida, DMGs – Diâmetro médio geométrico via seca, DMPs – Diâmetro médio ponderado via seca, IEA – Índice de estabilidade dos agregados, Dens – Densidade do solo, Poro – Porosidade total, Micro – Microporosidade, Macro – Macroporosidade, Bio – Agregado biogênicos, DR – Densidade de raízes, RP – Resistência a penetração, CH – Condutividade Hidráulica, MO – Matéria orgânica.

Para facilitar a visualização e a compreensão da dinâmica dos atributos estudados entre as áreas, os dados foram submetidos também à estatística multivariada. Como resultado foi gerada a Figura 3, onde as abscissas correspondem ao componente principal (CP) 1, com 61,15 % da

variância total explicada, e as ordenadas correspondem ao CP 2, com 28,4% da variância total. Os dois fatores juntos explicaram 89,55% da variância total dos dados, possibilitando que somente esses componentes sejam apresentados.

Figura 3. Resultado da Análise de componentes principais (PCA) e Scores do CP1, evidenciando o sentido da melhoria da qualidade do solo nas diferentes áreas de estudo, em Itajubá (MG), 2020.

Com a análise das componentes principais (PCA) pela Figura 3, observou-se que a área capoeirão (CAO) mostrou relação com maior

tamanho de agregados (DMG e DMP), melhor estabilidade dos agregados (IEA), porosidade, macroporosidade e condutividade hidráulica.

Dessa forma, essas áreas evidenciam que a sucessão natural melhora as funções do solo, por meio de seus serviços ecossistêmicos, já que áreas em início de sucessão, pastagem (PB) e capoeira baixa (CB), apresentaram relação com valores mais altos de DS, em sentido oposto ao das áreas em estágios mais avançados, onde os agregados apresentam um bom desenvolvimento e estabilidade, possibilitando maior resistência à erosão e boa infiltração de água.

Pela distribuição das áreas (Figura 3), foi possível evidenciar que as áreas se encontram na seguinte ordem crescente de qualidade: pastagem em boas condições visuais (PB), capoeira baixa (CB), capoeira alta (CA) e capoeirão (CAO). Corroborando esse resultado, Ashagrie et al. (2007) observaram aumento da qualidade do solo conforme aumentou a sucessão natural. Tal resultado se deve ao fato de que quanto maior a interferência antrópica no uso do solo, maior a degradação da sua estrutura e comprometimento de importantes processos relacionados à manutenção de sua qualidade.

Assim, apesar dos valores de condutividade hidráulica entre as áreas não terem apresentado diferença significativa, pela análise multivariada é possível perceber melhorias à medida que os serviços ecossistêmicos são prestados pela sucessão natural. Vale ressaltar que todas as áreas estão sobre mesmo tipo de solo, Argissolo. Este tipo de solo, por característica, possui uma camada adensada, formada pela eluviação de argila da camada superficial em seu perfil, fazendo com que a percolação de água seja limitada entre os horizontes do solo (Souza et al., 2014). Nesse sentido, Brandão et al. (2006) discutem que o ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO apresenta menores taxas de infiltração, se comparados a outros tipos solo, como: LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO e NEOSSOLO QUARTZARÊNICO. Segundo eles, tal fato se dá pelo menor grau de estruturação, associado ao elevado conteúdo de argila dispersa, que favorece o preenchimento dos poros por argila. E se comparados com o ARGISSOLO VERMELHO, apesar de semelhanças físico-químicas, encontrou-se uma infiltração significativamente menor, provavelmente em função do maior teor de óxido de ferro.

Com isso, pode-se dizer que, a sucessão natural e sua interferência na cobertura vegetal dos solos têm papel importante no controle do escoamento superficial, já que para os casos de estudo, áreas sobre Argissolo apresentam grandes limitações à infiltração, independente do manejo utilizado. Deste modo, garantir uma boa e diversa

cobertura vegetal poderia resultar em uma maior retenção de água, diminuindo sua velocidade superficial e a possibilidade do desenvolvimento de processos erosivos.

Segundo Silva et al. (2015), as atividades agropecuárias têm grande destaque na economia, contudo sabe-se, também, que elas demandam de muitos recursos naturais e, portanto, se faz necessária uma abordagem diferenciada para anteceder a dupla necessidade de aumentar a produtividade e diminuir os danos ambientais. E para eles, em áreas com baixo nível de manejo, como a pecuária extensiva, a prestação de serviços ambientais pode potencializar o suporte do meio, mais do que em sistemas manejados, onde quanto maior a intensidade de manejo, menos interferência destes serviços pode ser encontrada.

Desta forma, como discutido previamente Parron et al. (2015), classificam que o avanço em metodologias de valoração de serviços ambientais contribuem sob o aspecto econômico, onde seria possível atribuir valor monetário aos serviços da natureza e, assim, estimular a preservação dos ambientes naturais e a restauração de ecossistemas degradados, principalmente aqueles ligados ao meio rural, já que podem gerar aumento de renda aos proprietários rurais.

Áreas com sistemas integrados, como lavoura-pecuária-floresta, podem ser uma nova forma de produção mais sustentável, já que estes sistemas tendem a apresentar menores valores de resistência do solo à penetração e maior velocidade de infiltração, em comparação a áreas de pastagens degradadas (Furquim et al., 2020). Ademais, existem outros diversos sistemas de produção, porém de acordo com Lourençano e Cavichioli (2019), mais do que pensar em soluções, é preciso repensar o modelo de desenvolvimento tecnológico utilizado na agricultura brasileira, com ações voltadas à realidade socioeconômica e ambiental específica de cada região.

Dessa forma, recomenda-se que a sucessão natural que ocorre em pastagens abandonadas não seja analisada por um ou poucos atributos, mas da forma mais ampla possível, com um conjunto de atributos físicos, químicos, hidráulicos e biológicos, pois os serviços ecossistêmicos atuam de forma generalizada e interconectada.

Conclusões

A sucessão ecológica que ocorre, naturalmente, em pastagens abandonadas e, por conseguinte, dos efeitos dos serviços ecossistêmicos, melhora a qualidade física do solo, com produção de agregados maiores (DMG e

DMP), mais estáveis e de formação biogênica, ao longo do tempo.

Densidade do solo, massa de raízes, teor de matéria orgânica, porosidade total, microporosidade e condutividade hidráulica não foram sensíveis na discriminação das áreas de pastagem.

As áreas de estudo podem ser classificadas em função dos atributos analisados, na seguinte ordem crescente de qualidade: pastagem em boas condições visuais (PB), capoeira baixa (CB), capoeira alta (CA) e capoeirão (CAO).

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa de mestrado do primeiro autor, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pelo apoio.

Referências

- ABIEC. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. Perfil da pecuária no Brasil – Relatório Anual – 2018, 2018. São Paulo, ABIEC.
- Altmann, A., 2020. Medidas agroambientais e climáticas da Política Agrícola Comum enquanto instrumento de valorização, restauração e proteção dos serviços ecossistêmicos na União Europeia. *Debater a Europa*, 23, 41-65. Disponível: https://doi.org/10.14195/1647-6336_23_3. Acesso: 21 maio 2021.
- Alves, F.V., Karvatt Junior, N., 2019. Benefícios da sombra em sistemas em integração lavoura-pecuária-floresta nos trópicos, in: Bungenstab, D.J., Almeida, R.G., Laura, V.A., Baldino, L.C., Ferreira, A.D. (Eds.), *ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta*. Embrapa, Brasília, pp. 527-541. Disponível: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1112924/1/Beneficiosdasombraemsistema.s.pdf>. Acesso: 21 maio 2021.
- Arshad, M.A.; Lowery, B.; Grossman, B., 1996. Physical tests for monitoring soil quality, in: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.). *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America.
- Ashagrie, Y., Zech, W., Guggenberger, G., Mamo, T., 2007. Soil aggregation, and and particulate organicmatter following conversion of native foreststo continuous cultivation. *Soil & Tillage Research* 94, 101-108. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.07.005>. Acesso: 23 maio 2021.
- Azizsoltani, E.; Honarjoo, N.; Ayoubi, S., 2019. How Soil Pore Distribution Could Help in Soil Quality Studies as an Appropriate Indicator. *Eurasian Soil Science* 52, 654–660. Disponível: <https://doi.org/10.1134/S1064229319060036>. Acesso: 21 maio 2021.
- Balota, E.L., 2018. Manejo e qualidade biológica do solo. Produção independente.
- Batista, I., Correia, M.E.F., Pereira, M.G., Bieluczyk, W., Schiavo, A., Mello, N.A., 2013. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no Cerrado, MS. *Semina: Ciências Agrárias* 34, 1535–1548. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n4p1535>. Acesso: 23 maio 2021.
- Bocuti, E.D., Amorim, R.S.S., Santos, T.G., di Raimo, L.A. di L., Pereira, H.G., 2019. Erodibilidade entressulcos e sua relação com atributos de solos do Cerrado. *Revista de Ciências Agrárias* 42, 68-78. Disponível: <https://doi.org/10.19084/RCA18130>. Acesso: 21 maio 2021.
- Brandão, V.S., Silva, D.D., Ruiz, H.A., Pruski, F.F., Schaefer, C.E.G.R., Martinez, M.A., Menezes, S.J.M.C., 2006. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30, 13–21. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000100002>. Acesso: 21 maio 2021.
- Brito, G.Q., Sampaio, J.A.G., Luiz, G.P., Melo, A.C.A., Simões, V.P., Martins, P.R., Neves, G., Murta, J.R.M., Mendonça Filho, S.F., Couto Junior, A.F., Vieira, L.C.G., Teixeira, A.C.O., Salemi, L.F., 2019. Efeitos da conversão de floresta ripária em pastagem sobre as propriedades físico-hídricas do solo. *Espaço e Geografia* 22, 73-89. Disponível: <http://www.lsie.unb.br/espacoegografia/index.php/espacoegografia/article/view/663/332>. Acesso: 28 jan. 2021.
- Brussaard, L., Pulleman, M.M., Quédraogo, E., Mando, A., 2007. Soil fauna and soil function in the fabric of the food web. *Pedobiologia* 50, 447–462. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pedobi.2006.10.007>. Acesso: 21 maio 2021.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., 1985. *Handbook for soil thin section description*. Waine Research, Albrighton.

- Camargo, O. A. de; Alleoni, L. R. F., 1997. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Esalq, Piracicaba.
- Conte, O., Wesp, C.L., Anghinoni, I., Carvalho, P.C.F., Levien, R., Nabinger, C., 2011. Densidade, agregação e frações de carbono de um argissolo sob pastagem natural submetida a níveis de ofertas de forragem por longo tempo. Revista Brasileira de Ciência do Solo 35, 579-587. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200027>. Acesso: 21 maio 2021.
- Coutinho, P.R.O.S., Valcarcel, R., Rodrigues, P.J.F.P., Braga, J.M.A., 2019. Restauração passiva em pastagens abandonadas a partir de núcleos de vegetação na Mata Atlântica, Brasil. Ciência Florestal 29, 1307-1323. Disponível: <https://doi.org/10.5902/1980509827844>. Acesso: 21 maio 2021.
- Crowther, T.W., Van den Hoogen, J., Wan, J., Mayes, M.A., Keiser, A.D., Mo, L., Averill, C., Maynard, D.S., 2019. The global soil community and its influence on biogeochemistry. Science 365, eaav0550. Disponível: <https://doi.org/10.1126/science.aav0550>. Acesso: 21 maio 2021.
- Cunha, L.R.A., Silva, J.O., Oliveira, F.P., Tavares, D.D., Silva, P.L.F., Martins, A.F., 2019. Resistência a penetração em um latossolo sob diferentes condições de uso no agreste da Paraíba. Revista EDUCAmazônia XXIII, 140-153. Disponível: <https://periodicos.ufam.edu.br/educamazonia/article/view/6717>. Acesso: 21 maio 2021.
- Dalposso, D.M., Brun, E.J., Schroeder, F., Canônico, C.M., Macedo, V.P., 2020. Qualidade física do solo sob sistema silvipastoril com *Peltophorum dubium* e *Panicum maximum* cv. Aruana. Pesquisa Florestal Brasileira 40, 1-8. Disponível: <http://dx.doi.org/10.4336/2020.pfb.40e201801645>. Acesso: 21 maio 2021.
- Dexter, A.R., 1988. Advances in characterization of soil structure. Soil and Tillage Research 11, 199-238. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90002-5). Acesso: 21 maio 2021.
- Dias-Filho, M. B., 2016. Uso de pastagens para a produção de bovinos de corte no Brasil: passado, presente e futuro. Embrapa Amazônia Oriental, Belém. Disponível: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infotec/bitstream/doc/1042092/1/DOCUMENTOS418.pdf>. Acesso: 21 maio 2021.
- Dias-Filho, M.B., 2011. Os desafios da produção animal em pastagens na fronteira agrícola brasileira. Revista Brasileira de Zootecnia 40, 243-252. Disponível: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/40978/1/SP6508.pdf>. Acesso: 21 maio 2021.
- FAO, 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR).FAO and ITPS, Rome. Disponível: <http://www.fao.org/3/i5199e/I5199E.pdf>. Acesso: 23 maio 2021.
- Ferreira, D.F., 2011 Sisvar: a computer statistical analysis system. Ciência e Agrotecnologia 35, 1039-1042. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>. Acesso: 23 maio 2021.
- Ferreira, L.M.R., Esteves, L.S., Souza, E.P., Santos, A.C., Rêgo, V.G.S., 2019. Mudanças espaço temporal da disponibilidade de serviços ecossistêmicos em uma microbacia hidrográfica do nordeste brasileiro. Desenvolvimento e Meio Ambiente 52, 155-174. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v52i0.57716>. Acesso: 21 maio 2021.
- Flach, W., Alves, E.A.C., Meurer, M., 2020. Taxa de infiltração da água e resistência mecânica à penetração em solos submetidos a diferentes usos na região da Serra de Sudeste/RS. Caminhos de Geografia 21, 223-242. Disponível: <https://doi.org/10.14393/RCG217348139>. Acesso: 21 maio 2021.
- Flauzino, B. K., Melloni, E.G.P., Pons, N.A.D., 2016. Mapeamento da capacidade de uso da terra como contribuição ao planejamento de uso do solo em sub-bacia hidrográfica piloto no sul de Minas Gerais. Geociências 35, 277-287. Disponível: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEO/SP/article/view/9025>. Acesso: 16 maio 2021.
- Freitas, P.V.D.X., Tomazello, D.A., Ribeiro, F.M., Franklin, J., Oliveira, A., Lopes, A.R., Silva Neto, C.M., França, A.F.S., 2019. Efeitos do pastejo no desenvolvimento e crescimento de plantas forrageiras. Revista Científica Rural 21, 388-405. Disponível: <https://doi.org/10.30945/rcr-v21i2.2776>. Acesso: 21 maio 2021.
- Furquim, L.C., Souza, E.J., Silva, N.F., Nuñez, D.N.C., Cabral, J.S.R., Santini, J.M.K., Leão,

- B.C.S., Stone, L.F., 2020. Infiltração de água e resistência do solo à penetração em sistemas de cultivos integrados e em área de pastagem degradada. *Colloquium Agrariae* 16, 82-95. Disponível: <http://journal.unoeste.br/index.php/ca/article/view/3449>. Acesso: 21 maio 2021.
- Garcia, J., Romeiro, A.R., 2019. Modelagem econômico-ecológica como apoio para a avaliação dos serviços ecossistêmicos em bacias hidrográficas. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* 29, 33-52. Disponível: <https://redibec.org/ojs/index.php/revibec/article/view/60>. Acesso: 21 maio 2021.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4, 1–9. Disponível: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm. Acesso: 23 maio 2021.
- IBGE, 2017. Censo agropecuário 2017. Rio de Janeiro.
- Lima, O., 2012 Distribuição de solos em catenas e mapeamento pedológico de sub-bacia hidrográfica piloto na região de Itajubá-MG. Dissertação (Mestrado). Itajubá, Unifei. Disponível: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1041>. Acesso: 23 maio 2021.
- Lourençano, L.S., Cavichioli, F.A., 2019. Sistema integração lavoura-pecuária-floresta: uma alternativa ao monocultivo. *Interface Tecnológica* 16, 214-225. Disponível: <https://doi.org/10.31510/inf.v16i2.666>. Acesso: 21 maio 2021.
- Maria, I. C., Castro, O. M. de, Souza Dias, H., 1999. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 23, 703–709. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831999000300025>. Acesso: 21 maio 2021.
- Mello, V.F.B., Teixeira, A.H., 1967. Mecânica dos solos. Escola de Engenharia, São Carlos.
- Muller, M.M.L., Guimarães, M.F., Desjardins, T., Martins, P.F.S., 2001. Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 36, 1409–1418. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2001001100012>. Acesso: 21 maio 2021.
- Ozório, J.M.B., Rosset, J.S., Schiavo, J.A., Panachuki, E., Souza, C.B.S., Menezes, R.S., Ximenes, T.S., Castilho, S.C.P., Marra, L.M., 2019. Estoque de carbono e agregação do solo sob fragmentos florestais nos biomas Mata Atlântica e Cerrado. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais* 53, 97-116. Disponível: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190518>. Acesso: 21 maio 2021.
- Parente, H.N., Maia, M.O., 2011. Impacto do pastejo sobre a compactação dos solos com ênfase no Semiárido. 2011. *Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas* 5, 1-13. Disponível: <http://dx.doi.org/10.0000/rtcab.v5i3.272>. Acesso: 21 maio 2021.
- Parron, L.M., Garcia, J.R., Rachwal, M.F.G., Franchini, J.C., Franciscón, L., Porfírio da Sila, V., Brown, G.G., 2015. Avaliação de serviços ambientais no âmbito do projeto ServiAmbi, in: Parron, L.M., Garcia, J.R., Oliveira, E.B. de, Brown, G.G., Prado, R. B. (Ed.). *Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica*. Brasília, Embrapa, pp. 36-46. Disponível: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1024463>. Acesso: 21 maio 2021.
- Parron, L.M., Garcia, R., Moreira, J.M.M.A.P., 2019. Avaliação de serviços ecossistêmicos em sistemas agrossilvipastoris. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* 30, 81-100. Disponível: <https://www.redibec.org/ojs/index.php/revibec/article/view/348>. Acesso: 21 maio 2021.
- Pereira, L.F., Ferreira, C.F.C., Guimarães, R.M.F., 2018. Manejo, qualidade e dinâmica da degradação de pastagens na Mata Atlântica de Minas Gerais – Brasil. *Nativa* 6, 370-379. Disponível: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i4.5542>. Acesso: 21 maio 2021.
- Reichert, J. M., Reinert, D. J., Braidá, J. A., 2003. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência e Ambiente* 27, 29–48. Disponível: http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao_Artigos/5.pdf. Acesso: 21 maio 2021.
- Ribeiro, G. F., 2010 Estudo dos fatores do meio físico que influenciam a capacidade de infiltração das águas da bacia hidrográfica Vargens de Caldas, Minas Gerais. Dissertação (Mestrado). Campinas, Unicamp. Disponível:

- http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOS/IP/287667/1/Ribeiro_GlaucielenFaria_M.pdf. Acesso: 23 maio 2021.
- Silva, A.P., Resende, A.S., Chaer, G.M., Gonçalves, F.L.A., Campello, E.F.C., 2018. Influência da forma e posição da encosta nas características do solo e na regeneração natural em áreas de pastagem abandonadas. *Ciência Florestal* 28, 1239-1252. Disponível: <https://doi.org/10.5902/1980509833366>. Acesso: 21 maio 2021.
- Silva, G. F., Santos, D., Silva, A.P., Souza, J.M., 2015. Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. *Revista Caatinga* 28, 25–35. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n303rc>. Acesso: 21 maio 2021.
- Silva, H.R.S.E., Santos, J.F.S., Silva, A.F., Nascimento, S.M.S.G., 2019. Infiltração de água e atributos físicos do solo em diferentes agroecossistemas no brejo paraibano. *Cademo Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* 9, e-6983. Disponível: <https://doi.org/10.18378/cvads.v9i7.6983>. Acesso: 21 maio 2021.
- Silva, P.L.F., 2021. Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica. *Meio Ambiente* 3, 24-33. Disponível: <http://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/119>. Acesso: 21 maio 2021.
- Silveira, C.R.S., Macedo, D.R., Callisto, M., 2018. Serviços ecossistêmicos na bacia hidrográfica de um reservatório hidrelétrico em cenário de extrema escassez hídrica. *Revista Espinhaço* 7, 11-20. Disponível: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3952921>. Acesso: 21 maio 2021.
- Silveira, D.C., Melo Filho, J.F., Silva, J.A.A., Silveira, E.C.P., 2010. Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no Recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 659-667. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300007>. Acesso: 23 maio 2021.
- Šimanský, V., 2013. Soil structure stability and distribution of carbon in water-stable aggregates in different tilled and fertilized Haplic Luvisol. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 60, 173–178. Disponível: DOI: 10.11118/actaun201260030173. Acesso: 21 maio 2021.
- Soil Survey Division Staff, 1993. *Soil Survey Manual*. USDA Handbook No. 18. US Government Printing Office, Washington.
- Souza, E.B., Patrocínio Filho, A.P., Pimenta, W.A., Nagahama, H.J., Cortez, J.W., 2014. Resistência mecânica do solo à penetração em função da sua umidade e do tipo de penetrômetro. *Revista Engenharia na Agricultura* 22, 67–76. Disponível: <https://doi.org/10.13083/reveng.v22i1.417>. Acesso: 21 maio 2021.
- Tarrá, I.L.C., Luizão, F.J., Wandelli, E.V., Teixeira, W.G., Morais, W.J., Castro, J.G.D., 2010. Tempo de uso em pastagens e o volume dos macroporos do solo na Amazônia Central. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14, 678–683. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000600015>. Acesso: 21 maio 2021.
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G. (Eds.), 2017. *Manual de métodos de análise de solo*, 3.ed. Embrapa, Brasília. Disponível: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181717/1/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2017.pdf>. Acesso: 23 maio 2021.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G., 1967 *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, New York.
- Velasquez, R.P., Righes, A.A., 2019. Controle de voçoroca em Argissolo vermelho em São Valentim-RS. *Disciplinarum Scientia*. 20, 53-69. Disponível: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/2777>. Acesso: 21 maio 2021.