



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E
AMBIENTAIS

SISTEMAS AGROFLORESTAIS E SEUS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS
NA RDS DO UATUMÃ, AMAZONAS, BRASIL

Isabele Cristine Garcia Goulart

MANAUS
2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E
AMBIENTAIS

SISTEMAS AGROFLORESTAIS E SEUS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS
NA RDS DO UATUMÃ, AMAZONAS, BRASIL

Isabele Cristine Garcia Goulart
Orientadora: Dra. Veridiana Vizoni Scudeller
Coorientador: Dr. Afrânio Ferreira Neves Junior

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciências Florestais e Ambientais
da Universidade Federal do
Amazonas (PPG-CIFA/UFAM)
como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre em
Ciências Florestais e Ambientais.

MANAUS
2020

FICHA CATALOGRÁFICA

G694a Goulart, Isabele Cristine Garcia
Sistemas agroflorestais e seus serviços ecossistêmicos na RDS do Uatumã, Amazonas, Brasil / Isabele Cristine Garcia Goulart . 2020
93 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Veridiana Vizoni Scudeller
Coorientador: Afrânio Ferreira Neves Junior
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal do Amazonas.

1. agricultura itinerante. 2. solos improdutivos. 3. percepção ambiental. 4. Amazônia Central. I. Scudeller, Veridiana Vizoni. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

Sinopse: Impactos da implantação de sistemas agroflorestais em áreas degradadas da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã na provisão de serviços ecossistêmicos foram investigados por meio da percepção ambiental e da análise de atributos químicos e físicos do solo.

Palavras-chave: Agricultura itinerante; solos improdutivos; percepção ambiental; biomassa; Amazônia Central.

FOLHA DE APROVAÇÃO



Poder Executivo
Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Florestais e Ambientais - PPGCIFA



Ata da Defesa Pública da Dissertação de Mestrado do(a) “**ISABELE CRISTINE GARCIA GOULART**”, aluno(a) do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais – PPGCIFA, Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Amazonas, dia 10 de junho de 2020.

Aos décimo dias do mês de junho de 2020, às 14:00 horas, por meio de Transmissão por Vídeo Conferência, realizou-se a Defesa de Mestrado, intitulada “**SISTEMAS AGROFLORESTAIS E SEUS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS NA RDS DO UATUMÃ, AMAZONAS, BRASIL**”, do(a) discente **ISABELE CRISTINE GARCIA GOULART**, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE “Magister Scientia” EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E AMBIENTAIS**, área de concentração em **CIÊNCIAS FLORESTAIS E AMBIENTAIS (CIFA)**. A Banca Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Doutor (a) Veridiana Vizoni Scudeller (UFAM), Doutor (a) Sônia Sena Alfaia (INPA), Doutor(a) Edson José Vidal da Silva (USP). Após o fim da apresentação e da arguição pelos membros da Banca Examinadora, esta se reuniu e decidiu pela:

(x) **APROVAÇÃO**, devendo o(a) discente entregar a versão final no prazo de 30 dias sob pena de desligamento, conforme § 2º, § 3º e *caput*, Art.13, Res. nº 033/2014.

() **SUSPENSÃO DA SESSÃO**, devendo o(a) discente satisfazer, no prazo máximo de 60 dias, às exigências listadas na Folha de Modificação anexa ao Parecer, conforme §1º, art.13, Res. 033/2014.

() **NÃO APROVAÇÃO**, *caput* do art.13, Res. 033/2014.

A sessão foi encerrada e eu, Gillieny de Souza Rodrigues, Secretária do PPGCIFA, lavrei esta Ata que depois de lida e aprovada será assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo discente.

Manaus (AM), 10 de junho de 2020.

Banca Examinadora:

Doutor(a) ...Veridiana Vizoni Scudeller.....
(Presidente – UFAM)

Doutor(a) Sônia Sena Alfaia.....
(Membro Titular – INPA)

Doutor(a) ...Edson José Vidal da Silva.....
(Membro Titular – USP)

Ciência do Discente :

Assinatura

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio de sempre e por acreditar no meu sonho de trabalhar na Amazônia. Em especial, à minha mãe, Maria Beatriz, pelo exemplo de força e perseverança.

Ao Rodrigo, por estar ao meu lado e me ajudar a superar as dificuldades que apareceram pelo caminho. Também à sua família, por me acolher como parte dela.

Aos meus orientadores, professora Veridiana Vizoni Scudeller e professor Afrânio Ferreira Neves Junior, pela dedicação à pesquisa e ao meu aprendizado. Em especial à professora Veridiana, por acolher meu projeto desde o início, pela parceria.

Aos moradores da RDS do Uatumã, por me receberem em suas casas, compartilharem suas histórias e conhecimentos que enriqueceram esta pesquisa. Em especial, agradeço ao Alcir, Alcimar, Júnior, Gil, Elinó e Ernesto, que acompanharam a expedição pela Reserva e guiaram toda a equipe pelas florestas do Rio Uatumã.

Às queridas Sara e Adriana, pelo interesse na pesquisa, amizade e imensurável ajuda com as coletas de solo em campo. Não teria conseguido sem a ajuda de vocês!

Aos parceiros do Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia (IDESAM), pela oportunidade de conhecer o seu trabalho na RDS do Uatumã e por todo apoio ao desenvolvimento da pesquisa. Em especial, agradeço ao Jefferson pelo apoio essencial no planejamento e execução das atividades de campo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de mestrado.

Por fim, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Amazonas (PPG-CIFA/UFAM), pela oportunidade de formação e de concluir minha formação no nível de mestrado.

RESUMO

Em regiões tropicais, a agricultura itinerante é uma importante prática de cultivo para subsistência de populações rurais. Apesar das bases na sucessão ecológica, na Amazônia, a tendência de intensificação de ciclos de cultivo leva à degradação da paisagem, reduzindo a provisão de serviços ecossistêmicos. Sistemas agroflorestais (SAF) são práticas de cultivo que permitem a recuperação de áreas degradadas, trazendo melhorias para o solo e qualidade de vida para comunidades rurais amazônicas. Presente em estratégias de políticas públicas para o desenvolvimento de base, o sucesso dos SAF depende de fatores relacionados a características do ambiente, práticas de manejo adotadas, conhecimento e percepções pessoais. Nesse contexto, objetivamos avaliar os impactos da implantação de SAF em áreas degradadas da RDS do Uatumã na provisão de serviços ecossistêmicos. Foram abordadas duas frentes metodológicas: análise da percepção de agricultores sobre a adoção da prática; e análise dos efeitos da prática agroflorestal em atributos químicos e físicos do solo. Ainda, buscamos o melhor método indireto para mensurar a contribuição dos plantios no acúmulo de biomassa acima do solo. Notamos que as famílias reconhecem benefícios ambientais – em especial, melhorias no solo, que também ficaram evidentes nos resultados de análises químicas e físicas. Poucos identificaram melhorias relacionadas à subsistência e renda. No entanto, ainda que melhorias sejam identificadas, o rápido retorno financeiro a partir das roças de mandioca confere vantagem em relação ao SAF. O plantio concomitante dos cultivos (tradicional e agroflorestal) é uma estratégia para combinar melhorias na produtividade do solo e provisão de benefícios.

PALAVRAS-CHAVE: Agricultura itinerante; solos improdutivos; percepção ambiental; biomassa; Amazônia Central.

ABSTRACT

In the tropical region, shifting cultivation is an important practice for subsistence to rural populations. Besides its basis on ecological succession, in the Amazon, the tendency for intensification of cultivation cycles leads to landscape degradation and to reduction of ecosystems services provision. Agroforestry systems (AFS) are cultivation practices that allow the recovery of degraded land, improving soil and life quality for rural communities in Amazonia. AFS are present in public policy strategies for rural development and its success depends on factors related to environmental characteristics, adopted management practices, knowledge and personal perception. In this context, we aim to assess impacts of AFS implantation in degraded areas of RDS do Uatumã in the provision of ecosystems services. Two work fronts were addressed: analysis of farmers' perception about the practice; and analysis of agroforestry practices effects on chemical and physical soil attributes. Yet, we searched for the best indirect method to estimate the contribution of the AFS to aboveground biomass accumulation. We noticed that the families acknowledge environmental benefits – especially in the soil, which were also evident from chemical and physical soil analyzes. Few of them identified subsistence or income improvements. However, despite the identified benefits, the short term financial return from cassava fields brings more advantage in relation to AFS. Simultaneous cultivation (traditional and AFS) is a strategy to combine the improvement of both soil productivity and benefits provision.

KEYWORDS: Shifting cultivation; unproductive soil; environmental perception; biomass; Central Amazon.

SUMÁRIO

PREÂMBULO	1
REFERÊNCIAS.....	4
CAPÍTULO I	7
1. INTRODUCTION.....	10
2. MATERIALS AND METHODS	11
2.1. Study site.....	11
2.2. Data collection and analysis	14
3. RESULTS AND DISCUSSION	15
3.1. Shifting cultivation in the RDSU	15
3.1.1. History of productive activities of families	15
3.1.2. Frequency of cycles and fallow period.....	15
3.1.3. Improvements observed in the soil.....	18
3.2. AFS management practices.....	18
3.2.1. Activities and frequency of interventions.....	18
3.2.2. Adoption of agroforestry practices.....	20
3.3. Impacts of agroforestry systems.....	22
3.3.1. Problems	22
Fig.6. Positive aspects related to AFS according to the number of answers (n=46)....	24
3.3.3. Expectations about AFS	24
3.4. AFS versus traditional agriculture	26
4. CONCLUSION	29
APPENDIX A.....	34
APPENDIX B.....	35
CAPÍTULO II.....	36
1. INTRODUÇÃO.....	39
2. MATERIAIS E MÉTODOS	41
2.1. Sítio do estudo.....	41
2.2. Coleta de dados.....	43
2.2.1. Caracterização química e física do solo	43
2.2.2. Fatores intrínsecos.....	45
2.3. Análises estatísticas.....	45
3. RESULTADOS	46

3.1. Características dos solos analisados.....	46
3.1.1. Atributos químicos do solo	47
3.1.2. Atributos físicos do solo	49
3.2. Comparação de características do solo dos três ambientes.....	50
3.3. Fatores de influência no solo dos SAF	52
3.3.1. Fatores extrínsecos	52
3.3.2. Fatores intrínsecos.....	54
4. DISCUSSÃO	54
4.1. Características gerais do solo	54
4.1.1 Propriedades químicas.....	54
4.1.2. Propriedades físicas do solo.....	56
4.2. Contraste de características do solo entre AF, FM e R.....	57
4.3. Fatores de influência no solo dos SAF	60
4.3.1. Fatores intrínsecos e extrínsecos.....	60
4.4. Recomendações para o cultivo de SAF na RDSU.....	61
CONCLUSÃO.....	62
APÊNDICE A	69
APÊNDICE B.....	70
CAPÍTULO III	72
1. INTRODUCTION.....	75
2. MATERIALS AND METHODS	77
2.1. Agroforestry Systems of the RDSU.....	77
2.2. Database.....	79
2.3. Equations and Variables for Above-Ground Biomass Predictions.....	79
2.4. Prediction of Above-Ground Biomass and Evaluation of the Preselected Equations	79
2.5. Statistical analyses	80
3. RESULTS	80
3.1. Above-Ground Biomass.....	80
4. DISCUSSION.....	83
4.1. Criteria for Selection	83
4.1.1. Simple or double entry?.....	83
4.1.2. Sample and environment characteristics	84

4.1.3. Can wood density reduce estimate unreliability?.....	85
4.1.4. Statistics criteria	86
4.2. Importance of the Measurement Protocol.....	86
4.3. How to Choose the Best Method?	87
CONCLUSION	88
CONCLUSÕES GERAIS	93

PREÂMBULO

Evidentes mudanças no sistema climático e em sistemas naturais do planeta estão relacionadas à atividade humana e o aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera (IPCC, 2014). Até o fim do século, é esperado um aumento de frequência e intensidade de eventos climáticos extremos (i.e. secas e cheias prolongadas e/ou fora de época) em diferentes regiões do planeta (IPCC, 2014). Tais mudanças impactam a manutenção da biodiversidade dos ecossistemas, o bem estar e a saúde humana, e aumentam a vulnerabilidade a desastres naturais (MEA, 2005).

A terra é um recurso essencial para a humanidade. Além da relevância na provisão de alimentos, é meio de subsistência para bilhões de pessoas (SMITH et al., 2014). Na Amazônia brasileira, atividades de conversão da vegetação têm responsabilidade histórica na degradação de recursos naturais (PORRO, 2009).

A agricultura itinerante é uma das principais formas de produção de subsistência em populações rurais e de pequenos produtores nas zonas de florestas tropicais (RIBEIRO FILHO et al., 2013). Basicamente, é caracterizada pela sequência das fases de conversão, cultivo e pousio, onde a conversão inclui práticas como corte e queima da vegetação nativa (KLEINMAN et al., 1995). Apesar de reunir conceitos de sucessão ecológica, adotando um período de pousio para regeneração da vegetação (KLEINMAN et al., 1995), nas últimas décadas, é observada a tendência de intensificação de cultivo na região, resultado do aumento populacional e demanda por produtos da agricultura (JAKOVAC et al., 2017). Com a redução do período de pousio, o potencial de produção de serviços ambientais é reduzido (JAKOVAC et al., 2017). Como resultado, a sustentabilidade do sistema tradicional de cultivo é comprometida.

Com um crescente destaque em programas de políticas públicas, sistemas agroflorestais (SAF) são estudados como estratégias para fomentar o desenvolvimento

integrado de paisagens rurais em regiões tropicais (PORRO, 2009). A prática agroflorestal tem origem em práticas antigas de cultivo (NAIR, 1993) e caracterizam-se pela viabilização de um manejo dinâmico e ecológico dos recursos naturais, e por isso, são apresentados como uma alternativa produtiva e sustentável para os diferentes contextos amazônicos (PORRO, 2009).

Práticas agroflorestais contribuem para a produção de múltiplos serviços ecossistêmicos: serviços de provisão, como fonte de matéria prima, alimento e combustível; serviços culturais, relacionados à estética da paisagem, uso recreativo e religioso; e serviços de regulação e apoio, como conservação da biodiversidade, sequestro de carbono, produção de biomassa, ciclagem de nutrientes e melhoria da qualidade do ar e da água (NAIR, 1993; MEA, 2005a; SCHWAB et al., 2015).

Entre os serviços ambientais providos pela prática agroflorestal, a melhoria da qualidade e produtividade do solo é considerada a principal, uma vez que a geração de outros benefícios ecossistêmicos depende da saúde do solo em longo prazo (JOSE, 2009; DOLLINGER; JOSE, 2018). A adoção do estrato arbóreo no sistema de cultivo confere vantagens na manutenção da produção em períodos ambientais extremos, de clima muito seco ou muito úmido (VERCHOT et al., 2007). Entre os principais efeitos benéficos do seu cultivo, são citados a manutenção e aumento da matéria orgânica, fixação de nitrogênio, disponibilização e redução da perda de nutrientes do solo, manutenção da água do solo e disponibilidade de água (NAIR, 1993).

Por estar associado a uma extensa capacidade de captação e utilização de recursos, quando comparado a sistemas menos diversos, (e.g. como monoculturas e pastagens), o cultivo agroflorestal oferece grande potencial para produção de biomassa e sequestro de carbono (NAIR et al., 2010; JOSE; BARDHAN, 2012). Apesar disso, não são contabilizados em orçamentos nacionais ou globais de carbono (ABBAS et al., 2017), o que se deve à

ausência de mecanismos para compreensão e quantificação, como acontece para outros serviços ecossistêmicos providos por agroflorestas (JOSE, 2009; KUMAR; NAIR, 2011).

Portanto, impactos gerados pelo cultivo agroflorestal são específicos e a provisão de serviços depende da influência de diversos fatores. Tais fatores podem ser extrínsecos, relacionados ao ambiente (i.e. condições de solo, umidade e temperatura) ou intrínsecos, relacionados à prática em si e à percepção do seu uso como ferramenta (NAIR et al., 2009; POWER, 2010). Compreender esses impactos e fatores permite projetar resultados e benefícios da ferramenta (POWER, 2010; MURTHY et al., 2016) e apostar na construção de políticas e estratégias coerentes para o uso da terra e dos recursos naturais (POLASKY, 2008).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar sistemas agroflorestais como ferramentas de recuperação de propriedades físicas e químicas do solo e provisão de serviços ecossistêmicos em áreas degradadas da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã (RDSU), Amazonas. Para atingir este objetivo, são adotados os seguintes objetivos específicos: (i) registrar as expectativas e percepções dos moradores da RDS do Uatumã sobre a conversão de áreas degradadas em sistemas agroflorestais; (ii) avaliar o papel dos SAF como ferramenta de recuperação da produtividade do solo e geração de benefícios; (iii) correlacionar variáveis físicas e químicas do solo com o uso da terra (SAF, cultivo tradicional de roças de mandioca e floresta madura); (iv) correlacionar variáveis físicas e químicas do solo com variáveis extrínsecas (textura do solo) e intrínsecas (histórico de uso do solo, idade do plantio, práticas de manejo) associadas aos SAF; (v) escolher o método indireto mais adequado para estimar o estoque de biomassa acima do solo dos SAF da RDS do Uatumã.

Os SAF objetos deste estudo fazem parte da iniciativa do Programa Carbono Neutro (PCN), um projeto do Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia

(IDESAM). Por meio da implantação de SAF, o projeto tem como objetivo recuperar de áreas degradadas e contribuir para o desenvolvimento de uma agricultura baixa emissão na RDSU (IDESAM, 2018). Até 2019, o projeto foi responsável pelo plantio de 35 sistemas agroflorestais, que somam uma área de mais de 30 hectares de SAF implantados na Reserva. Os SAF estudados foram implantados em unidades rurais de moradores da RDSU e possuem idade entre três meses e oito anos. O modelo dos plantios foi estabelecido pelo IDESAM, incluindo espécies arbóreas leguminosas, madeireiras e frutíferas escolhidas a partir da demanda dos agricultores.

O documento apresentado é composto de três capítulos independentes, que se baseiam em diferentes abordagens para o estudo dos SAF da RDSU. No **Capítulo I**, por meio da óptica da percepção ambiental, objetivamos entender o papel desses sistemas na recuperação do solo e geração de serviços ecossistêmicos de provisão e regulação.

O **Capítulo II** traz resultados da investigação do impacto dos SAF nas características químicas e físicas do solo. Para isso, são comparadas as condições do solo de plantios de SAF, áreas de floresta natural e roças de mandioca. Ainda, buscamos identificar que fatores (extrínsecos ou intrínsecos) influenciam características do solo nos SAF.

Por fim, o **Capítulo III** define o método indireto mais adequado para estimar a biomassa acima do solo nos plantios de SAF estudados. Para auxiliar a tomada de decisão de iniciativas semelhantes, é compartilhado o processo decisório para escolha do melhor método com base em critérios qualitativos.

REFERÊNCIAS

ABBAS, F. et al. Agroforestry: a sustainable environmental practice for carbon sequestration under the climate change scenarios—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, n. 12, p. 11177-11191, 2017.

DOLLINGER, J.; JOSE, S. Agroforestry for soil health. *Agroforestry Systems*, v. 92, s/n, p. 1-7, 2018.

INSTITUTO DE CONSERVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA

AMAZÔNIA – IDESAM, 2020. *Programa Carbono Neutro*. Disponível em: <<https://idesam.org/carbononeutro/>>. Acesso em: 26 abr. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.

JAKOVAC, C.C. et al. Spatial and temporal dynamics of shifting cultivation in the middle-Amazonas river: Expansion and intensification. *PLoS one*, v. 12, n. 7, 2017.

JOSE, S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry systems*, v. 76, n. 1, p 1-10, 2009.

JOSE, S.; BARDHAN, S. Agroforestry for biomass production and carbon sequestration: an overview. *Agroforestry Systems*, v. 86, n. 2, p. 105-111, 2012.

KLEINMAN P. J. A.; PIMENTEL D.; BRYANT, R. B. The ecological sustainability of slash-and-burn agriculture. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 52, n. 2–3, p. 235-249, 1995.

KUMAR, B. M.; NAIR, P.K. R. (Ed.). *Carbon sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges*. Springer Science & Business Media, 2011.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MA. *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MA. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute, 2005a.

MURTHY, I.K. et al. Impact of agroforestry systems on ecological and socioeconomic systems: a review. *Glob J Sci Front Res: H Environ Earth Sci*, v. 16, n. 5, p. 15-27, 2016.

NAIR, P. K. R. *An introduction to agroforestry*. Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers, 1993.

NAIR, P. K. R. et al. Carbon sequestration in agroforestry systems. In: SPARKS, D. S. (Eds.). *Advances in agronomy*, v. 108. Academic Press, 2010. p. 237-307.

NAIR, P. K. R.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science*, v. 172, n. 1, p. 10-23, 2009.

POLASKY, S. What's nature done for you lately: measuring the value of ecosystem services. *Choices*, v. 23, n. 316-2016-6894, p. 42-46, 2008.

PORRO, R. Expectativas e desafios para adoção da alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação. In: PORRO, R (Ed. Tec.). *Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação*. Brasília-DF: Embrapa Informação e Tecnologia, 2009. pp.33-51.

POWER, A.G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, v. 365, n. 1554, p. 2959-2971, 2010.

RIBEIRO FILHO, A. A.; ADAMS, C.; MURRIETA, R. S. S. The impacts of shifting cultivation on tropical forest soil: a review. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, v. 8, n. 3, p. 693-727, 2013.

SCHWAB, N.; SCHICKHOFF, U.; FISCHER, E. Transition to agroforestry significantly improves soil quality: A case study in the central mid-hills of Nepal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 205, p. 57-69, 2015.

SMITH, P. et al. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: IPCC. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK e New York, USA: Cambridge University Press, 2014. p. 813–922.

VERCHOT, L. V. et al. Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, v. 12, n. 5, p. 901-918, 2007.

Goulart, I.C.G.; Neves Junior, A.F.; Scudeller, V.V. 2020. Do agroforestry systems improve environmental and social benefits? A case study of the Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã. Manuscrito em preparação para o periódico *Environmental Science and Policy*.

Do agroforestry systems improve environmental and social benefits? A case study of the Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã

Isabele Cristine Garcia Goulart^{1*}, Afrânio Ferreira Neves Junior¹, Veridiana Vizoni Scudeller^{1*}

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do

Amazonas, Manaus, Amazonas, Brazil, e-mail: isabelecgoulart@gmail.com,

anevesjr@gmail.com, vscudeller@ufam.edu.br

* Correspondence author

ABSTRACT

In the tropics, shifting cultivation is one of the causes of natural forests conversion. Besides its basis on ecological succession, the tendency for intensification of cultivation cycles in the Amazon region, what leads to landscape degradation and to reduction of ecosystems services provision. Agroforestry systems (AFS) are cultivation practices that allow the recovery of degraded land, improving soil and life quality of rural communities. Although present in rural development strategies and public policies, benefits and services provision of AFS depends on factors related to environmental characteristics, adopted management practices, knowledge and personal perception. In this context, under the optics of environmental perception, the present study aims to assess the impacts of AFS implantation in the recovery of degraded areas and ecosystems services provision in an Amazonian conservation unit. We noticed that families recognize environmental services such as maintenance of soil humidity and fertility; however, provisions of food or income were identified by only a few of interviewed farmers and are the main expectation related to AFS. The prompt financial return of cassava crops gives it an advantage over the AFS, justifying investment in workforce and time. Thus, as a strategy to environmental, production and working conditions improvements, it is suggested the simultaneous growing of both traditional and agroforestry cultivation systems as opposed to the planting of AFS after soil exhaustion.

KEYWORDS: Forest conversion; environmental perception; slash-and-burn agriculture; cassava flour; Central Amazonia

1. INTRODUCTION

The soil is an essential resource for humanity. In addition to its relevance for the provision of food and products, it is a means of subsistence for billions of people and plays an important role in the development of populations in the planet (Smith et al., 2014). In the Brazilian Amazon, vegetation conversion and extensive land use activities have historically caused the degradation of natural resources (Porro, 2009). In the last decades, 12% of the forests in the Legal Amazon have been converted into agricultural lands, whether for pasture or agriculture (MapBiomas, 2019).

Shifting cultivation is one of the forms of subsistence production of rural populations and small producers in the tropics (Ribeiro Filho et al., 2013) and an important factor in transforming land use in these regions (Van Vliet et al., 2012), including the Amazon (Van Vliet et al., 2013; Jakovac et al., 2017). This productive system is characterized by a sequence of conversion, cultivation, and fallow phases. Conversion includes practices such as cutting and burning the native vegetation (Kleinman et al., 1995). During fallow, the cultivated area is abandoned to allow the regeneration of natural vegetation. In this period the soil recovers after cultivation cycles, ensuring the productive sustainability of the system (Kleinman et al., 1995; Ribeiro Filho et al., 2013). However, there has been a tendency to shorten the fallow period in this region in recent decades (Jakovac et al., 2017). This intensification negatively influences the production potential of environmental landscape services, such as soil productivity, compromising the sustainability of the traditional cultivation system (Jakovac et al., 2017).

With a growing emphasis on public policy programs, agroforestry systems are strategies to foster integrated landscape development in the tropics (Porro, 2009). Based on the idea that trees are essential parts of natural ecosystems (Murthy et al., 2016), agroforestry practices contribute to the production of multiple ecosystem services, including regulation

services to improve landscape productivity (Nair, 1993; MEA, 2005; Schwab et al., 2015). AFS are designed to maximize interactions between arboreal and non-arboreal components (Murthy et al., 2016). The incorporation of trees provides advantages in maintaining production during very dry or very humid periods. They moderate the effects of rising temperatures, making farmers more apt to deal with the effects of global climate change (Verchot et al., 2007; Torralba et al., 2016).

The benefits associated with AFS may be improved soil productivity (Murthy et al., 2016) and higher food production, in addition to improvements in financial aspects (Kidd and Pimental, 1992). However, the development of agroecosystems and the provision of services depend on factors such as management practices, species, geographical location, site characteristics, and institutional arrangements (Kidd and Pimental, 1992; Nair et al., 2009; Power, 2010). The resulting impacts are specific, and understanding them allows estimating possible outcomes (Power, 2010; Murthy et al., 2016). Thus, it is interesting to invest in drafting coherent policies for the use of land and natural resources (Polasky, 2008).

In this study, we analyze expectations and perceptions of residents of the Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã (RDSU) about the conversion of extremely degraded areas into agroforestry systems. Under the perspective of environmental perception, we aim to understand the role of these systems as tools for cultivation and provision of ecosystem services focusing on recovering soil productivity and generating benefits.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study site

The RDSU is a sustainable conservation unit created in 2004 (Amazonas, 2004). This unit is located 300 km from Manaus in the northeast of the state of Amazonas, Brazil, between the municipalities of Itapiranga and São Sebastião do Uatumã (2°18'13.5" S, 58°39'01.8" W).

With a total area of 424,430 hectares, RDSU is home to around 260 families and 1,300 inhabitants spread over 20 communities located on the banks of the Uatumã, Caribi and Jatapu Rivers (Amazonas, 2009). Fishing, extractivism, and agriculture are among the main activities this community develops. The cultivation of cassava for flour production is an important source of income and subsistence for many families (Amazonas, 2009).

AFS plantations are an initiative of the Carbon Neutral Program (PCN), created in 2010 by the Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia (IDESAM). The PCN aims to contribute to the development of low-emission agriculture, ensuring food security and income for RDSU residents (Idesam, 2020). Until 2019, the project was responsible for the implementation of 35 agroforestry systems in unproductive areas, amounting to more than 30 hectares of AFS. Of the RDSU's 35 AFS, we selected 17 AFS implanted between 2011 and 2019 (Fig. 1; Appendix A), meeting the following criteria: continuity of post-implantation activities, permanence of the person responsible for the AFS in the reserve, and availability to participate in the research.

AFS were planted with joint efforts from PCN's technicians and residents of each community, following a pre-defined model designed by IDESAM (Idesam, 2020), interspersing leguminous, timber, and fruit tree species (Fig. 2). The species set varied according to the profile and demand of each farmer. The main species are *Inga spp.*, *Euterpe spp.*, *Theobroma spp.*, *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd., *Carapa guianensis* Aubl., *Aniba rosaeodora* Ducke, *Couratari tauari* O. Berg and *Bertholettia excelsa* Bonpl. *Inga spp.* was the first species planted in the area as a soil preparation practice. After planting, the cultivation of AFS becomes the responsibility of each farmer.

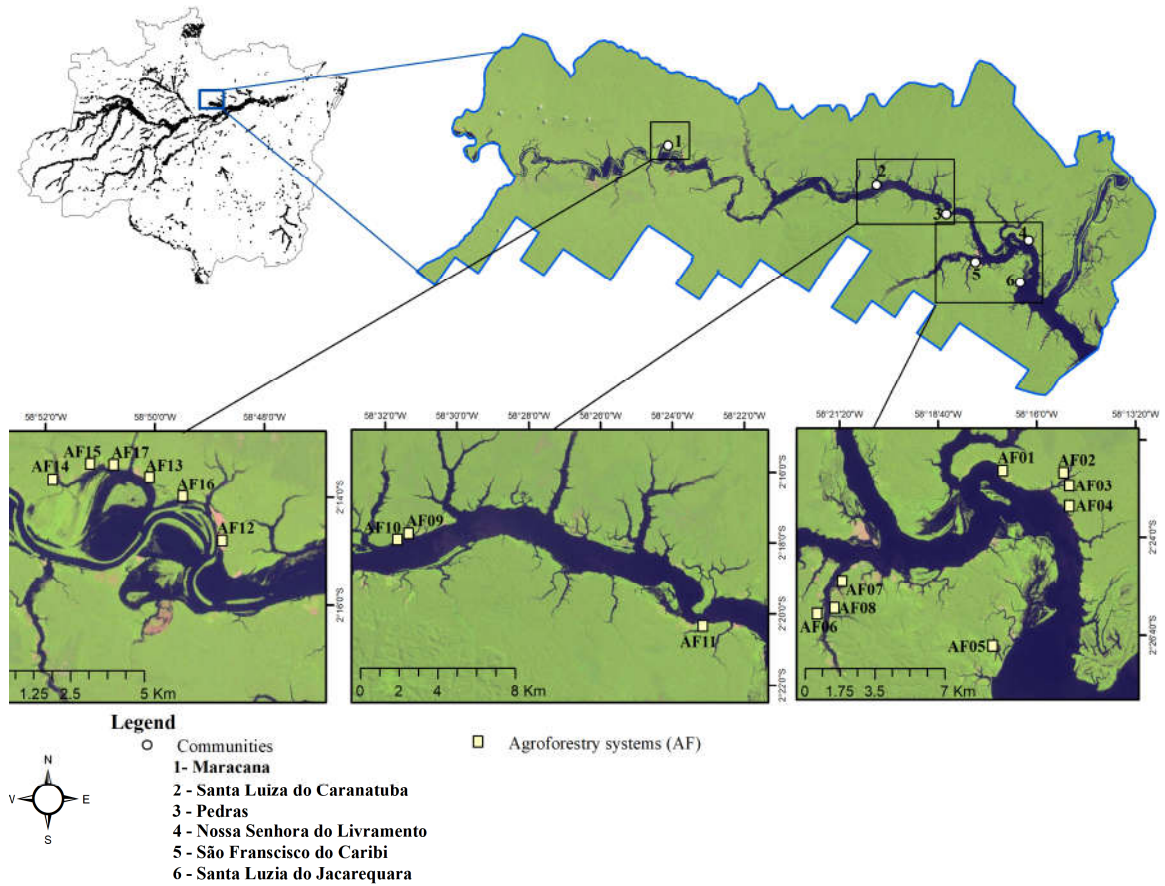


Fig.1. Study area in the Legal Amazon, location of RDSU communities and studied AFS.

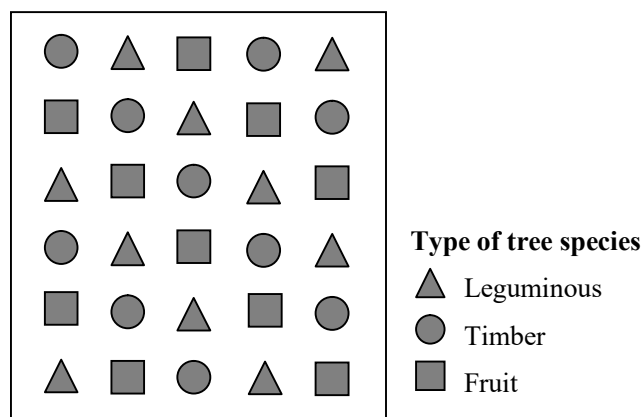


Fig.2. Interspersion scheme for AFS planting at RDSU.

2.2. Data collection and analysis

Semi-structured interviews (n = 17) were conducted from July to October 2019 with the person responsible for each AFS (Appendix A). The questions focused on the residents' perception of changes and impacts after the system was implemented. The following groups of questions were adopted: 1) history of land use in the area, 2) history of productive activities, 3) objectives for adopting the cultivation system, 4) intensity of crop treatment, and 5) impacts generated by the adoption of the cultivation system. Each group comprised a series of questions that sought to contribute to the understanding of each theme (Appendix B).

All respondents signed an informed consent (IC) previously approved by the Research Ethics Committee of the Federal University of Amazonas (CEP/UFAM - CAAE no. 09945519.0.0000.5020). All interviews were conducted in person and always by the same person, who took notes and recorded the audio with the participants' authorization.

After transcription, the answers were tabulated and coded. From text matrices, the data were condensed for general analysis (Huberman and Miles, 1994, *apud* Amorozo and Viertler, 2010). Juxtaposed, the data were compared seeking to summarize contents, find patterns, form categories, and look for positive and negative evidence for each theme according to the guidelines of Amorozo and Viertler (2010). Seeking to multiply data sources and ensure information validity (Amorozo and Viertler, 2010), part of the answers was compared to information from the PCN technical team.

To present quantitative results, relative percentages of occurrence in each category were adopted. The relation between quantitative data was determined by linear regression and evaluation of the coefficient of determination (r^2). The management intensity adopted in each AFS were classified as low (interval between interventions up to three months), moderate (interval between three and six months), high (interval between six and nine months), or very high (interval longer than nine months), based on farmers' reports on the interviews.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Shifting cultivation in the RDSU

3.1.1. History of productive activities of families

Among interviewees, 65% produce cassava and byproducts as part of the family income, which is also composed of other activities, such as the production of seedlings (29%), cultivation of perennial species outside the AFS area (18%), and extractivism (12%). Part of the families (18%) complements the income with public service salaries or benefits (retirement) and 12% of families by education services.

As in other riverside regions of the state of Amazonas (Van Vilet et al., 2013; Jakovac et al., 2017), residents of the RDSU use shifting cultivation as a form of cultivation. Cassava is the main product in plantations usually associated with crops such as bananas, watermelons, and squash.

The current method for cultivating and obtaining cassava products are traditional practices of the family history of most interviewees, since 82% of them reported have worked in the fields of their parents or family even before they arrived at the RDSU. Cassava is the main source of income for 41% of the interviewees' families. Even those who do not depend on their production as a source of income use it for family food – the tuber and its byproducts are part of the diet of 76% of respondents. This information reflects the cultural importance of the plant in the region (Adams et al., 2006; Donatti et al., 2011), as verbalized by 12% of respondents.

3.1.2. Frequency of cycles and fallow period

At RDSU, 47% of respondents stated that cassava plantation can be grown in a same area for a maximum of three years without a decrease in cassava productivity or vigor. For

24% of respondents, from the third cycle (i.e., three years), the cassava root does not reach the required proportion or quality for flour production.

6% of interviewees observed that when cassava is planted in a newly opened area, just after cutting and burning the natural vegetation, it is possible to cultivate it for four cycles. This effect is associated with the availability of nutrients provided by the burning of plant material, increasing soil fertility in the short term (Kleinman et al., 1995). However, in the long run, this process can lead to soil degradation through loss of nutrients and increased exposure to rainfalls and high temperatures, limiting plant development (Kleinman et al., 1995). For the interviewees, this is observed by the decrease in cassava productivity after consecutive cultivation cycles, as reported below:

It is only possible to plant two crops after [the fallow], because it's weak, it's not like in the forest, where you plant four times. You plant four times and then don't plant anymore, because the land will get weak and won't give us production as gave before. So it means that if you turn to plant there again, there will be only loss. (AF15, M).

The land only bears it two years [of cassava crops cultivation], then the land gets weak. (AF10, F).

After consecutive planting and harvesting cycles, the interviewed families leave the cultivated area at rest (fallow period) for a period that varies between one and twelve years. That is when secondary vegetation (Kleinman et al., 1995), locally known as “capoeira”, grows. For 24% of respondents, this period is between four and six years at most, but it can vary from one to three years for 18% of respondents and from ten to twelve years for 12%.

Most respondents (55%, n = 11) adopt five years of fallow as the maximum period of soil rest, corroborating observations by Jakovac et al. (2017). The authors analyzed the spatial and temporal dynamics of shifting cultivation in the region of the middle Amazon River and observed a reduction in fallow time from 6.4 years (average for the period 1987-2000) to 5.1 years (2001-2014). According to the authors, this reduction indicates a trend towards intensification of traditional crops in riverside regions, which may be associated with

increased population density, restricted access to new areas, and increased production demand. In our study, the short periods of fallow seems to be related to low availability of land due restrictions imposed with the proposal of the RDSU, which limits the area of natural vegetation that can be open by each family (Amazonas, 2009).

As a result of an intensified cultivation, with shorter fallow periods and an increased frequency of productive cycles, younger secondary forests tend to predominate in the landscape (Jakovac et al., 2017). Compared to older fragments, they play a limited role in the provision of services such as carbon stock (Kauffman et al., 2009), supply of forest products, and maintenance of biodiversity (Dalle and Blois, 2006). Thus, the potential for the provision of ecosystem services for integrated landscapes decreases, putting the sustainability of shifting cultivation at risk (Jakovac et al., 2017).

Despite the importance of the fallow period to maintain soil productive conditions that sustain crops growth in shifting cultivation (Kleinman et al., 1995), from the point of view of those who need the land to produce and generate income, it is a period when the land is no longer a source of production. This may justify the tendency of intensifying crops and reducing fallow periods in the RDSU, as observed for the middle Amazon region (Jakovac et al., 2017).

The use of appropriate management practices can mitigate the negative impacts of agriculture and maintain important provision services (Power, 2010). Used as a multifunctional tool for landscape management (Jose, 2009), AFS can contribute to reducing the negative effects of crops on the soil (Kidd and Pimental, 1992). These systems allow the cultivation of multiple species (Nair, 1993) and can be a source of subsistence and income (Nair, 1985). Agroforestry cultivation is regarded as a potential source of products and income, as verbalized in the speech of one of the interviewees:

I was supposed to let five or six years go by before we work with it [the land]. But this way [with AFS], I am working on it nonstop. (AF03, M).

3.1.3. Improvements observed in the soil

For 47% of respondents, there were improvements in the development of plants after the implementation of the AFS. Changes were also observed in relation to increased soil fertility (41% of respondents), soil moisture (35%), and improvements associated with the accumulation of organic material on the soil (29%). By improving soil properties, AFS increase land productivity (Murthy et al., 2016). Considered one of the main services provided by the system, maintaining soil productivity allows generating other ecosystem services (Jose, 2009; Dollinger and Jose, 2018).

For 41% of the interviewees, the improvements observed in the soil were related to the cultivation of *Inga* spp, species planted to incorporate organic material and improve soil fertility, a common practice in tropical AFS (Murthy et al., 2016). In most cases, planting was performed months before other species in order to prepare the soil. According to some studies (Kumar et al., 1998;Forrester et al., 2006), the combination of tropical timber and nitrogen fixing species result in better development in relation to homogeneous plantations (i.e., with only one tree species).

3.2. AFS management practices

3.2.1. Activities and frequency of interventions

The most common activities used by the interviewed farmers for the maintenance of AFS are the control of grass competition (100% of interviewees), pruning of *Inga* spp. to incorporate fresh matter into the soil (76%), accumulation of plant material at the base of seedlings (53%), and control of vines (35%). Some of these reflect pre-existing traditional practices (e.g., control of grass competition); while others are new techniques present by PCN for maintaining the AFS (e.g., accumulation of plant material, pruning of *Inga* spp.), what indicates that some farmers are incorporating new practices.

Almost half of the interviewees (47%) perform interventions in the AFS every two months at most. Considering the classes established by this work, this frequency is considered very high when compared to the rest of the data. Information from the PCN technical team shows divergences in relation to these data. According to technicians, only 29% maintain a very high intensity of maintenance, while the intensity is low for 24% of these families (Fig. 3).

In addition to the quality of the site, the management practices adopted by each farmer influence the development of AFS (Nair et al., 2009; Murthy et al., 2016). Therefore, different forms of care and maintenance frequencies can influence the growth of trees (Nair et al., 2009) and the quantity of products obtained.

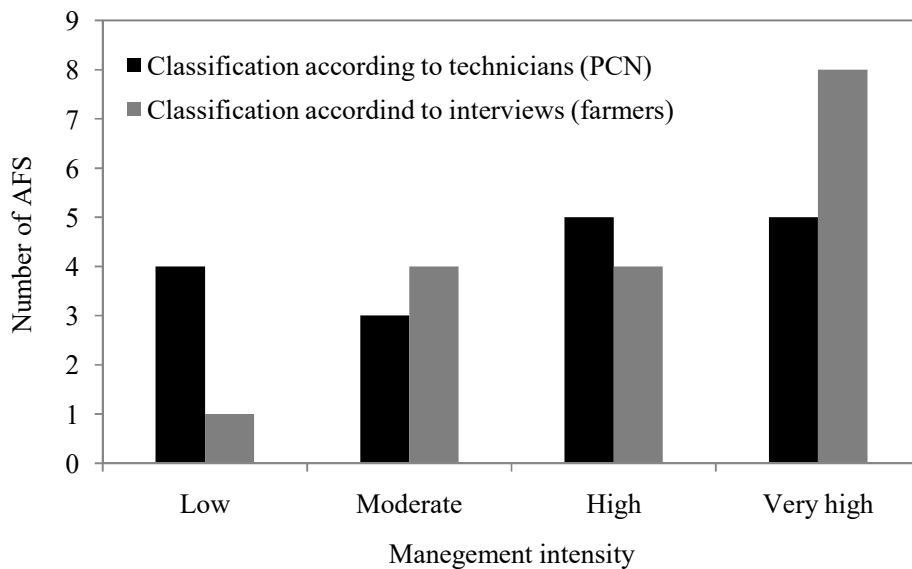


Fig.3. Management intensity applied in RDSU’s AFS classified according to minimum interval between interventions: low (<3 months), moderate (3<6 months), high (6-9 months) and very high (>9 months).

The divergence between this information indicates biases related to attempts to meet the interviewer's expectations. In this case, it may reflect a “fault” (Garrett and Sampaio, 1991) for not proceeding with the activities as expected. In situations as this, the importance

of confirming the collected information stands out by comparing this information with independent sources (Godoy, 1995; Amorozo and Viertler, 2010).

3.2.2. Adoption of agroforestry practices

Residents of the RDSU reported that the perception that the AFS of another community is in full development and generating expected benefits encourages the adoption of this practice among the others. For them, these benefits are related to obtaining products or maintaining the functioning of the environment depending on the objectives of each one, as noted in the transcript below:

In many times, there is many people that have no interest and then when they see that the [AFS] of others is growing beautifully and say "I'm going to make myself one too, because that guy planted it, his land is beautiful and there he is producing and getting income". All this is an incentive for people to stop extracting wood [from the natural forests]. (AF05, M).

According to Saha et al. (2010), social and economic benefits are decisive factors in choosing AFS as a viable alternative to the traditional cultivation system. As some farmers, technicians from the PCN observed that families that do not have AFS become interested in planting when they perceive the benefits obtained in systems already in place.

The AFS studied were implanted in areas previously occupied by clear land (53%), abandoned lands or "capoeiras" (41%), or pastures (6%), of which more than half interviewees described as unproductive areas. Since the characteristics of the site influence its development (Nair et al., 2009), the quality of the soil in these areas possibly affected the development of plantations, generating part of the reported problems (Section 3.3.1). According to the PCN team, the choice of areas was initially based on their high degree of degradation (i.e., outside the families' production process, with signs of erosion and presence of invasive species). However, by observing the importance of positive results in encouraging the adoption of practices, the PCN team began suggesting areas more suitable for the development of AFS plantations (i.e., with better soil conditions).

The total area of the AFS analyzed varies between 0.24 and 4.0 ha (1.48 ha on average). Since the moment of implementation, 65% of the interviewees have increased the planting area. Among them, 27% increased the AFS area by more than two hectares, while 36% increased the area by between one and 1.75 hectares. Another 36% increased the AFS area by up to 0.4 hectares.

The increase in AFS area may indicate an approval of the practice, which in turn is associated with the perception of benefits (Meijer et al., 2015; Saha et al., 2010). There is a subtle trend of negative relation between area increase and management intensity ($r^2 = 0.071$). That is, the greater the expansion of AFS area in relation to the initial size, the shorter the interval between interventions (Fig. 4). Thus, the expansion of the system is made only by those who perceive benefits and the possibility of economic return, justifying the investment of time and dedication to management activities.

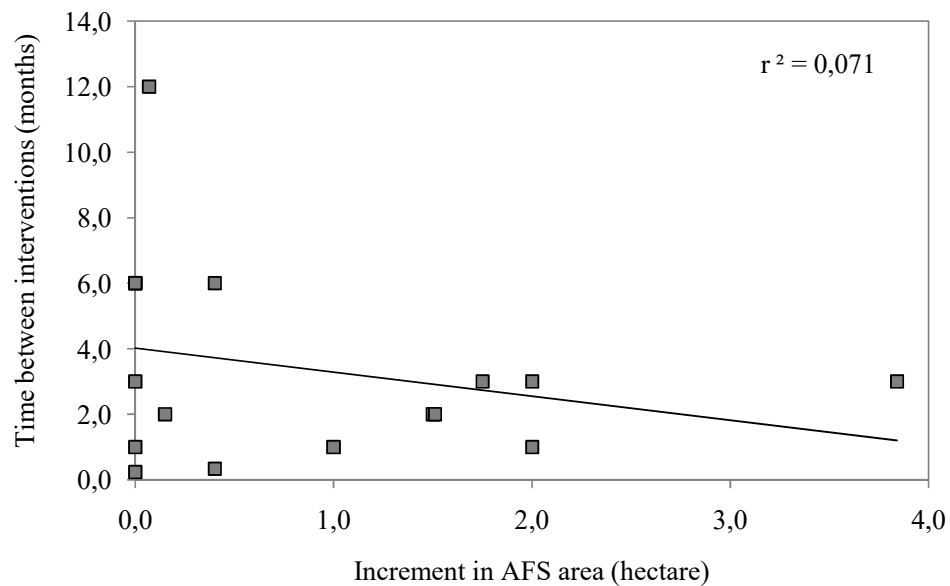


Fig.4. Increase of AFS area (difference between final and initial area, in hectares) relation to frequency of interventions according to interviews information (higher numbers mean lower management intensity and vice versa).

To increase the popularity of AFS among RDSU residents, it is important that the perception of community members be positive based on their learning (Meijer et al., 2015).

Continuous monitoring and adaptation of techniques throughout the experience can make this view more optimistic and can result in the incorporation of agroforestry into traditional practices. 12% of respondents mentioned a demand for active monitoring. They reinforced the need for guidance on appropriate management practices to ensure that benefits are obtained through the AFS.

3.3. Impacts of agroforestry systems

3.3.1. Problems

Among the problems mentioned in relation to the AFS, most related to technical failures of the project or implementation activity (Fig. 5). High seedling mortality in the field was observed by 76% of the interviewees. Such losses may reflect the site quality (e.g., soil conditions) or the procedures used in the AFS implementing activities. According to Meijer et al. (2015), such extrinsic factors related to the environment and the presented tool itself may influence farmer's decision to adopt or not agroforestry technologies.

Communication problems were highlighted as negative aspects by 18% of respondents. Examples of these problems include doubts about the responsibility for maintaining plantations and forms of financial and technical support of the PCN. Cultural differences can make it difficult to communicate and accept suggestions for practices (Fearnside, 1995). Thus, practical maintenance information must be transmitted in a clear manner, keeping expectations aligned. Fearnside (1995) suggested combining demonstrations *in situ* and the formation of a network of local farmers to transmit the information.

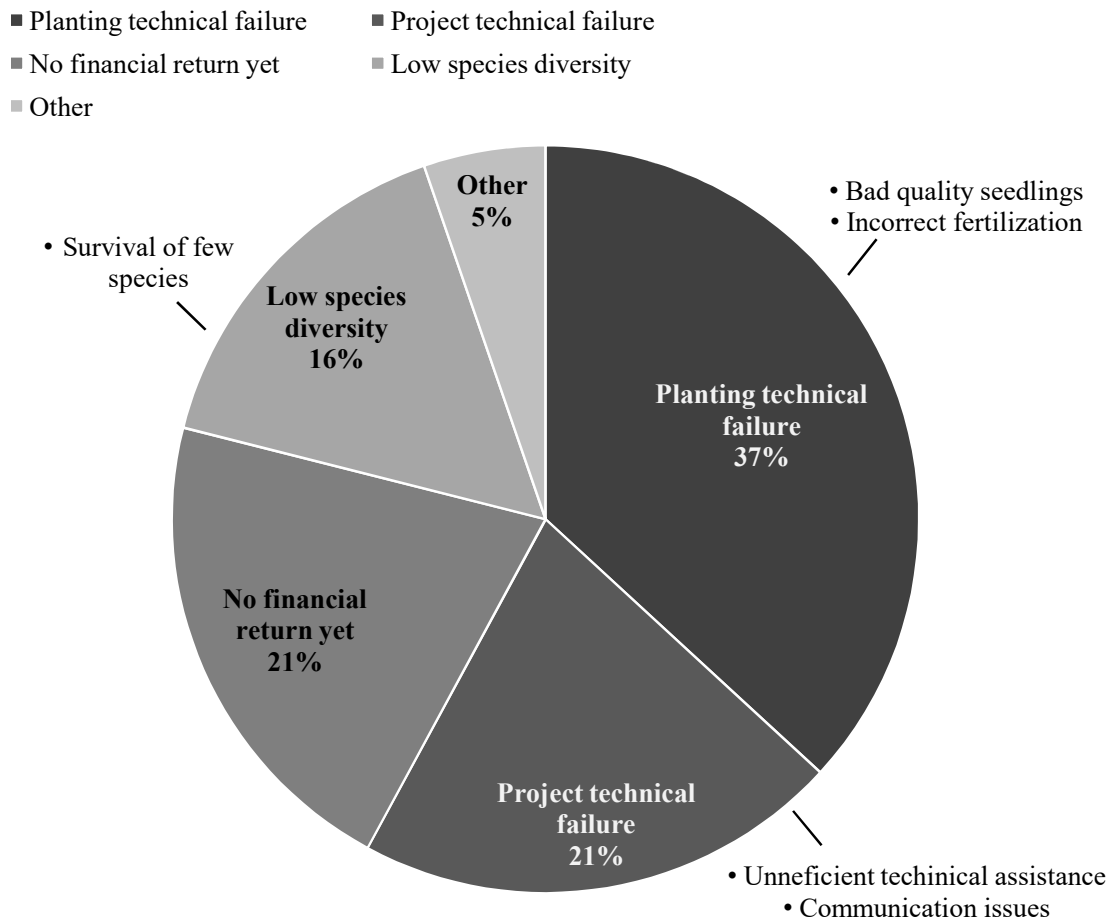


Fig.5. Negative aspects related to AFS cited during the interviews and themes grouped by category. Percentage according to the number of answers (n=19).

3.3.2. Observed changes and benefits

Perceptions about changes are related to positive aspects when comparing periods before and after the implementation of AFS. Learning is cited as the main change (41% of respondents) and is related to the assimilation of new cultivation techniques. For 18% of respondents, the main change relates to the vision on how to produce and the importance of vegetation for maintaining the environment.

Regarding the observed benefits, perspectives on improvements related to income were highlighted and are associated with obtaining products, food, and financial return in the future (Fig. 6). The mention of environmental benefits (17% of responses) may have been induced by IDESAM's frequent technical visits to the area.

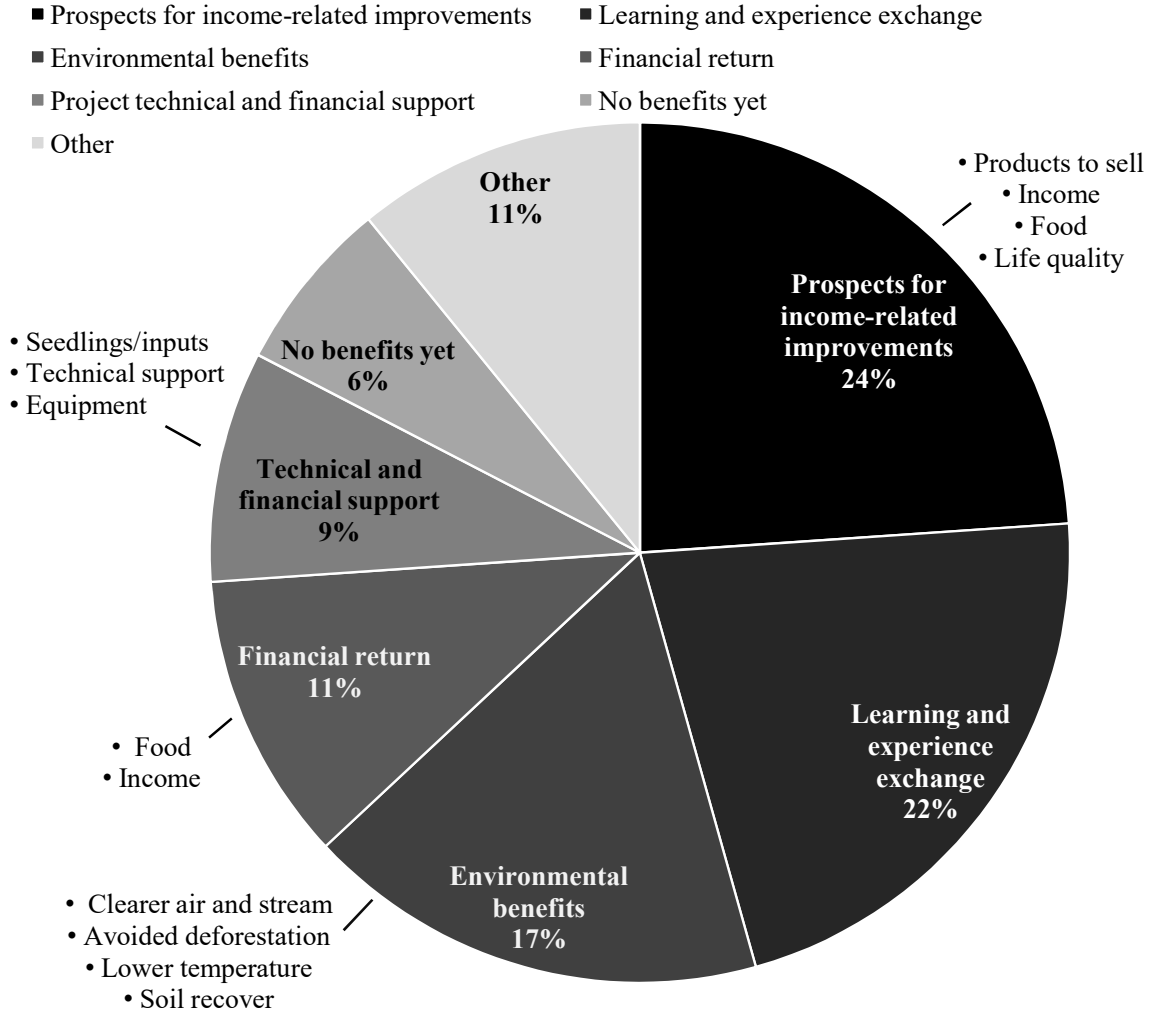


Fig.6. Positive aspects related to AFS according to the number of answers (n=46).

Part of the responses (6%) highlight that no benefits have been obtained so far. This statement refers to financial returns, reinforcing its importance and clarifying expectations of participation in the initiative (PCN). Only 11% of the responses cited the obtaining of products or income from plantations. In terms of participants, these were answers of 29% of interviewed farmers, which also reported this return as insufficient to significantly compose family's income.

3.3.3. Expectations about AFS

All respondents (100%) stated that they cultivate AFS with the objective of improving income and quality of life. This means obtaining food products for sale (53%), non-wood forest products (35%), and wood products (24%). Food supplementation (35%) and environmental improvement (12%) were also highlighted as expectations for the cultivation of AFS. Such expectations can be associated with the presentation speech of the practice, which highlights income generation and food security as benefits. Although AFS are used as tools in this context (Hillbrand et al., 2017) this discourse can be problematic. Generally, there are high expectations about the benefits of these systems as solutions to socio environmental problems in the Amazon context, which do not foresee factors such as operating costs, incentives, and market interests (Fearnside, 1995). Disregarding that the financial benefits of AFS might arise only in the long-term (Kidd and Pimental, 1992) leads to disbelief in the system and may contribute as another factor for its abandonment as a practice (Meijeir et al., 2015).

Avoiding exceeding expectations, the presentation of the AFS should focus primarily on environmental benefits (Jose, 2009; Salim et al., 2018) and how they can improve live quality and land production for the landscape. Though, it is noteworthy that these benefits depend on appropriate selection and combination of species through their functional and complementary traits (Liu et al., 2018). Such processes require time of observation in the field, which makes it difficult to make this an argument attractive enough to change the farmers' productive logic. Therefore, we propose to improve the benefits of the combination of species already tested in the AFS, as observed by residents of the RDSU.

To increase the chances for adopting the practice, it is important that farmers are involved in all phases of project designing stages, making it possible to aligning goals and expectations from both sides – presenter and receptor of the technology (Fischer and Vasseur, 2002; Mekoya et al., 2008). Considering the studied AFS at RDSU, although farmers are

included in the processes of planting and selecting tree species, these systems were designed by the project's proponents. When farmers are involved, AFS practices are more likely to be adapted to local economic, cultural and environmental conditions (Fischer and Vasseur, 2002), what may lead to success of the presented practice.

3.4. AFS versus traditional agriculture

When asked about the main differences between work in the field and the agroforestry system, 47% of respondents considered that the AFS generates better results in relation to the diversity and longevity of products. However, the long-term financial return, mainly from more profitable species (e.g., timber and oilseed trees), was pointed out as a negative issue (41%). That is, the delay in obtaining income ceases to meet the immediate financial needs of families, as noted by residents:

You have to leave [the AFS] to get a job elsewhere, to sustain the family. Working only there [in the AFS], and from there we get no production, how are you going to pay your bills, your debts? So there is a thing that demands and we don't have something [income] to get from it. (AF05, M).

For you to work with AFS, you have to plant [cassava] crops, because if you only plant AFS, you will have plenty of stuff, but won't have what to eat. And if you plant [cassava] crops and AFS, both are helping each other and that is helping me directly. This way is gets reinforced, one helps the other. (AF09, M).

According to 59% of respondents, the cassava fields demand more arduous work when compared to AFS. On the other hand, for 35% of respondents the profit generated by the sale of cassava flour is obtained in the short term. In addition, the cassava fields are a food source for 76% of respondents, while 24% feed on AFS products. However, it is worth noting that Donatti et al. (2011) showed that the amount invested in the production of cassava flour in the region of the lower Negro River, accounting for daily services and family workforce, is higher than the return obtained from the sale, which is considered minimal. However, the authors also highlighted the cultural value and its large participation in food.

According to interviewees, the stages of flour production - harvesting cassava, processing, preparing the flour, and transporting it to sales points - involve the whole family. Because it requires a lot of work, reconciling the maintenance of the farm with other activities is difficult. When talking about AFS, 18% of interviewees highlighted the need to share time and workforce to manage planting, thus reducing the possibility of exclusive dedication to AFS.

The highlighted differences between cultivation practices mark the tradeoffs between ecosystem services in agriculture, which depend on management-related decisions (Power, 2010). In our study, there is evidence that AFS began providing regulatory services (described by farmers), while cassava plantations provide provision services at the cost of using resources offered by the landscape.

In this context, mixed plantations allow combining complementary functional and structural traits, improving benefits such as biomass production, maintenance of biodiversity, and resistance to disturbance (Liu et al., 2018). Agroforestry models allow a diversified production of products annually, maintaining the ratio between investment in workforce and income (Nair and Fernandes, 1984; Raintree and Warner, 1986; Saha et al., 2010). This configuration can lead to a greater financial resilience, since it can allow multiple harvests at different times of the year and different monocultures (Murthy et al., 2016; Kumar, 2016). Planning the use of areas in riverside communities allows combining opportunities with restrictions of traditional agriculture and avoiding social and environmental consequences of an intense land use (Jakovac et al., 2014). In the present case, combining AFS production with traditional cassava cultivation can improve the characteristics of both systems aiming to increase area productivity (Fig. 7).

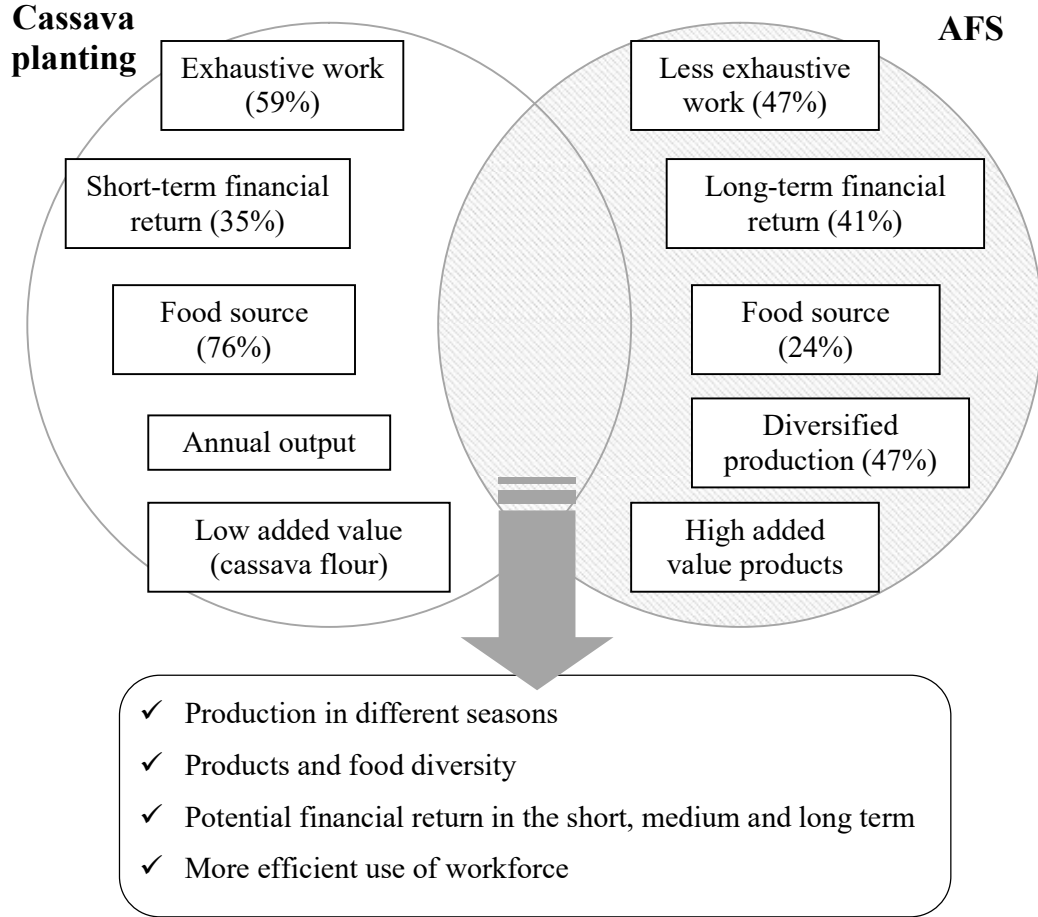


Fig.7. Differences among traditional cassava crops and agroforestry systems, and potential benefits generated by the combined cultivation of both. Percentage shows results of this work related to interviews' answers.

Among the interviewees, 35% combined crops from clear lands with perennial crops, and consequently managed the AFS more intensively and obtained the best benefits from the ecological interaction between crops, as reported below:

I plant [cassava] crops once and soon I plant the AFS for the land don't get weak and be able to endure other plants. The fast growth of the cassava plants will shade other [plants] that are and are not timber [species]. The ones that are timber need shades from the others which aren't, like cassava. So then the cassava covers [the plants] and that's when the AFS grows, and when we cut the cassava it is taller [the AFS]. And then we plant again [cassava crops], it is when that it [the AFS] can grow and then the cassava grows higher and shades it again. When we cut [the cassava], it is in adequate height [the AFS] and don't die anymore and we are get carefree. (AF09, M).

Positive effects of agroforestry on the production of environmental services are more apparent on a landscape scale compared to the rural units (Torralba et al., 2016). Therefore, for agroforestry to fulfill its promises, its integration with political tools and combination with other conservation measures are important steps to create minimum conditions for its strategic implementation (Fearnside, 1995; Murthy et al., 2016).

4. CONCLUSION

Traditional practices of shifting cultivation and cassava planting are of great cultural and subsistence importance for residents of the RDSU. However, they follow Amazonian regional trends of intensification of cultivation and degradation of the landscape.

Interviewed farmers noticed environmental benefits associated to the growth of AFS including improvements in the soil, such as decompaction and increased moisture retention, fertility, and plant growth. As for social benefits, associated with subsistence and income generation, these are the main motivations for cultivating AFS and clearly influence the decision to adopt such practice. However, they are seen as long-term benefits and are poorly recognized until the moment. Thus, agroforestry loses space for traditional cultivation (cassava fields) due to the guarantee of annual production and income generation.

Combining traditional and agroforestry practices is an alternative to improve the benefits and opportunities of both cultivation systems. Planning area use in the RDSU and in regions inside riverside communities allows composing functional, more self-sufficient, and better prepared landscapes for the adverse effects of the climate crisis.

Different intrinsic and extrinsic factors must be evaluated locally, seeking and proposing adaptations that meet the demands of local populations, so that the system is indeed successful.

AKNOWLEDGEMENTS

Agradecemos a toda equipe de campo da RDSU e ao IDESAM pelo apoio logístico e fornecimento de informações importantes para a pesquisa.

FUNDING

This work was supported by Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas [FAPEAM/PAPAC #06200920/2019]; and Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior [CAPES 2018/1].

REFERENCES

Adams, C., Murrieta, R., Siqueira, A., Neves, W., & SANCHES, R. (2006). O pão da terra: da invisibilidade da mandioca na Amazônia. In: Adams, C.; Murrieta, R.; Neves, W.A. (Org.). *Sociedades caboclas amazônicas: modernidade e invisibilidade*. pp.295-321. São Paulo: Annablume,

Amazonas. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Amazonas – SDS. (2009). *Série Técnica Planos e Gestão: Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã*. v.1 e 2. Itapiranga e São Sebastião do Uatumã, AM: SDS.

Amazonas. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SDS. (2004). *Decreto Estadual 24.295, de 25 de junho de 2004, que cria a Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã – RDS do Uatumã -, localizada nos Municípios de São Sebastião do Uatumã e Itapiranga, e dá outras providências*. DOU: 25 June 2004, n. 30.406, ano CX. Manaus, AM: SEMA.

Amorozo, M.D. M., & Viertler, R.B. (2010). A abordagem qualitativa na coleta e análise de dados em etnobiologia e etnoecologia. In: Albuquerque, U.P.; Lucena, R.F.P.; Cunha, L.V.F.C. (Org.). *Métodos e técnicas na pesquisa etnobiológica e etnoecológica*, pp.65-83. Recife, PE: NUPPEA, 2010.

Dalle, S.P., & de Blois, S. (2006). Shorter fallow cycles affect the availability of noncrop plant resources in a shifting cultivation system. *Ecology and Society*, 11(2). <https://doi.org/10.5751/ES-01707-110202>

Dollinger, J., & Jose, S. (2018). Agroforestry for soil health. *Agroforestry systems*, 92(2), 213-219. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>

Donatti, R.N.; Scudeller, V.V.; Santos-Silva, E.N. (2011). Aspectos socioeconômicos dos produtores de farinha da comunidade Julião, zona rural de Manaus-AM. In: Santos-Silva, E.N.; Cavalcanti, M.J.; Scudeller, V.V. (Org.). *BioTupé: Meio Físico, Diversidade Biológica e Sociocultural do Baixo Rio Negro, Amazônia Central*, v.3. Manaus, AM: Rizoma Editorial.

Fearnside, P. (1995). Agroforestry in Brazil's Amazonian development policy: the role and limits of a potential use for degraded lands. In: Clusener-Godt, M. & Sachs, I. (Ed.). *Brazilian Perspectives on Sustainable Development of the Amazon Region*. pp.125-148. UNESCO, Paris. Oxford, UK: Prance and Oxford University Press.

- Fischer, A., & Vasseur, L. (2002). Smallholder perceptions of agroforestry projects in Panama. *Agroforestry systems*, 54(2), 103-113. <https://doi.org/10.1023/A:1015047404867>
- Forrester, D.I., Bauhus, J., & Cowie, A.L. (2006). Carbon allocation in a mixed-species plantation of Eucalyptus globulus and Acacia mearnsii. *Forest Ecology and Management*, 233(2-3), 275-284. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.018>
- Garrett, A., & Sampaio, M.M. (1991). (Trad.) et al. *A entrevista: seus princípios e métodos*. 10 ed. Rio de Janeiro: Agir.
- Godoy, A.S. (1995). Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. *RAE-revista de administração de empresas*, 35(2), 57-63. <https://doi.org/10.1590/S0034-75901995000200008>
- Hillbrand, A., Borelli, S., Conigliaro, M., & Olivier, E. (2017). *Agroforestry for landscape restoration: Exploring the potential of agroforestry to enhance the sustainability and resilience of degraded landscapes*. Roma: FAO, United Nations.
- Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia – Idesam, 2020. *Programa Carbono Neutro*. <https://idesam.org/carbononeutro/> (accessed 26 April 2020).
- Jakovac, C.C., Dutrieux, L.P., Siti, L., Peña-Claros, M., & Bongers, F. (2017). Spatial and temporal dynamics of shifting cultivation in the middle-Amazonas river: Expansion and intensification. *PloS one*, 12(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181092>
- Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry systems*, 76(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Kauffman, J.B., Hughes, R.F., & Heider, C. (2009). Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agricultural abandonment in the neotropics. *Ecological Applications*, 19(5), 1211-1222. <https://doi.org/10.1890/08-1696.1>
- Kidd, C.V., & Pimental, D. (Eds.). (1992). *Integrated resource management: Agroforestry for Development*. San Diego, CA: Academic Press, Inc. 223p.
- Kleinman, P.J., Pimentel, D., & Bryant, R.B. (1995). The ecological sustainability of slash-and-burn agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 52(2-3), 235-249. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(94\)00531-I](https://doi.org/10.1016/0167-8809(94)00531-I)
- Kumar, B.M., Kumar, S.S., & Fisher, R.F. (1998). Intercropping teak with Leucaena increases tree growth and modifies soil characteristics. *Agroforestry Systems*, 42(1), 81-89. <https://doi.org/10.1023/A:1006199910985>
- Kumar, V. (2016). Multifunctional agroforestry systems in tropics region. *Nature Environment and Pollution Technology*, 15(2), 365.
- Liu, C. L. C., Kuchma, O., & Krutovsky, K. V. (2018). Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. *Global Ecology and conservation*, 15, e00419. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00419>
- MapBiomas. Projeto MapBiomas, 2019. *Coleção 4.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil*. <http://plataforma.mapbiomas.org/> (accessed 20 November 2019).

- Meijer, S.S., Catacutan, D., Ajayi, O.C., Sileshi, G.W., & Nieuwenhuis, M. (2015). The role of knowledge, attitudes and perceptions in the uptake of agricultural and agroforestry innovations among smallholder farmers in sub-Saharan Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 13(1), 40-54. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.912493>
- Mekoya, A., Oosting, S.J., Fernandez-Rivera, S., & Van der Zijpp, A.J. (2008). Farmers' perceptions about exotic multipurpose fodder trees and constraints to their adoption. *Agroforestry systems*, 73(2), 141-153. <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9102-5>
- Millennium Ecosystem Assessment – MEA. (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute.
- Murthy, I.K., Dutta, S., & Vinisha, V. (2016). Impact of agroforestry systems on ecological and socioeconomic systems: a review. *Glob J Sci Front Res: H Environ Earth Sci*, 16(5), 15-27.
- Nair, P.K.R. (1993). *An introduction to agroforestry*. Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers.
- Nair, P.K.R., & Fernandes, E. (1984). *Agroforestry as an alternative to shifting cultivation*. In: FAO, United Nations. *Improved Production Systems as an Alternative to Shifting Cultivation*. Paris: FAO.
- Nair, P.K.R., Kumar, B.M., & Nair, V.D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science*, 172(1), 10-23. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>
- Nair, P.R. (1985). Classification of agroforestry systems. *Agroforestry systems*, 3(2), 97-128. <https://doi.org/10.1007/BF00122638>
- Polasky, S. (2008). What's nature done for you lately: measuring the value of ecosystem services. *Choices*, 23(316-2016-6894), 42-46.
- Porro, R. (2009). Expectativas e desafios para a adoção da alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação. In: Porro, R (Ed. Tec.). *Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação*. pp.33-51. Brasília-DF: Embrapa Informação e Tecnologia.
- Power, A.G. (2010). Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 365(1554), 2959-2971. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>
- Raintree, J.B., & Warner, K. (1986). Agroforestry pathways for the intensification of shifting cultivation. *Agroforestry systems*, 4(1), 39-54. <https://doi.org/10.1007/BF01834701>
- Ribeiro Filho, A.A., Adams, C., & Murrieta, R.S.S. (2013). The impacts of shifting cultivation on tropical forest soil: a review. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 8(3), 693-727. <https://doi.org/10.1590/S1981-81222013000300013>
- Saha, R., Ghosh, P.K., Mishra, V.K., Majumdar, B., & Tomar, J.M.S. (2010). Can agroforestry be a resource conservation tool to maintain soil health in the fragile ecosystem of north-east India?. *Outlook on AGRICULTURE*, 39(3), 191-196. <https://doi.org/10.5367/oa.2010.0004>

Salim, M.V.C., Miller, R.P., Ticona-Benavente, C.A., van Leeuwen, J., &Alfaia, S.S. (2018). Soil fertility management in indigenous homegardens of Central Amazonia, Brazil. *Agroforestry systems*, 92(2), 463-472.<https://doi.org/10.1007/s10457-017-0105-6>

Schwab, N., Schickhoff, U., & Fischer, E. (2015). Transition to agroforestry significantly improves soil quality: A case study in the central mid-hills of Nepal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 205, 57-69.<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.004>

Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E. A., ... &Maser, O. (2014). Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In *Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 811-922). Cambridge University Press.

Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P.J., Moreno, G., & Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, ecosystems & environment*, 230, 150-161.<https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>

Van Vliet, N., Adams, C., Vieira, I. C. G., & Mertz, O. (2013). “Slash and burn” and “shifting” cultivation systems in forest agriculture frontiers from the Brazilian Amazon. *Society & Natural Resources*, 26(12), 1454-1467.<https://doi.org/10.1080/08941920.2013.820813>

Van Vliet, N., Mertz, O., Heinemann, A., Langanke, T., Pascual, U., Schmook, B., ... & Castella, J. C. (2012). Trends, drivers and impacts of changes in swidden cultivation in tropical forest-agriculture frontiers: a global assessment. *Global Environmental Change*, 22(2), 418-429.<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.009>

Verchot, L. V., Van Noordwijk, M., Kandji, S., Tomich, T., Ong, C., Albrecht, A., ... & Palm, C. (2007). Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 12(5), 901-918.<https://doi.org/10.1007/s11027-007-9105-6>

APPENDIX A

Table A.1. Studied agroforestry systems (n=17) and information from interview with each farmer.

Area ID	Community	RDSU's Pole	Interviewee's sex	Age in 2019 (years)	Initial area (ha)	Final area (ha)	Management intensity (interviews) ¹	Management intensity (technicians) ¹	Previous soil use	Period of soil use (years)
AF01	Livramento	1	M	7	1,0	2,0	++++	+++	Pasture	7
AF02	Livramento	1	M	3	0,3	2,3	+++	+	Monoculture ²	2
AF03	Livramento	1	M	3	0,2	4,0	+++	+++	Secondary Forest ³	2
AF04	Livramento	1	M	2	0,5	0,5	++++	+++	Monoculture	2
AF05	Jacarequara	1	M	2	1,0	3,0	++++	+++	Monoculture	2
AF06	Caribi	1	M	4	0,5	0,6	+	+	Secondary Forest (enriched)	NI
AF07	Caribi	1	M	3	0,3	2,0	+++	++++	Secondary Forest	NI
AF08	Caribi	1	M	3	0,5	0,7	++++	+	Secondary Forest (young)	NI
AF09	Santa Luzia	2	M	8	1,5	3,0	++++	++++	Secondary Forest	NI
AF10	Santa Luzia	2	F	2	1,5	1,9	++++	++++	Monoculture	2
AF11	Pedras	2	F	0,3	0,8	0,8	++++	++++	Monoculture	1
AF12	Maracarana	3	M	5	0,5	0,5	++	+++	Monoculture	3
AF13	Maracarana	3	M	5	0,5	0,5	++	++	Monoculture	2
AF14	Maracarana	3	F	5	0,5	0,9	++	++	Secondary Forest	2
AF15	Maracarana	3	M	3	0,5	2,0	++++	++	Monoculture	2
AF16	Maracarana	3	M	3	0,5	0,5	+++	+	Secondary Forest	1
AF17	Maracarana	3	F	2	0,3	0,3	++	++++	Monoculture	NI

Note: ¹ Classes for management intensity according to farmers interviews and PCN's technicians information: very high (++++), high (+++), moderate (++) and low (+). ² Mostly represented by cassava crops. ³ Naturally grown secondary vegetation or "capoeira". NI: not informed.

APPENDIX B

Questionnaire applied in the interviews

Group 1: Land use history

- 1) How do you choose the place for planting your crops? And the place for the AFS?
- 2) When were your crops planted? What are the ages of AFS and cassava crops?
- 3) How was the soil used before the AFS is planted? For how long was it used?
- 4) How many times do you plant cassava before starting the fallow period?
- 5) For how much time the land rests before the next cassava planting?
- 6) What are the area's current productive activities?

Group 2: Productive activities' history (of person/family)

- 7) What is the main current activity?
- 8) What was the previous activity exercised before arriving to the current area?
- 9) How did you get here? When (year)?
- 10) What activities were adopted in the area since the arrival?

Group 3: Objectives of adoption of the cultivation system

- 11) How have you decided to plant the AFS?
- 12) What is your goal in cultivating AFS? What are your expectations on AFS?

Group 4: Intensity of cultivation practices adopted for the AFS

- 13) Does the AFS needs care?
- 14) Who is responsible for its maintenance?
- 15) When there is maintenance, what are the main activities performed?
- 16) What is the frequency of activities performed/interventions?
- 17) Was there replanting of the AFS?
- 18) How big was the initial area of the AFS? How big is the current area of the AFS?
- 19) Do you plan to expand the AFS's area?

Group 5: Positive and negative impacts of the cultivation system adoption

- 20) What has changed after the AFS was planted?
- 21) Which changes were bad? Which were good?
- 22) What are the differences between working on AFS and cassava crops?
- 23) Did the soil changed in the local of the AFS was planted? What were the main differences?
- 24) Did AFS bring any benefits? Which one/ones?

Goulart, I.C.G.; Freitas, I.; Saito, S.M.; Neves Junior, A.F.; Scudeller, V.V. 2020. Sistemas agroflorestais recuperam a produtividade do solo? Um estudo de caso na Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã, Amazonas, Brasil. Manuscrito em preparação para o periódico *Agriculture Ecosystems and Environment*.

Sistemas agroflorestais recuperam a produtividade do solo? Um estudo de caso na Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã, Amazonas, Brasil

Isabele Cristine Garcia Goulart^{1*}, Ícaro Freitas², Masaki Samuel Saito², Afrânio Ferreira Neves Junior¹, Veridiana Vizoni Scudeller^{1*}

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas, Brasil, e-mail: isabelecggoulart@gmail.com, anevesjr@gmail.com, vscudeller@ufam.edu.br

²Graduação em Engenharia Florestal, Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas, Brasil

* Autor de correspondência

RESUMO

O solo é um recurso essencial para a humanidade e responsável pela provisão de alimentos e produtos. Em regiões tropicais, o uso desse recurso é uma importante forma de subsistência. A agricultura itinerante, principal forma de cultivo nessas regiões, adota sequências de conversão, cultivo e pousio, arrançadas para garantir a sustentabilidade do sistema em longo prazo. Recentemente, a tendência de redução na duração desses ciclos, reflexo de fatores socioeconômicos, tem conduzido a perdas na produtividade do solo e na biodiversidade da paisagem. Sistemas agroflorestais (SAF) são ferramentas que permitem o cultivo simultâneo de espécies agrícolas e perenes, buscando benefícios das interações ecológicas resultantes. Associados à provisão de serviços ecossistêmicos, SAF contribuem para melhorias associadas à fertilidade e regulação hídrica, e podem ser empregados para a recuperação de áreas improdutivas. Por meio de análises de atributos químicos e físicos do solo em três ambientes de uso (SAF, floresta madura e roça de mandioca), o presente trabalho verifica se a implementação de SAF pode melhorar os atributos químicos e físicos do solo, considerando plantios feitos há nove anos na RDS do Uatumã, Amazonas, Brasil. Ainda, busca entender a influência de fatores extrínsecos (textura do solo) e intrínsecos (histórico de uso do solo, idade do plantio e práticas de manejo) nas características do solo dos SAF. Análises de componentes principais revelaram que SAF trouxeram melhorias para o solo em comparação a áreas de cultivo tradicional. Também foi observado que características do solo nos SAF resultam da textura do solo (fator extrínseco); e não sofreram efeito dos fatores intrínsecos analisados. Sugere-se que recomendações para o manejo de SAF no local e a seleção de áreas aptas para o seu crescimento consideram a classe textural do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Áreas improdutivas; granulometria; corte e queima; Amazônia Central

1. INTRODUÇÃO

A agricultura itinerante, também chamada como agricultura de corte e queima, é uma importante forma de cultivo em populações rurais e de pequenos produtores na região dos trópicos (Ribeiro Filho et al., 2013). É um fator importante na transformação do uso do solo nessas regiões (Van Vliet et al., 2012). Na Amazônia, a agricultura itinerante agrega grande importância cultural para populações tradicionais (Van Vliet et al., 2013; Jakovac et al., 2017). O cultivo da mandioca é destacado por sua importância histórica e cultural (Adams et al., 2006). A produção de farinha e outros derivados do tubérculo, obtidos por processos tradicionais, são importantes fontes de subsistência (Donatti et al., 2011).

O sistema produtivo da agricultura itinerante é caracterizado pela sequência das fases de conversão, cultivo e pousio, onde a conversão inclui práticas de corte e queima da vegetação nativa (Kleinman et al., 1995). O período de pousio permite a regeneração da vegetação natural e recuperação do solo, o que garante a sustentabilidade produtiva do sistema (Kleinman et al., 1995; Ribeiro Filho et al., 2013). Entretanto, nas últimas décadas, foi observada uma tendência de intensificação de cultivo e redução do período de pousio na região Amazônica (Junqueira et al., 2016; Jakovac et al., 2017). Essa intensificação reduz o potencial de produção de importantes serviços ambientais da paisagem, como a produtividade do solo (Jakovac et al., 2017). Como resultado, a sustentabilidade do sistema tradicional de cultivo é comprometida.

Sistemas agroflorestais (SAF) podem ser definidos como tecnologias de cultivo simultâneo de espécies vegetais perenes e agrícolas e/ou animais em um mesmo espaço ou sequência temporal, buscando o benefício das interações ecológicas entre esses (Lundgren & Raintree, 1982 *apud* Nair, 1993). Esta é uma definição atual para práticas antigas e variadas de cultivo presentes em diferentes partes do mundo (Nair, 1993). SAF são caracterizados por viabilizar um manejo dinâmico e ecológico dos recursos naturais, e por isso, apresentados

como uma alternativa produtiva e sustentável para os diferentes contextos amazônicos (Porro, 2009).

Entre os serviços ambientais providos pela prática agroflorestal (Nair, 1993; MEA, 2005), a manutenção da produtividade do solo é considerada o principal, uma vez que a produção de outros serviços depende da saúde do solo em longo prazo (Jose et al., 2009; Dollinger & Jose, 2018). São citados como principais benefícios para o solo: a manutenção e aumento da matéria orgânica, fixação de nitrogênio, disponibilização de nutrientes e redução de perdas, manutenção da disponibilidade de água (Nair, 1993). Por incorporar o estrato arbóreo, o cultivo em agrofloresta permite a manutenção da produção em períodos de eventos climáticos extremos, muito secos ou muito úmidos, contribuindo para a redução da vulnerabilidade na agricultura de pequena escala (Verchot et al., 2007).

A capacidade de desenvolvimento e provisão de serviços associados ao cultivo agroflorestal dependem de diferentes fatores intrínsecos e extrínsecos ao sistema. Entre esses fatores são citados: características ambientais, qualidade de sítio, tipo de sistema, práticas de manejo e uso anterior do solo (Nair et al., 2009; Nair, 2010; Chatterjee et al., 2018). Portanto, compreender como esses fatores influenciam o ambiente contribui para a formulação de estratégias assertivas para cada localidade.

A influência de práticas agroflorestais na capacidade funcional do solo, associadas à produtividade, pode ser investigada por meio da avaliação de atributos físicos e químicos do solo (Doran & Parkin, 1994; Schoenholtz et al., 2000). Tais atributos são selecionados a partir da sua sensibilidade às práticas empregadas (Doran & Parkin, 1994), revelando informações sobre a sua fertilidade (e.g. CTC, soma de bases, matéria orgânica), manutenção de água (e.g. umidade) e condições para o crescimento vegetal (e.g. densidade, resistência) (Doran & Parkin, 1996; Burger & Kelting, 1999; Schoenholtz et al., 2000).

Para dado contexto, nosso estudo objetivou responder às seguintes perguntas: (1) SAF recuperam o solo na região tropical amazônica após o seu uso intensivo e esgotamento produtivo? (2) Quais fatores influenciam os atributos do solo nos SAF? Para buscar essas respostas, foram objeto de estudo SAF implantados em comunidades ribeirinhas da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã (RDSU), localizada às margens do Rio Uatumã, na Amazônia Central. As hipóteses trazidas são que práticas agroflorestais melhoram propriedades físicas e químicas do solo, quando comparadas à roça de mandioca adjacente; e que o potencial dessas melhorias é influenciado por fatores extrínsecos (textura do solo) e intrínsecos (histórico de uso do solo, idade do plantio, práticas de manejo) associados aos SAF.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Sítio do estudo

A RDSU localiza-se a 300 km de Manaus, entre os municípios de Itapiranga e São Sebastião do Uatumã, Estado do Amazonas, Brasil (2°18'13.5"S, 58°39'01.8"W). Criada em 2004, possui área total de 424,430 hectares e abriga cerca de 260 famílias e 1,300 habitantes às margens dos rios Uatumã, Caribi e Jatapu (Amazonas, 2009).

A região da RDSU tem precipitação anual média de 2,540 mm e temperatura do entre 25.8 e 27.2°C (INMET, 2019). Na área da Reserva predominam formações vegetais da Floresta Ombrófila Densa e Campinarana, distribuídas respectivamente em solos Latossolos distróficos, nas áreas mais elevadas e Espodosolos, nas áreas mais baixas (Trancoso & Carneiro, 2007).

Fizeram parte deste estudo 17 unidades rurais de agricultores moradores da RDSU. Em cada unidade rural, foram analisados dois sistemas de uso do solo: sistema agroflorestal (AF) e roça de mandioca (R); além de áreas de floresta madura (FM). Os SAF implantados são iniciativa do Programa Carbono Neutro (PCN), criado em 2010 pelo Instituto de

Conservação e Desenvolvimento Sustentável do Amazonas (IDESAM), com o objetivo de recuperar áreas degradadas e promover a agricultura de baixa emissão na RDSU (Idesam, 2020). Os plantios foram feitos em mutirões, unindo esforços da equipe do PCN e de moradores de cada comunidade, adotando um modelo pré-definido pelo IDESAM, intercalando espécies leguminosas, madeiras e frutíferas. As principais espécies plantadas são: ingá (*Inga spp.*), açaí (*Euterpe spp.*), cupuaçu (*Theobroma spp.*), cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.), andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.), pau-rosa (*Aniba rosaeodora* Ducke), tauari (*Couratari tauari* O.Berg) e castanha (*Bertholettia excelsa* Bonpl.). A combinação de espécies foi baseada na demanda dos agricultores. A adubação de base variou conforme disponibilidade de recursos do Projeto. Na maioria das áreas, foi utilizado 200g de calcário (CaCO_3), 150g de Arad (P_2O_5) e de três a cinco litros de composto por muda. O composto era variado a partir da mistura de serapilheira, pó de serragem, esterco de gado e de carneiro. Após o plantio, o cultivo dos SAF é de responsabilidade de cada agricultor.

Os SAF estudados (n=18; considerando dois plantios em uma das 17 unidades rurais) possuem diferentes idades e foram implantados entre 2011 e 2019 (Figura 1) em áreas improdutivas da RDSU após o seu abandono pelo esgotamento do solo. A seleção desses SAF foi feita a partir dos seguintes critérios: continuidade das atividades pós-implantação; permanência do responsável pelo SAF na RDSU; e disponibilidade em participar da pesquisa.

Áreas adjacentes aos SAF, roças de mandioca (n=11) e floresta madura (n=17), foram selecionadas para compor o estudo. As roças de mandioca são cultivadas por meio da agricultura de corte e queima. O cultivo da mandioca para produção de farinha é uma importante fonte de renda e subsistência para grande parte das famílias da RDSU (Amazonas, 2009). As áreas de roça amostradas em cada unidade rural variaram amplamente entre si em relação à idade e ao número de ciclos de cultivo realizados.

As áreas de floresta madura compreendem ambientes de vegetação de Floresta Ombrófila Densa (terra firme) e de Campinarana Florestada (Veloso et al., 1991), áreas de vegetação natural adotadas como a representação dos ambientes não antropizados (SAF e roça).

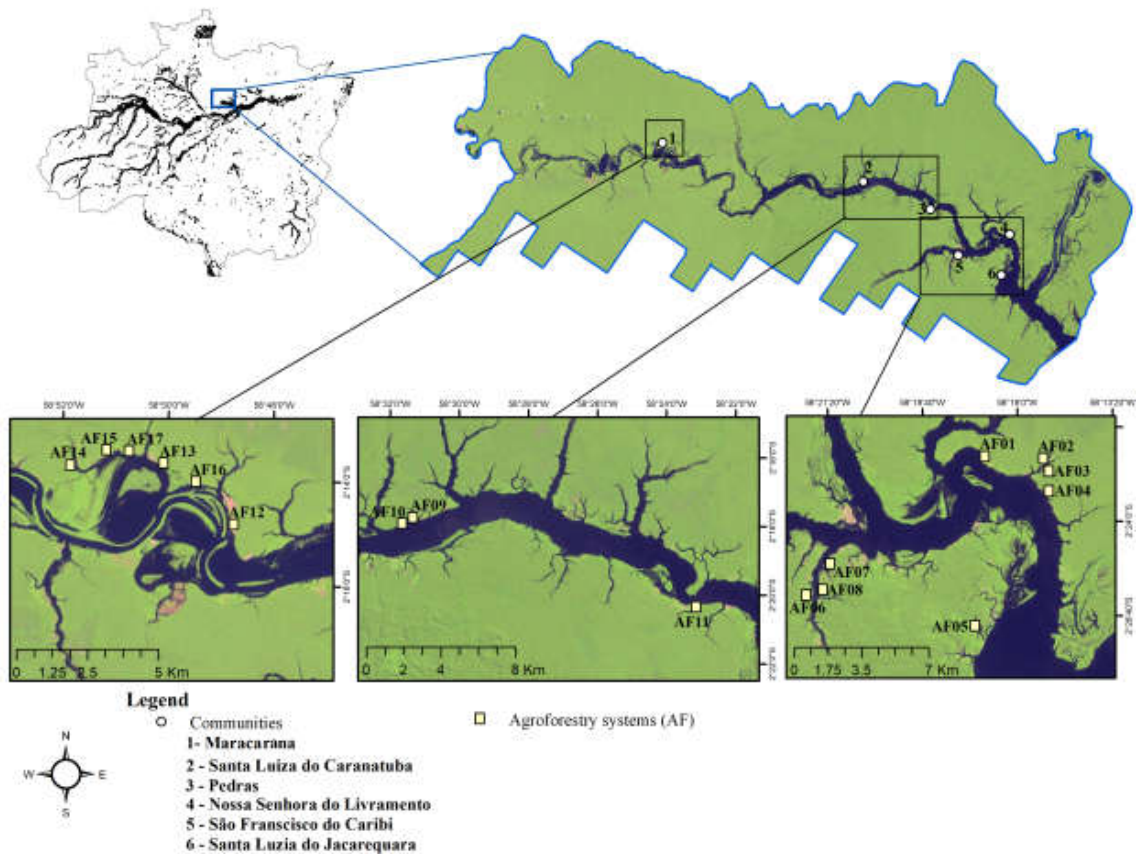


Fig.1. Localização da RDS do Uatumã na Amazônia Legal; no detalhe, as comunidades e áreas dos sistemas agroflorestais estudados.

2.2. Coleta de dados

2.2.1. Caracterização química e física do solo

Para permitir a comparação entre os diferentes usos do solo analisados, foi feita a caracterização física e química do solo nesses locais a partir da determinação de seus atributos. Com essa finalidade, amostras de solo foram obtidas entre Julho e Agosto de 2019.

Em cada unidade rural estudada, foram instaladas parcelas de 200m² (10x20m) nos ambientes AF, FM e R.

Em cada parcela, amostras de solo para análises químicas foram coletadas com o trado holandês na profundidade de 0-20 cm. Foram obtidas cinco subamostras por parcela, sendo quatro coletadas próximo aos vértices e uma no centro, compondo uma única amostra. As amostras foram secas ao ar e peneiradas em malhas de 2-mm para eliminar pedaços de raízes e frações maiores de partículas. Os seguintes atributos químicos foram determinados conforme Embrapa (1997): pH (CaCl₂); teores de alumínio trocável (Al³⁺); cátions trocáveis (K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺); teores de fósforo disponível (P); teores de sódio (Na); acidez potencial (H⁺ + Al³⁺); soma de bases (SB); capacidade de troca de cátions potencial (T) a pH 7,0 (SB + acidez potencial); capacidade de troca de cátions efetiva (t) ao pH natural (SB + Al³⁺); saturação por bases (V%); saturação por alumínio (m%); e matéria orgânica no solo (MO).

Foram determinados os seguintes atributos físicos (Embrapa, 1997): umidade atual do solo (UA); resistência do solo à penetração (RP); densidade do solo (DS); e granulometria. Amostras indeformadas para determinação de UA e DS foram obtidas com cilindros metálicos (90cm³) e ajuda do amostrador de solo. Foram coletadas duas subamostras em cada parcela para compor uma única amostra. Para a determinação da umidade do solo, cada amostra foi pesada em campo no momento da coleta, utilizando uma balança de capacidade para 500g e precisão de 0,01g. Em laboratório, as amostras foram secas em estufa a 105°C por 48 horas e novamente pesadas.

Amostras para determinação da RP foram obtidas com penetrômetro de impacto (SONDATERRA[®], Modelo PI-60) (Cordeiro et al., 1998; de Sá, 2007). Foram coletadas três medidas no entorno de cada ponto de coleta de amostras indeformadas (UA e DS) na profundidade de 0-10 cm. Cada subamostra era composta dessas três medidas e uma amostra composta única representou o valor de cada parcela.

A granulometria do solo (teores de argila, silte e areia) foi determinada pelo método da pipeta (Embrapa, 1997). As análises químicas e de granulometria do solo foram conduzidas pelo Laboratório de Solos da Universidade Federal do Amazonas.

2.2.2. Fatores intrínsecos

Para analisar a influência de fatores intrínsecos em características físicas e químicas do solo nos SAF, variáveis qualitativas e quantitativas foram geradas a partir de entrevistas semi-estruturadas com o agricultor responsável por cada SAF (n=17). Detalhes sobre a metodologia aplicada nas entrevistas são apresentados no Capítulo I deste documento. Respostas obtidas com as entrevistas foram tabuladas e codificadas e, a partir de matrizes de texto, as informações foram comparadas e estudadas.

Para as análises neste trabalho, foram utilizadas as seguintes informações sobre cada SAF: (i) histórico de uso do solo, referente ao tempo transcorrido (número de anos) desde a conversão da vegetação nativa até o momento de plantio do SAF, calculado a partir de informações históricas sobre o uso da área relatadas nas entrevistas; (ii) idade do plantio, referente ao tempo transcorrido (número de anos) desde a implantação do SAF; e (iii) práticas de manejo, referente à quantidade de intervenções feitas no plantio, considerando informações relatadas pelos técnicos do projeto sobre o intervalo mínimo entre as intervenções feitas nos SAF (número de meses), ou seja, a intensidade de tratos culturais aplicada nos plantios.

2.3. Análises estatísticas

Análises multivariadas e de correlação, incluindo estatística descritiva, foram realizadas com o software estatístico R (versão 3.5.2). A distribuição dos dados foi testada a partir de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$). Uma transformação logarítmica foi aplicada a todo o conjunto de dados, com exceção dos resultados obtidos para a variável pH. Análises descritivas e de correlação foram feitas a partir dos valores brutos, enquanto valores transformados foram utilizados para as demais análises. Observações discrepantes do

conjunto de dados (*outliers*) foram identificadas a partir do cálculo da Distância de Mahalanobis (Mahalanobis, 1936; Korkmaz et al., 2014).

Após a exclusão dos *outliers*, Análises de Componentes Principais (PCA) (Lê et al., 2008) foram utilizadas para diminuir a redundância de dados e selecionar os melhores indicadores de solo entre as variáveis analisadas (Bunemann et al., 2018). Considerando o critério de Kaiser (Kaiser, 1960), as variáveis para conjunto mínimo de dados (CMD) foram escolhidas considerando as componentes principais (PC) com autovalores ≥ 1.00 (Tabelas B.1 e B.2). Em todos os PC, indicadores com maior peso e os 10% menores eram retidos. Quando mais de uma variável era retida por PC, uma análise de correlação de Spearman (r_s) foi aplicada e foram retidas as variáveis com maiores valores de carga (Tabela B.3). O processo de seleção foi feito para variáveis físicas e químicas, separadamente. Para avaliar o efeito do uso do solo em seus atributos, uma nova PCA foi realizada considerando todas as variáveis retidas pelo CMD e todas as observações ($n=44$, excluídos os *outliers*) obtidas para os três ambientes estudados (AF, FM e R). Relações entre as variáveis físicas (UA, DS e RP) foram analisadas por meio da correlação Spearman e consideraram as observações feitas nos três ambientes ($n=44$).

O efeito da textura (variável extrínseca) nas características do solo dos SAF foi analisado por meio de uma PCA considerando o CMD selecionado e as amostras do ambiente AF ($n=17$, excluído o *outlier*). Para avaliar o efeito de variáveis intrínsecas (histórico de uso, idade e manejo dos SAF) nas características do solo nos SAF, análises de correlação par a par foram aplicadas com variáveis do CMD que apresentaram maiores vetores na PCA (UA, Al^{3+} e SB; Figura 5A).

3. RESULTADOS

3.1. Características dos solos analisados

Após a análise de *outliers*, observações consideradas discrepantes ($D_M^2 \geq 32.85$) foram excluídas do conjunto de dados (Figura A.1). Todas as análises apresentadas (PCA e correlações) foram feitas a partir do número reduzido de amostras ($n=44$).

A descrição estatística dos resultados das análises químicas e físicas do solo, considerando as amostras obtidas nos diferentes ambientes estudados (AF, FM e R), é apresentada na Tabela 1.

3.1.1. Atributos químicos do solo

Indicadores de acidez do solo (acidez potencial e pH) resultaram em valores homogêneos considerando todos os ambientes amostrados (AF, FM e R). Em média, o pH de todos os solos foi de 3.69 ($DP \pm 0.11$), com valor mínimo de 3.50 e máximo de 3.9. Quanto à acidez potencial, a média foi de 11.51 ($DP \pm 3.74$) em todos os ambientes exceto R, onde foi ligeiramente menor (10.64 ± 3.14).

Foram observados menores teores de Al (1.79 ± 0.76) e maiores teores de Mg (0.12 ± 0.06) nos ambientes de roça. Os teores de MO encontrados para a R (1.38 ± 0.36), também foram ligeiramente menores em comparação aos ambientes AF e FM.

Os valores de SB e saturação por bases ($V\%$) foram menores para FM em relação aos dois ambientes antropizados (AF e R). Teores de saturação por alumínio ($m\%$) foram maiores para FM em relação aos demais ambientes. A dispersão dos dados (DP) obtidos para essas variáveis mostrou-se menor para o ambiente de florestas naturais ($SB = 0.20 \pm 0.07$; $V\% = 1.81 \pm 1.01$; $m\% = 90.72 \pm 4.53$).

O valor máximo para o teor de P encontrado entre todas as amostras coletadas (15 mg dm^{-3}) foi observado no ambiente AF. Considerando os demais ambientes, o teor médio de P foi de $3.05 \pm 1.38 \text{ mg dm}^{-3}$. Ambientes de floresta natural (FM) apresentaram os maiores teores de Na (7.65 ± 4.47), seguidos de dos ambientes de AF (5.71 ± 6.08).

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do solo analisados, considerando as amostras obtidas em diferentes usos do solo (AF, FM e R) na Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã (RSDU).

	pH	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K	SB	T	t	V	m	P	Na	MO	RP	UA	DS	areia	silte	argila
	CaCl ₂	cmol _c dm-3	cmol _c dm-3	cmol _c dm-3	cmol _c dm-3	mg dm-3	cmol _c dm-3	cmol _c dm-3	cmol _c dm-3	%	%	mg dm-3	mg dm-3	dag kg-1	MPa	g g-1	g cm-3	g kg-1	g kg-1	g kg-1
Todas as parcelas (n=44)																				
Mínimo	3.50	0.80	5.20	0.05	0.00	8.00	0.09	5.42	1.23	0.74	53.47	2.00	1.00	0.70	0.36	0.05	0.79	39.00	8.00	108.00
Média	3.69	2.08	11.51	0.20	0.05	18.32	0.31	11.82	2.39	2.92	85.65	3.05	6.23	1.49	1.01	0.26	1.13	445.34	136.23	418.46
Máximo	3.90	3.70	18.50	0.60	0.20	32.00	0.84	18.85	3.95	9.46	96.20	8.00	27.00	2.60	2.05	0.47	1.44	878.00	285.00	722.00
DP	0.11	0.83	3.74	0.11	0.07	4.97	0.17	3.72	0.82	2.16	10.14	1.38	4.87	0.47	0.44	0.11	0.18	257.12	82.04	184.69
AF (n=17)																				
Mínimo	3.50	1.00	5.20	0.15	0.00	8.00	0.19	5.42	1.32	1.29	57.61	2.00	1.00	0.80	0.38	0.09	0.83	39.00	13.00	120.00
Média	3.70	2.22	11.95	0.21	0.06	16.82	0.32	12.27	2.54	2.99	85.75	3.00	5.71	1.55	1.16	0.27	1.13	406.29	144.77	449.00
Máximo	3.90	3.60	18.50	0.50	0.20	32.00	0.74	18.85	3.95	9.27	94.05	6.00	27.00	2.60	2.05	0.44	1.44	851.00	248.00	722.00
DP	0.12	0.90	4.11	0.08	0.07	5.05	0.14	4.10	0.89	1.99	9.01	1.22	6.08	0.45	0.50	0.10	0.19	276.42	88.14	194.68
FM (n=17)																				
Mínimo	3.50	1.00	5.20	0.05	0.00	12.00	0.09	5.48	1.23	0.74	78.31	2.00	1.00	0.70	0.43	0.05	0.79	65.00	8.00	108.00
Média	3.65	2.11	11.58	0.13	0.01	19.53	0.20	11.78	2.30	1.81	90.72	2.94	7.65	1.50	0.93	0.25	1.14	483.41	123.71	392.88
Máximo	3.80	3.70	16.60	0.20	0.10	30.00	0.34	16.94	3.85	5.06	96.20	8.00	19.00	2.50	1.85	0.46	1.42	878.00	285.00	720.00
DP	0.08	0.81	3.80	0.05	0.03	4.56	0.07	3.81	0.82	1.01	4.53	1.56	4.47	0.56	0.43	0.12	0.19	266.73	80.86	196.31
R (n=10)																				
Mínimo	3.50	0.80	7.20	0.10	0.00	14.00	0.14	7.64	1.29	1.23	53.47	2.00	1.00	1.00	0.36	0.10	0.79	127.00	46.00	146.00
Média	3.75	1.79	10.64	0.31	0.12	18.80	0.48	11.12	2.27	4.68	76.85	3.30	4.70	1.38	0.87	0.25	1.11	447.00	143.00	410.00
Máximo	3.90	3.00	16.60	0.60	0.20	30.00	0.84	16.95	3.35	9.46	94.18	6.00	8.00	2.00	1.40	0.47	1.35	808.00	256.00	644.00
DP	0.13	0.76	3.14	0.15	0.06	5.35	0.21	3.07	0.71	2.76	13.25	1.42	2.31	0.36	0.30	0.10	0.18	218.94	78.96	154.96

Notas: Atributos químicos: pH (CaCl₂), teores de alumínio trocável (Al³⁺), acidez potencial (H⁺+ Al³⁺), cátions trocáveis (K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺), teores de fósforo disponível (P), teores de sódio (Na), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions potencial (T), capacidade de troca de cátions efetiva (t), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), matéria orgânica (MO). Atributos físicos: Resistência do solo à penetração (RP), em profundidade 0-10 cm; umidade atual do solo (UA), densidade do solo (DS), em profundidade 0-5 cm. Teores de argila, silte e areia com base em amostras coletadas em profundidade 0-20 cm.

3.1.2. Atributos físicos do solo

Não foram observadas diferenças entre os valores de UA, RP e DS nos ambientes AF, FM e R (Tabela 1). Os teores médios de areia, silte e argila foram semelhantes (areia = 445.34 ± 257.12 ; silte = 136.23 ± 82.72 ; argila = 418.46 ± 184.69) em todos os ambientes estudados.

Análises de correlação (Figura 2A) para o conjunto de dados revelaram uma correlação negativa entre DS e RP ($r_s = -0.39$; $p = 0.01$); e DS e UA ($r_s = -0.87$; $p = 0.001$). Uma correlação positiva foi observada entre RP e UA ($r_s = 0.56$; $p = 0.001$).

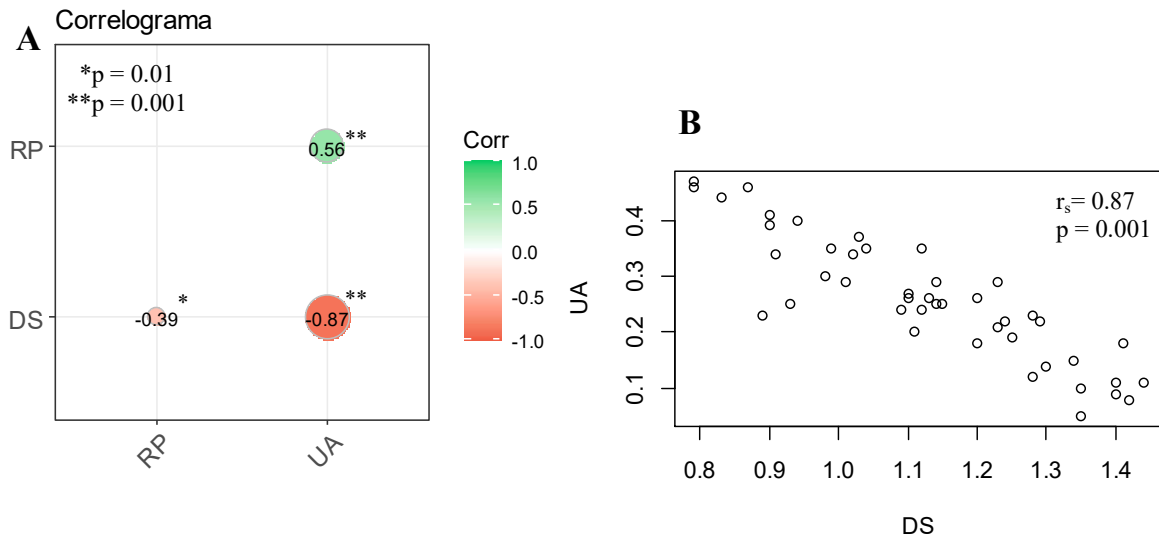


Fig.2. Correlação *Spearman* entre as variáveis físicas: umidade atual (UA), resistência do solo à penetração (RP) e densidade do solo (DS) (A); e gráfico de dispersão de dados da relação entre UA e DS (B), considerando todo o conjunto de dados ($n=44$).

Após a separação do solo pela classe textural (argilosa e arenosa), apenas a correlação entre as variáveis UA e DS apresentaram valores significativos, tanto para os solos argilosos ($r_s = -0.81$; $p = 0.001$) como arenosos ($r_s = -0.77$; $p = 0.001$). Ao contrário da relação observada para o conjunto completo de dados (Figura 2A), a correlação entre as variáveis RP e DS é positiva para as amostras em solos argilosos, apesar de não significativa (Figura 3B).

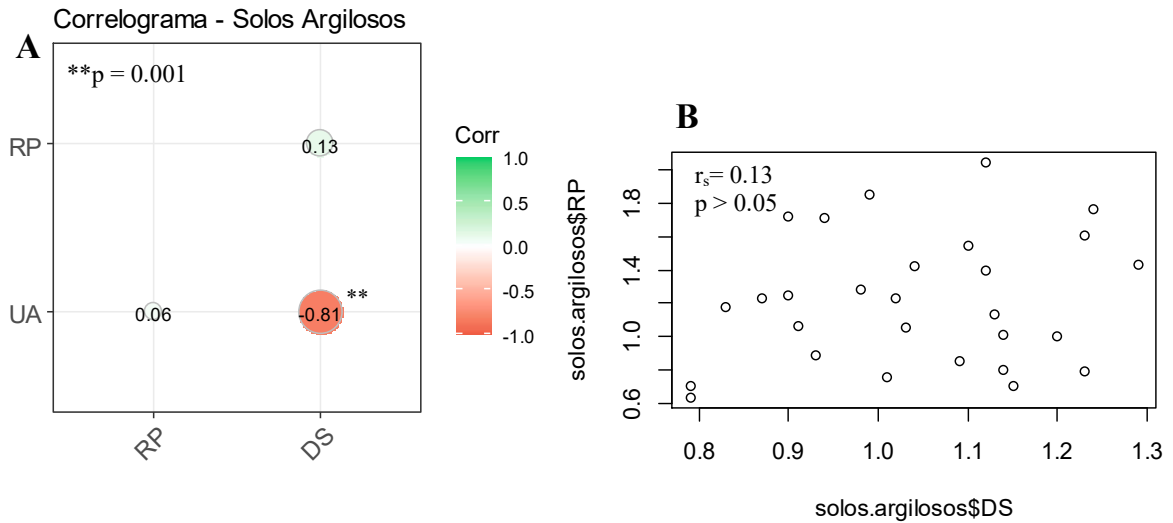


Fig.3. Correlação *Spearman* entre as variáveis físicas: umidade atual (UA), resistência do solo à penetração (RP) e densidade do solo (DS) (A); e gráfico de dispersão de dados da relação entre RP e DS (B), considerando os solos de textura argilosa (n=28).

3.2. Comparação de características do solo dos três ambientes

As duas primeiras dimensões da análise multivariada (PCA) expressam 65% da variação total dos dados (Figura 4A). Tais variações são baseadas em atributos químicos e físicos de amostras de solo coletadas nos três ambientes estudados, a partir das variáveis retidas pelo conjunto mínimo de dados (CMD). Segundo as análises, dentre as variáveis qualitativas, textura do solo e ambientes (AF, FM e R) são fatores que melhor explicaram a distância entre os indivíduos nas dimensões apresentadas (p=0.001).

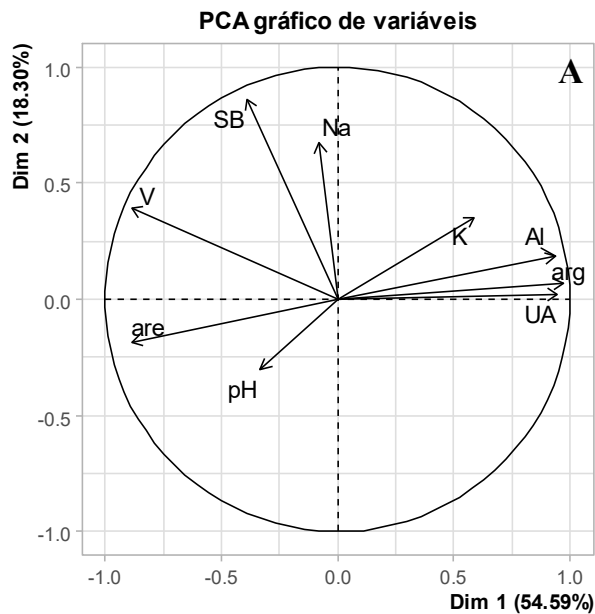
Observando o primeiro eixo do gráfico de variáveis da PCA (Figura 4A), é possível notar um alinhamento em sentido oposto das variáveis V e areia (lado negativo) e UA, argila, Al no outro (lado positivo). Observando os dois eixos, (~65% da variação explicada) notamos que à esquerda do gráfico, a variação dos dados é influenciada por variáveis relacionadas à fertilidade do solo (SB, pH, V%). Na direção oposta, à direita, a variação dos dados é conduzida pelas variáveis UA e argila, indicando boas características físicas para o crescimento vegetal. No mesmo sentido, é indicada uma alta presença do cátion ácido Al^{3+} , caracterizando uma elevada acidez do solo.

Variáveis relacionadas à textura do solo, teores de areia e argila, apresentaram-se inversamente proporcionais entre si em relação à variação dos dados. Este fato indica uma influência da textura do solo nos atributos físicos e químicos analisados.

No gráfico de indivíduos (Figura 4B), as elipses de confiança representam o baricentro dos grupos e alinham na diagonal as amostras oriundas da roça (R), sistemas agroflorestais (AF) e floresta madura (FM), posicionando as amostras de solo do ambiente AF entre R e FM, evidenciando que possuem características intermediárias em relação a estes ambientes.

Considerando as distâncias entre as observações plotadas, alguns indivíduos estão mais distantes da elipse relacionada ao ambiente de coleta da amostra. Destaca-se a observação R02, referente a uma amostra de solo de uma área de roça jovem que substituiu uma área de floresta natural (aberta há menos de quatro meses na data da coleta). Este fato justifica a distância das demais observações do ambiente R e proximidade a características do ambiente FM. A observação FM10 representa amostras de uma área natural de campinarana, formações vegetais associadas a solos arenosos. Essa justificativa é confirmada pela proximidade à representação de outras amostras coletadas em áreas semelhantes, como AF13 e AF10, que também apareceram deslocadas do grupo de observações para AF. A observação FM19, apesar de intercalada entre observações relacionadas aos outros ambientes (AF e R), está em posição próxima à observação R19. Apesar de representarem diferentes usos do solo, as duas observações representam amostras de solo de áreas adjacentes em uma mesma unidade rural, ou seja, geograficamente muito próximas. É notada a mesma proximidade entre as observações AF04 e FM04, e AF05 e FM05.

As variações observadas para o conjunto de dados reduzido, considerando apenas amostras obtidas em solos dos SAF, seguem tendências observadas para o conjunto de dados geral (Figura 5A). Com 73% da variação dos dados apresentados no gráfico de indivíduos da PCA (Figura 5B), é possível observar um claro agrupamento de dados em função da textura do solo, indicando a influência da textura nas características do solo nos SAF. Porém, o alinhamento é na diagonal, mostrando uma combinação de fatores influenciando mais os SAF sobre solo mais argiloso que arenoso, como é observado na parte direita do gráfico um alinhamento no primeiro eixo (explica 54% da variação) e no lado esquerdo uma dispersão do segundo eixo (acrescendo mais 18% da variância explicada).



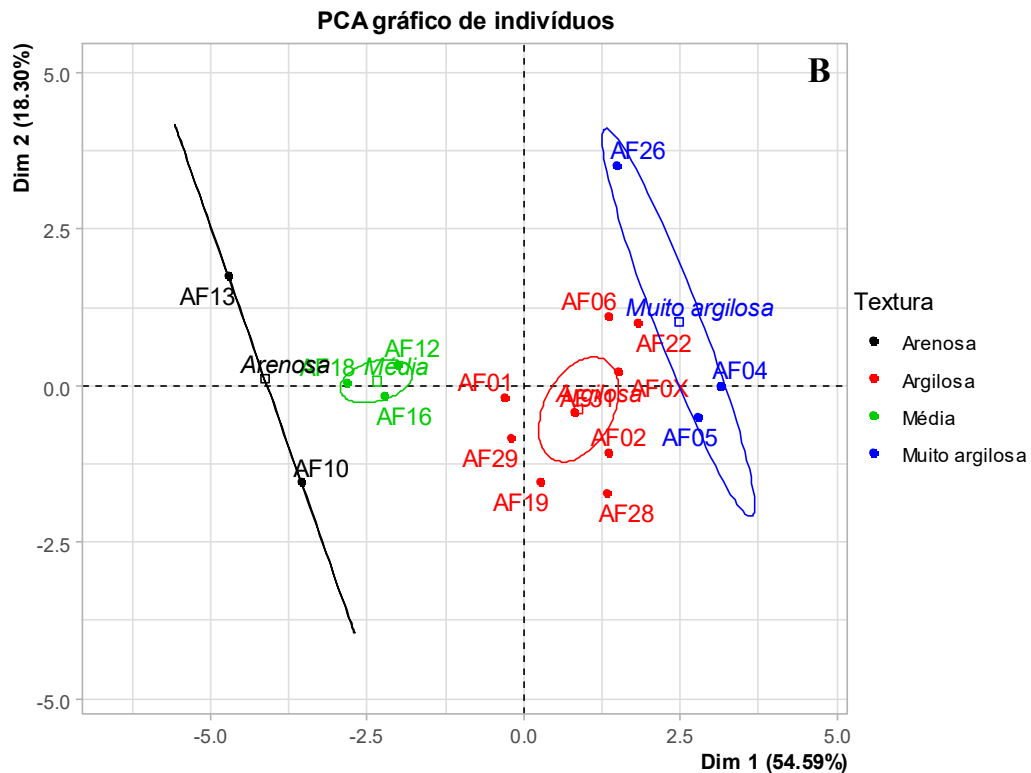


Fig.5. Variáveis (A) e indivíduos agrupados por classes de textura (B) resultantes da Análise de Componentes Principais (PCA) considerando os SAF analisados (n=17) da RDS do Uatumã.

3.3.2. Fatores intrínsecos

Não foram observados valores de correlação ($p > 0.05$) entre as variáveis intrínsecas ao SAF (histórico de uso do solo, idade do plantio e práticas de manejo) e as variáveis do CMD de maior contribuição para a variação dos dados (UA, Al^{3+} e SB).

4. DISCUSSÃO

4.1. Características gerais do solo

4.1.1 Propriedades químicas

Considerando valores médios obtidos para todas as amostras (n=44), análises dos atributos pH, acidez potencial e Al revelaram alta acidez do solo nos sítios estudados da RDSU. Os valores para estas variáveis foram classificados como “muito baixo”, “muito alto” e “muito alto”, respectivamente, de acordo com os valores limites estabelecidos para solos da região (Moreira & Fageria, 2009). Entre os ambientes de uso do solo analisado, os melhores

valores para as variáveis foram obtidos para R ($\text{pH-CaCl}_2=3.75$; acidez potencial=10.64; $\text{Al}=1.79$). Esses valores são considerados extremos em relação a valores obtidos por Moreira & Fageria (2009), que encontraram valores médios de pH de 4.4, considerando amostras em sítios de coleta espalhados pelo Estado do Amazonas. Maiores valores de pH nas áreas da agricultura e agrofloresta, em relação a floresta, também foram observados por outros trabalhos realizados no Amazonas (Moreira et al., 2009; Salim et al., 2018).

A SB e V% na FM foram menores em relação aos demais ambientes (Tabela 1). Essa tendência foi também observada por Moreira et al. (2009), que registrou menor valor para SB em ambiente de floresta em relação a áreas de agricultura e agrofloresta. No entanto, de forma geral os teores são inferiores aos encontrados em sítios de regiões próximas ($\text{SB}=1.2$; $\text{V}\%=12.72\%$; Moreira & Fageria, 2009).

De forma geral, solos da região da Amazônia Central (e.g. Latossolos, Argissolos) são considerados pedologicamente antigos, marcados por intenso intemperismo e quantidade reduzida de elementos minerais necessários para o desenvolvimento vegetal (Quesada et al., 2010). Nesse contexto, características associadas à disponibilidade de nutrientes em ambientes antropizados resultam do enriquecimento pelas cinzas associado à prática de corte e queima (Kleinman et al., 1995). Apesar das restrições associadas ao longo prazo (Kleinman et al., 1995), este benefício, inclusive, justifica a utilização tradicional da queima para o preparo do solo, tornando-o apropriado para o cultivo.

Ainda, por manter uma rápida ciclagem de nutrientes, condições do ambiente na floresta fazem com que nutrientes sejam disponibilizados em menor quantidade (Young, 1989). Esse efeito está de acordo com os resultados observados para as áreas estudadas.

O maior valor para teor de P foi encontrado em uma das áreas amostradas de AF ($\text{P}=15 \text{ mg dm}^{-3}$), considerado alto em relação à média de valores encontrados na região ($\text{P}=5.1 \text{ mg dm}^{-3}$; Moreira & Fageria, 2009). Essa amostra específica foi coletada em uma área

descrita como “terra preta” por moradores da RDSU – amostra removida das análises (ver *outliers*, Figura A.1). Esses solos são conhecidos regionalmente como Terra Preta de Índio (Sombroek, 1966; Smith, 1980; Glaser, 2007) caracterizados por modificações de origem humana e conteúdo elevado de fósforo e identificados como horizontes antrópicos (dos Santos et al., 2018).

4.1.2. Propriedades físicas do solo

Dentre as relações entre as variáveis UA, DS e RP, apenas a correlação entre as variáveis UA e DS apresentou tendências coerentes (Figura 2B). A relação entre RP e UA, RP e DS (Figura 2A) não representam a tendência observada para essas variáveis.

A resistência do solo à penetração é uma medida relacionada a condições físicas do solo para o crescimento de raízes (Burger & Kelting, 1999; Schoenholtz et al., 2000). Apesar de ser um indicador de fácil medição, está sujeito a influência de fatores diversos, como conteúdo de água, densidade e textura do solo (Reichert et al., 2010). Quando esses fatores são mapeados, de forma generalizada, a tendência é que seja encontrada uma relação inversa ao aumento da umidade, e direta ao aumento da densidade do solo (Reichert et al., 2010), diferentemente do que mostraram os dados.

Apesar disso, segundo Reichert et al. (2010), para um mesmo conteúdo de água um solo argiloso apresenta maior resistência que um solo arenoso. Considerando que, entre os solos amostrados, 28 foram classificados como argilosos e 16 como solos arenosos, a maior representação da argila nas análises (64%) gerais pode ter influenciado a correlação (Figura 3A).

Por ser uma propriedade física fundamental no controle de diferentes funções do solo, a textura exerce grande influência em diferentes propriedades do solo (Schoenholtz et al., 2000). Por isso, a variação da textura entre os sítios amostrados pode justificar as tendências contraditórias observadas. Resultados das análises multivariadas (Figura 2A) mostram que

variáveis físicas do solo presentes no CMD acompanham a variação dos dados em sentidos opostos.

Ao avaliar a correlação entre as variáveis físicas, considerando apenas os solos argilosos (Figura 3A), foi observada uma mudança na relação entre UA e RP. Apesar de não significativa ($p>0.05$) e do baixo valor de correlação ($r_s=0.13$), reflexo da redução do tamanho amostral para a análise ($n=28$), uma relação positiva entre as variáveis é indicada. A nova análise traz evidências da influência da textura nas demais variáveis analisadas.

Por fim, os dados analisados indicam que, em um curto prazo, as características do solo são influenciadas pela textura do solo, e que os efeitos do sistema de uso do solo (Ex: AF, R) terão influência apenas no longo prazo. Portanto, determinar a textura do solo é o primeiro passo no planejamento de atividades produtivas e sistemas de uso do solo, e essa informação é fundamental para projeção de possíveis efeitos de atividades de manejo empregadas.

4.2. Contraste de características do solo entre AF, FM e R

Diferenças nítidas em características do solo entre os ambientes AF, FM e R foram observadas a partir da análise multivariada dos dados (Figura 4B). Os grupos de dados formados, representados pelas elipses de confiança, indicam que as condições do solo nos ambientes de AF são intermediárias quando comparadas às condições dos solos em R e FM.

Considerando as condições naturais do ambiente FM, é assumido que as características físicas e químicas do solo respondem à provisão de serviços ecossistêmicos associados à formação do solo, ciclagem de nutrientes e manutenção hídrica (MEA, 2005). Portanto, características do solo em ambientes de FM representam características desejáveis para o solo na adoção de práticas produtivas, como práticas agroflorestais, utilizadas como referência em nosso trabalho.

Apesar de prover importantes serviços ecossistêmicos (e.g. matéria prima, alimento) (MEA, 2005), a agricultura pode ser também uma fonte de desserviços para os ecossistemas (Power, 2010), como a perda de biodiversidade, contaminação de mananciais e perda de nutrientes do sistema (Zhang et al., 2007).

Na agricultura itinerante, impactos negativos no solo estão associados à intensificação de ciclos de cultivo e redução do período de pousio (Van Vliet et al., 2012), que ultrapassam a capacidade de resiliência dos solos (Ribeiro Filho et al., 2013). Esses impactos são desencadeados por mudanças econômicas, sociais e culturais que afetam comunidades que dependem da prática para subsistência (Van Vliet et al., 2012; Jakovac et al., 2017). Apesar disso, a relação da prática ao sistema solo não é considerada inadequada (Ribeiro Filho et al., 2013), quando existe o controle dos demais fatores.

Apesar das restrições nutricionais, características físicas do solo na região são consideradas favoráveis para o crescimento vegetal (Quesada et al., 2010). A continuidade produtiva da agricultura de corte e queima, portanto, é limitada pela fertilidade do solo. Para evitar essas perdas e garantir o uso contínuo dessas áreas, podem ser empregadas práticas como adubação e calagem (Cravo & Smyth, 1997). Do contrário, os impactos gerados no solo podem afetar a sustentabilidade do sistema de cultivo e levam à redução da produtividade (Kleinman et al., 1995).

Na maioria das áreas estudadas, o plantio do SAF foi feito em solos degradados, abandonados pelos agricultores devido à redução produtividade dos cultivos. Considerando o longo caminho a percorrer entre o estado de degradação da R e de produtividade da FM, essa observação indica que a implantação dos SAF gerou efeitos no solo que diferenciam AF de R, ainda que não corresponda às características encontradas no solo da FM. Portanto, esse efeito indica que as práticas agroflorestais utilizadas na RDSU promoveram melhorias nas características do solo, principalmente relacionadas à produtividade.

Ao analisar os pesos das variáveis na PCA, é possível notar que a variação de observações associadas a R é influenciada por variáveis relacionadas à fertilidade do solo. Essa tendência pode estar ligada ao aumento na fertilidade do solo em curto prazo, associado à prática da queima (Kleinman et al., 1995) utilizada no cultivo no ambiente R. Essa tendência é observada no conjunto de dados analisado (Figura 4B), onde a variação das amostras da FM se desloca em sentido oposto às da R. Em longo termo, no entanto, a prática de queima leva a degradação do solo (Kleinman et al., 1995), especialmente em solos de regiões tropicais, de baixa fertilidade e sob condições de temperatura e umidade elevadas. Nessas regiões, o material orgânico e os processos de decomposição possuem um papel importante na manutenção da nutrição do solo (Kleinman et al., 1995; Pinho et al., 2012).

O cultivo de espécies perenes, com ciclos mais longos, permite a incorporação de nutrientes ao sistema. Em práticas agroflorestais, a inclusão do estrato arbóreo permite a manutenção de taxas de matéria orgânica que contribuem para a disponibilização de nutrientes ao sistema e formação de partículas carregadas negativamente, que mantêm esses nutrientes disponíveis para a absorção das plantas (Nair, 1993; Verchot et al., 2007; Pinho et al., 2012). A incorporação de nutrientes, no entanto, depende da retirada de produtos (e.g. frutos, madeira, cipós), que tende a reduzir o aporte (e.g. exportação de P e K pela colheita de cupuaçu e pupunha; Alfaia et al., 2004). Ao comparar R e AF, a prática que envolver a exportação de nutrientes em maior quantidade observará a maior perda de fertilidade.

Por fim, a dispersão dos dados revela alguns pontos deslocados em relação à elipse de confiança associada a cada ambiente (Figura 4B). Tais observações evidenciam a influência de diferentes fatores – além do uso do solo – em características do solo. Em alguns casos, tais fatores estão associados à proximidade geográfica, onde amostras coletadas em uma mesma unidade rural, ainda que em diferentes ambientes, apresentaram características semelhantes (i.e. AF19 e R19; AF04 e FM04; AF05 e FM05). Este efeito indica que os atributos do solo

analisados não sofreram efeito da mudança de uso, evidenciando a influência da proximidade geográfica na similaridade entre amostras e ressaltando as diferenças entre os tipos de solos existentes na RDSU.

4.3. Fatores de influência no solo dos SAF

4.3.1. Fatores intrínsecos e extrínsecos

A importante influência da textura em propriedades químicas e físicas dos solos amostrados é evidente tanto na comparação entre ambientes (Figura 4A), como na análise de fatores de influência no solo dos SAF estudados (Figura 5B). Segundo Schoenholtz et al. (2000), a textura é a propriedade fundamental de um solo e exerce controle na dinâmica da água, de nutrientes e trocas gasosas. Por isso, influencia grande parte das propriedades e funções do solo (Schoenholtz et al., 2000).

Análises do efeito de fatores intrínsecos e extrínsecos no solo de AF mostraram que a textura do solo (fator extrínseco) é a principal variável qualitativa responsável pela distância entre os grupos formados pela PCA (Figura 5B) e esta variação observada entre os AF deve estar mais relacionada a consequências deste tipo de solo do que ao manejo e tratos culturais despendidos nessas áreas, uma vez que as demais variáveis qualitativas analisadas (idade, histórico da área e manejo dos plantios – fatores intrínsecos) não foram correlacionadas às propriedades químicas e físicas estudadas.

Nos plantios estudados, portanto, características extrínsecas aos SAF prevalecem sobre suas características intrínsecas, superando a influência de práticas de manejo em propriedades físicas e químicas do solo. Contudo, esse fato pode estar relacionado à variedade de contextos associados aos SAF estudados. Esses plantios foram feitos sob diferentes estados de degradação, considerando tempo desde o desmatamento e uso do solo anterior. Esses fatores podem dificultar a observação de tendências gerais. Quando comparados solos em condições homogêneas, práticas de manejo podem influenciar na produtividade do sistema.

Práticas como a poda de galhos, a depender da composição de espécies do sistema e frequência da atividade, permitem a manipulação do acúmulo de matéria seca e liberação de nutrientes (Young, 1989).

Por fim, é importante destacar que a maior parte dos SAF estudados tem entre três e quatro anos de cultivo. Ainda, o intervalo entre o plantio dos sistemas é pequeno. Dessa forma, o espaço de tempo analisado pode não ser o suficiente para evidenciar diferenças em atributos do solo e outras características do plantio, principalmente àquelas que respondem ao manejo, considerando os métodos utilizados por este estudo. Em longo prazo, há evidências de que plantios de SAF se tornam mais eficientes no aumento de teores de carbono orgânico do solo (Chatterjee et al., 2018) e podem recuperar níveis semelhantes aos da floresta madura (Recco et al., 2000).

4.4. Recomendações para o cultivo de SAF na RDSU

Na iniciativa analisada, as práticas de manejo foram baseadas no desenho dos SAF implantados na RDSU. No entanto, os locais onde as foram feitos os plantios diferem entre si por características do solo e histórico de uso do solo. Em relação aos plantios, esses diferem quanto à heterogeneidade dos SAF relacionada à composição de espécies e intensidade de manejo. Esses fatores impedem que o modelo de recomendações seja aplicado de forma homogênea para todos os plantios da RDSU.

Considerando o grupo de fatores, características do solo são as principais influências na diferenciação dessas áreas (Tabela 1; Figura 4A). Como observado (Figura 5B), essa diferença é atribuída à textura do solo, que se distribuem de forma heterogênea entre os SAF. Orientações de práticas de manejo devem respeitar características inerentes às diferentes texturas do solo, a priori, separando recomendações de manejo e uso do solo para solos arenosos e solos argilosos.

Análises de aptidão para SAF na RDSU devem considerar a textura do solo como principal atributo. Ao priorizar análises diagnósticas, é possível reduzir custos operacionais e viabilizar a escolha de práticas adequadas (Bünemann et al., 2018). Ou seja, descarta a necessidade de utilizar análises mais caras ou complexas (e.g. análises químicas e físicas).

Resultados analisados mostram que a escolha por áreas mais aptas pode ter efeito benéfico superior ao efeito de práticas de manejo (i.e. frequência de intervenções no SAF, ver Capítulo I desta dissertação). Quando possível, devem ser priorizados locais com características mais adequadas ao desenvolvimento de ambos SAF e cultivo tradicional, considerando que o plantio concomitante pode ser uma alternativa viável (Capítulo I desta dissertação).

Considerando as áreas da RDSU estudadas, áreas de solos argilosos possuem maior aptidão para o cultivo de SAF em relação a solos arenosos. Essa decisão confere maior chance de desenvolvimento para o plantio. Aumentar a chance de desenvolvimento dos SAF pode impactar positivamente a decisão de adoção da ferramenta pelos agricultores (Saha et al., 2010; Meijer et al., 2015). Por consequência, a seleção de áreas inaptas pode prejudicar a adoção da ferramenta como forma de subsistência. É importante que haja um planejamento que contemple também uma forma de uso do solo para áreas consideradas inaptas ao uso do SAF, pois alguns agricultores terão essa configuração disponível.

CONCLUSÃO

O cultivo de sistemas agroflorestais em áreas da RDSU trouxe melhorias nos atributos do solo, quando em comparação ao solo das áreas de cultivo tradicional (roças de mandioca) e floresta natural madura. Análises de características físicas e químicas do solo nos três sistemas de uso da terra (AF, FM e R) mostraram que AF possui características intermediárias entre as observadas em FM e R.

A textura do solo (fator extrínseco) influenciou as demais características físicas e químicas do solo dos SAF estudados. Também apresentou impacto maior que os fatores intrínsecos analisados (histórico de uso do solo, idade do plantio e práticas de manejo) sobre características do solo nos plantios. Sugere-se que a ausência da detecção do efeito de fatores intrínsecos seja resultado da heterogeneidade de condições ambientais, culturais e históricas entre os plantios de SAF da RDSU.

Análises granulométricas devem ser consideradas na seleção de áreas para plantio de SAF na RDSU, assim como na recomendação de práticas de manejo para o seu cultivo. Assim, é possível aumentar as chances de sobrevivência do plantio e adoção da prática agroflorestal como forma de cultivo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos moradores da RDSU pela recepção e colaboração com a pesquisa; e ao IDESAM pelo apoio logístico e fornecimento de informações importantes para a pesquisa. Agradecemos a toda equipe de campo, Sara, Adriana, Jefferson, Rodrigo, Alcir, Alcimar, Gil, Júnior, Elino.

FINANCIAMENTO

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas [FAPEAM/PAPAC #06200920/2019]; e pela Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior [CAPES 2018/1].

REFERÊNCIAS

- Adams, C., Murrieta, R., Siqueira, A., Neves, W., & Sanches, R. (2006). O pão da terra: da invisibilidade da mandioca na Amazônia. In: Adams, C.; Murrieta, R.; Neves, W.A. (Org.). *Sociedades caboclas amazônicas: modernidade e invisibilidade*. pp.295-321. São Paulo: Annablume,
- Alfaia, S. S., Ribeiro, G. A., Nobre, A. D., Luizão, R. C., & Luizão, F. J. (2004). Evaluation of soil fertility in smallholder agroforestry systems and pastures in western Amazonia. *Agriculture, ecosystems&environment*, 102(3), 409-414.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.08.011>

Amazonas. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Amazonas – SDS. (2009). *Série Técnica Planos e Gestão: Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã*. v.1 e 2. Itapiranga e São Sebastião do Uatumã, AM: SDS.

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., ... & Pulleman, M. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

Burger, J. A., & Kelting, D. L. (1999). Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecology and Management*, 122(1-2), 155-166. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00039-0)

Chatterjee, N., Nair, P. R., Chakraborty, S., & Nair, V. D. (2018). Changes in soil carbon stocks across the Forest-Agroforest-Agriculture/Pasture continuum in various agroecological regions: a meta-analysis. *Agriculture, ecosystems&environment*, 266, 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.014>

Cordeiro, D. G., Batista, E. M., & do Amaral, E. F. (1998). Utilização do equipamento penetrômetro de cone para identificação dos níveis de compactação do solo. *Embrapa Acre-Séries anteriores (INFOTECA-E)*.

Cravo, M. S., & Smyth, T. J. (1997). Manejo sustentado da fertilidade de um Latossolo da Amazônia Central sob cultivos sucessivos. *Revista brasileira de ciência do solo*, 21(4), 607-616. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831997000400011>

de Sá, M. A. C., & Santos Júnior, J. (2007). Considerações teóricas sobre o cálculo da resistência mecânica do solo à penetração determinada com penetrômetros dinâmicos. *Embrapa Cerrados-Documents (INFOTECA-E)*.

Dollinger, J., & Jose, S. (2018). Agroforestry for soilhealth. *Agroforestry systems*, 92(2), 213-219. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>

Donatti, R.N.; Scudeller, V.V.; Santos-Silva, E.N. (2011). Aspectos socioeconômicos dos produtores de farinha da comunidade Julião, zona rural de Manaus-AM. In: Santos-Silva, E.N.; Cavalcanti, M.J.; Scudeller, V.V. (Org.). *BioTupé: Meio Físico, Diversidade Biológica e Sociocultural do Baixo Rio Negro, Amazônia Central*, v.3. Manaus, AM: Rizoma Editorial.

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bezdicek, D. F.; Stewart, B. A. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, 1-21. Madison, WI: Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran, J. W.; Jones, A. J.; Dick, R. P.; Bigham, J. M.; Kral, D. M.; Viney, M. K. (Eds.). *Methods for assessing soil quality*, 49, 25-37. Madison, WI: Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c2>

dos Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Dos Anjos, L. H. C., De Oliveira, V. A., Lumbrreras, J. F., Coelho, M. R., ... & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, DF: Embrapa.

Embrapa (1997). Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997. 212p.

Glaser, B. (2007). Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1478), 187-196. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1978>

Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia – IDESAM, 2020. *Programa Carbono Neutro*. <https://idesam.org/carbononeutro/> (accessed 26 April 2020).

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. *Clima: Gráficos Climatológicos (1931-1960 e 1961-1990)*, 2019. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home2/index> (accessed 15 January 2019).

Jakovac, C.C., Dutrieux, L.P., Siti, L., Peña-Claros, M., & Bongers, F. (2017). Spatial and temporal dynamics of shifting cultivation in the middle-Amazonas river: Expansion and intensification. *PloS one*, 12(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181092>

Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry systems*, 76(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>

Junqueira, A. B., Almekinders, C. J., Stomph, T. J., Clement, C. R., & Struik, P. C. (2016). The role of Amazonian anthropogenic soils in shifting cultivation: learning from farmers' rationales. *Ecology and Society*, 21(1).

Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and psychological measurement*, 20(1), 141-151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>

Kleinman, P.J., Pimentel, D., & Bryant, R.B. (1995). The ecological sustainability of slash-and-burn agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 52(2-3), 235-249. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(94\)00531-I](https://doi.org/10.1016/0167-8809(94)00531-I)

Korkmaz, S., Goksuluk, D., Zararsiz, G. (2014). MVN: An R Package for Assessing Multivariate Normality. *The R Journal*, 6(2), 151–162. <https://journal.r-project.org/archive/2014-2/korkmaz-goksuluk-zararsiz.pdf>.

Lê, S., Josse, J. & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*. **25(1)**. pp. 1-18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>

Mahalanobis, P. C. (1936). *On the generalized distance in statistics*. National Institute of Science of India. 2, pp. 49-55.

Meijer, S.S., Catacutan, D., Ajayi, O.C., Sileshi, G.W., & Nieuwenhuis, M. (2015). The role of knowledge, attitudes and perceptions in the uptake of agricultural and agroforestry innovations among smallholder farmers in sub-Saharan Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 13(1), 40-54. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.912493>

Millennium Ecosystem Assessment – MEA. (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute.

Moreira, A., & Fageria, N. K. (2009). Soil chemical attributes of Amazonas state, Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40(17-18), 2912-2925. <https://doi.org/10.1080/00103620903175371>

Moreira, F.M.S, Nóbrega, R.S.A., da Conceição Jesus, E., Ferreira, D.F., & Pérez, D.V. (2009). Differentiation in the fertility of Inceptisols as related to land use in the upper Solimões river region, western Amazon. *Science of the Total Environment*, 408(2), 349-355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.007>

Nair, P. R., Nair, V. D., Kumar, B. M., & Showalter, J. M. (2010). Carbon sequestration in agroforestry systems. In: D.S. SPARKS (Eds.). *Advances in agronomy* (Vol. 108, pp. 237-307). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)

Nair, P.K.R. (1993). *An introduction to agroforestry*. Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1608-4>

Nair, P.K.R., Kumar, B.M., & Nair, V.D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science*, 172(1), 10-23. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>

Pinho, R.C., Miller, R.P., & Alfaia, S.S. (2012). Agroforestry and the improvement of soil fertility: a view from Amazonia. *Applied and environmental soil science*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/616383>

Porro, R. (2009). Expectativas e desafios para a adoção da alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação. In: Porro, R (Ed. Tec.). *Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação*. pp.33-51. Brasília-DF: Embrapa Informação e Tecnologia.

Power, A.G. (2010). Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 365(1554), 2959-2971. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>

Quesada, C. A., Lloyd, J., Schwarz, M., Patino, S., Baker, T. R., Czimczik, C., ... & Santos, A. J. B. (2010). Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences*, 7(5), 1515-1541. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1515-2010>

Recco, R.D., Amaral, E.F., Pinto, E.M., Melo, A.W.F. (2000). Avaliação do nível de carbono em solos tropicais submetidos a plantio de sistemas agroflorestais em diferentes idades na Amazonia Ocidental. In: *III Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais* (pp. 55-57). Manaus, Brazil: Embrapa Amazônia Ocidental.

Reichert, J. M., Reinert, D. J., Suzuki, L. E. A. S., & Horn, R. (2010). Mecânica do solo. In: V.L. QUIRIJN (Ed.). *Física do solo* (29-102). Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

- Ribeiro Filho, A.A., Adams, C., & Murrieta, R.S.S. (2013). The impacts of shifting cultivation on tropical forest soil: a review. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 8(3), 693-727. <https://doi.org/10.1590/S1981-81222013000300013>
- Saha, R., Ghosh, P.K., Mishra, V.K., Majumdar, B., & Tomar, J.M.S. (2010). Can agroforestry be a resource conservation tool to maintain soil health in the fragile ecosystem of north-east India?. *Outlook on AGRICULTURE*, 39(3), 191-196. <https://doi.org/10.5367/oa.2010.0004>
- Salim, M.V.C., Miller, R.P., Ticona-Benavente, C.A., van Leeuwen, J., & Alfaia, S.S. (2018). Soil fertility management in indigenous homegardens of Central Amazonia, Brazil. *Agroforestry systems*, 92(2), 463-472. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0105-6>
- Schoenholtz, S. H., Van Miegroet, H., & Burger, J. A. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest ecology and management*, 138(1-3), 335-356. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0)
- Smith, N. J. (1980). Anthrosols and human carrying capacity in Amazonia. *Annals of the Association of American Geographers*, 70(4), 553-566. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1980.tb01332.x>
- Sombroek, W. (1966). Amazon soils: A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. Wageningen. *Center for agricultural publications and documentation*. 292p.
- Trancoso & Carneiro (2007). Diagnóstico de Caracterização dos Fatores Abióticos da RDS do Uatumã. In: AMAZONAS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Amazonas – SDS. (2009). *Série Técnica Planos e Gestão: Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã* (p. 68). v. 1 e 2. Itapiranga e São Sebastião do Uatumã, AM: SDS.
- Van Vliet, N., Adams, C., Vieira, I. C. G., & Mertz, O. (2013). “Slash and burn” and “shifting” cultivation systems in forest agriculture frontiers from the Brazilian Amazon. *Society & Natural Resources*, 26(12), 1454-1467. <https://doi.org/10.1080/08941920.2013.820813>
- Van Vliet, N., Mertz, O., Heinemann, A., Langanke, T., Pascual, U., Schmook, B., ... & Castella, J. C. (2012). Trends, drivers and impacts of changes in swidden cultivation in tropical forest-agriculture frontiers: a global assessment. *Global Environmental Change*, 22(2), 418-429. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.009>
- Veloso, H. P., Rangel-Filho, A. L. R., & Lima, J. C. A. (1991). *Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal*. Rio de Janeiro, RJ: IBGE.
- Verchot, L. V., Van Noordwijk, M., Kandji, S., Tomich, T., Ong, C., Albrecht, A., ... & Palm, C. (2007). Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 12(5), 901-918. <https://doi.org/10.1007/s11027-007-9105-6>
- Young, A. (1989). *Agroforestry for soil conservation*. CAB International, ICRAF. UK: BPCC Wheatons Ltd.

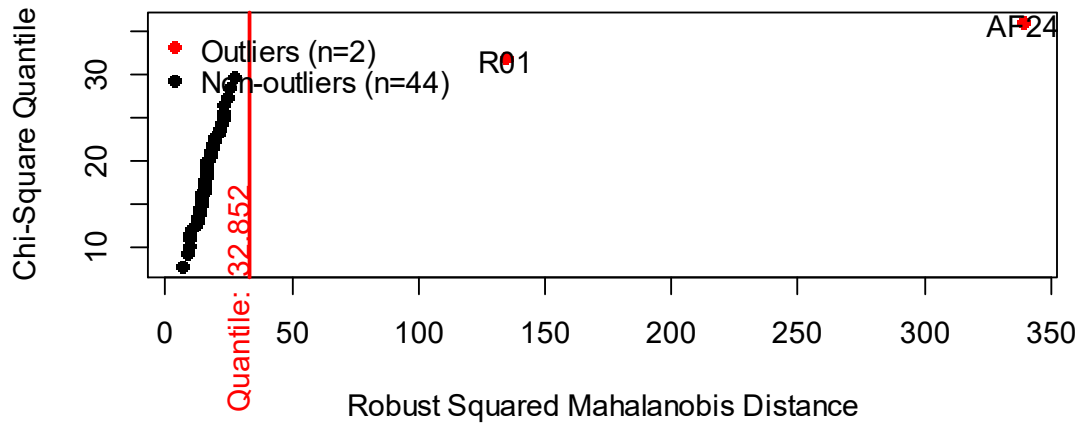
Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K., & Swinton, S. M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological economics*, 64(2), 253-260.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024>

APÊNDICE A

Figura A.1

Análise de dados discrepantes (*outliers*) pelo cálculo da Distância de Mahalanobis (D_M^2) (IC = 0,95). Em vermelho, observações que foram excluídas do conjunto de dados analisado.

Chi-Square Q-Q Plot



APÊNDICE B

Tabela B.1

Resultados da análise de componentes principais (PCA) para 14 atributos químicos do solo (n=44).

	Carga de fatores				
	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
pH CaCl ₂	-0.483	0.063	0.049	<u>0.661</u>	0.388
Al ³⁺	<u>0.936</u>	0.257	-0.054	0.025	-0.008
H ⁺ +Al ³⁺	0.898	0.390	-0.039	0.077	0.015
Ca ²⁺	-0.499	0.793	-0.210	0.016	-0.003
Mg ²⁺	-0.091	0.645	0.305	0.153	-0.244
K	0.329	0.289	<u>-0.375</u>	-0.545	0.369
SB	-0.464	<u>0.826</u>	-0.221	-0.018	0.116
T	0.875	0.440	-0.040	0.080	0.015
t	0.827	0.503	-0.060	0.046	-0.009
V	<u>-0.849</u>	0.456	-0.165	-0.062	0.086
m	0.821	-0.486	-0.013	-0.038	0.001
P	-0.045	0.604	0.505	-0.206	-0.378
Na	0.079	0.148	<u>0.722</u>	-0.232	0.593
MO	0.759	0.240	-0.034	0.393	0.120
Autovalores	5.925	3.367	1.144	1.029	0.877
Variância acumulada (%)	42.319	66.367	74.537	81.889	88.151

Nota: Valores em negrito foram parâmetros com maiores valores de carga em cada componente; valores em negrito e sublinhado são os retidos no conjunto mínimo de dados.

Tabela B.2

Resultados da análise de componentes principais (PCA) para 6 atributos físicos do solo (n=44).

	Carga de fatores				
	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
RP	0.724	0.666	-0.131	0.063	-0.091
UA	<u>0.951</u>	-0.103	0.149	0.138	0.192
DS	-0.856	0.449	0.068	-0.119	0.215
areia	<u>-0.902</u>	0.149	0.334	0.207	-0.100
silte	0.912	0.066	0.310	-0.251	-0.075
argila	<u>0.975</u>	0.076	0.031	0.141	0.047
Autovalores	4.757	0.688	0.253	0.163	0.109
Variância acumulada (%)	79.277	90.747	94.956	97.674	99.489

Nota: Valores em negrito foram parâmetros com maiores valores de carga em cada componente; valores em negrito e sublinhado são os retidos no conjunto mínimo de dados.

Tabela B.3

Coefficientes de correlação *Spearman*(r_s) entre 20 parâmetros em diferentes ambientes de uso do solo da RDSU: sistema agroflorestal, floresta madura e roça de mandioca, excluindo dados discrepantes (n=44).

	pH CaCl ₂	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K	SB	T	t	V	m	P	Na	MO	RP	UA	DS	areia	silte	argila	
pH_{CaCl2}	1.00																				
Al³⁺	-0.46*	1.00																			
H⁺+Al³⁺	-0.40*	0.95**	1.00																		
Ca²⁺	0.12 ^{ns}	-0.16 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	1.00																	
Mg²⁺	0.23 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.75**	1.00																
K	-0.33*	0.36*	0.42*	0.04 ^{ns}	0.10 ^{ns}	1.00															
SB	0.20 ^{ns}	-0.09 ^{ns}	-0.01 ^{ns}	0.92**	0.93**	0.11 ^{ns}	1.00														
T	-0.36*	0.94**	0.99**	0.03 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.44*	0.08 ^{ns}	1.00													
t	-0.37*	0.97**	0.94**	0.03 ^{ns}	0.29 ^{ns}	0.40*	0.10 ^{ns}	0.95**	1.00												
V	0.33*	-0.58**	-0.55**	0.79**	0.46*	-0.08 ^{ns}	0.82**	-0.46*	-0.43*	1.00											
m	-0.35*	0.66**	0.57**	-0.77**	-0.33 ^{ns}	0.08 ^{ns}	-0.77**	0.49**	0.52**	-0.97**	1.00										
P	-0.12 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.31*	0.62*	-0.02 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.03 ^{ns}	-0.04 ^{ns}	1.00									
Na	0.00 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.13 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.18 ^{ns}	-0.01 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.08 ^{ns}	-0.06 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.21 ^{ns}	1.00								
MO	-0.20 ^{ns}	0.75**	0.77**	-0.21 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	0.17 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	0.76**	0.73**	-0.58**	0.58**	-0.05 ^{ns}	0.05 ^{ns}	1.00							
RP	-0.17 ^{ns}	0.60**	0.60**	-0.03 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	0.38*	-0.02 ^{ns}	0.61**	0.61**	-0.32*	0.38*	-0.12 ^{ns}	-0.28 ^{ns}	0.56**	1.00						
UA	-0.18 ^{ns}	0.87**	0.82**	-0.18 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.31*	-0.05 ^{ns}	0.82**	0.86**	-0.49**	0.58**	-0.09 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.80**	0.56**	1.00					
DS	0.03 ^{ns}	-0.69**	-0.70**	0.18 ^{ns}	-0.10 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	0.06 ^{ns}	-0.70**	-0.69**	0.47*	-0.49**	0.09 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	-0.79**	-0.39*	-0.87**	1.00				
areia	0.17 ^{ns}	-0.87**	-0.84**	0.10 ^{ns}	-0.16 ^{ns}	-0.29 ^{ns}	0.01 ^{ns}	-0.84**	-0.87**	0.47*	-0.55**	0.06 ^{ns}	0.01 ^{ns}	-0.85**	-0.68**	-0.96**	0.85**	1.00			
silte	-0.20 ^{ns}	0.85**	0.85**	0.01 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.33*	0.10 ^{ns}	0.86**	0.87**	-0.39*	0.46*	0.07 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.83**	0.62**	0.87**	-0.74**	-0.91**	1.00		
argila	-0.17 ^{ns}	0.83**	0.80**	-0.13 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.28 ^{ns}	-0.03 ^{ns}	0.80**	0.83**	-0.46*	0.55**	-0.14 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	0.80**	0.69**	0.94**	-0.84**	-0.98**	0.84**	1.00	

Nota: *Nível de significância 0.05; **nível de significância 0.001.

Goulart, I.C.G.; Rasera, S.; Vidal, E.; Neves Junior, A.F.; Scudeller, V.V. 2020. Biomass in tropical agroforestry systems: how to estimate? Manuscrito em revisão pelo periódico *Agroforestry Systems*.

Biomass in tropical agroforestry systems: how to estimate?

Isabele Cristine Garcia Goulart^{1*}, Susane Rasera², Afrânio Ferreira Neves Junior¹, Veridiana Vizoni Scudeller¹

¹Forestry and Environmental Sciences Graduate Program, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas, Brazil, e-mail: isabelecgoulart@gmail.com, anevesjr@gmail.com, vscudeller@ufam.edu.br

²Professional practices: Improvement in Restoration Ecology and related practices, Luiz de Queiroz College of Agriculture, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, Brazil, e-mail: susanerasera@yahoo.com

* Correspondence author

ABSTRACT

Agroforestry systems (AFS) are potential sources of CO₂ sequestration and a sustainable alternative for land use, especially in the tropics. Despite that, they are not accounted in regional nor international carbon budgets due the lack of mechanisms for understanding and quantifying this potential. Although methods for estimating biomass in natural forests are well documented, standardized protocols for AFS are absent, which reflects a challenge related to complex interactions within environmental, social and cultural aspects of this practice. Methods currently used vary widely and usually result in over or underestimation, or increase time and financial resources expense. Learned lessons from the decision-making process to choose the most appropriate methods for estimating above-ground biomass in AFS are shared in this paper. The systems are based in Amazonian riverine communities at Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã. Analyses were carried out with nine allometric models reported in literature aiming to find the most suitable to the dataset. Final choice varied according to decision-making approach (qualitative or statistical). By the qualitative approach, the model developed by Nelson et al. (1999) were selected for estimation of above-ground biomass dry weight, and Silva (2007)'s model for estimations of fresh weight, both secondary forest-based, using trees diameter and total height as predictors. Though statistical indicators, the model developed by Segura et al. (2006) was selected for tree biomass dry weight estimation. Clear and simplified methodological processes can be more accessible to different audiences and may contribute to monitor the development of AFS in local initiatives.

KEYWORDS: Indirect method, mitigation, growth monitoring, conservation unit, Central Amazon

1. INTRODUCTION

The influence of human activities on the climate system is evident and has been illustrated by data from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014), which relates the increase in greenhouse gas (GHG) emissions to the changes observed in natural systems. Until the end of the century, an increase in the frequency and intensity of extreme climate events (i.e., prolonged and/or off-season droughts and floods) is expected in different regions of the planet (IPCC, 2014).

Such changes exert a significant impact on climate-dependent sectors (Verchot et al., 2007; IPCC, 2012), thereby affecting ecosystem biodiversity maintenance, human well-being and health, food security and clean water access and increasing ecosystem vulnerability to natural disasters (MA, 2005).

As an integrated approach to land use, agroforestry systems (AFSs) offer great potential for biomass production and carbon sequestration (Nair et al., 2009; Jose & Bardhan, 2012), which are benefits related to the greater capture capacity and resource use of these systems when compared to less diverse systems, such as monocultures and pastures (Nair et al., 2009).

Despite their mitigation potential, AFSs are not accounted in national or global carbon budgets (Abbas et al., 2017), which is due to the absence of mechanisms for its understanding and quantifying, such as for other ecosystem services provided by agroforestry (Jose, 2009; Kumar & Nair, 2011). Once measured, this potential may contribute to mitigation and adaptation strategies to climate change (Albrecht & Kandji, 2003; Riofrío et al., 2015).

While methods for estimating biomass in natural forests have included in mature discussions in numerous studies (i.e., Higuchi et al., 1998; Nelson et al., 1999; Chambers et al., 2001; Chave et al., 2014; Segura & Kanninen 2005), a consensus has not been reached on the most appropriate method for performing AFS estimates. Moreover, the processes used and

disclosed values are widely varied generating inconsistencies in existing databases (Kumar & Nair, 2011).

Among the main methodologies found in the literature is a combination of inventory and destructive sampling for fitting an equation. This approach was adopted by Schroth et al. (2002) to determine the above-ground biomass in multi-stratified systems in Central Amazonia; and by Segura et al. (2006) for similar procedures in a coffee based AFS in Matagalpa, Nicaragua.

Brancher (2010) estimated the biomass above the AFS soil in Tomé-Açu, Pará State using species-specific allometric equations, including equations developed by the study itself and obtained in the literature. For the other species, primary forest equations were adopted (Brown, 1989; Higuchi et al., 1998).

Ramos et al. (2018) estimated the aboveground biomass in a babassu palm-based AFS in Pará State using equations available in the literature, including species-specific equations when available or equations based on natural forests (Higuchi et al., 1998).

In the AFSs in the Atlantic Forest Biome in Ibirapitanga, Bahia State, Fernandes et al. (2018) used specific equations obtained from the literature for each category of species.

In terms of structure and function, a large diversity of AFSs is observed around the world. These differences may be determined by environmental and socioeconomic factors (Albrecht & Kandji, 2003) as well as by the age, planting density, species composition and management practices of the flora (Albrecht & Kandji, 2003; Ramos et al., 2018). The productivity of these systems depends on these factors (Albrecht & Kandji, 2003), which increases the risk associated with comparing different biomass stocks and different AFS carbon contents (Ramos et al., 2018).

The use of natural forest equations for the determination of biomass in an AFS is limited due to changes in tree shape and architecture, which is influenced by management

practices (Segura et al., 2006). Difficulties in simulating tree growth are among the main causes of uncertainty related to estimates of CO₂ removal by AFSs (Abbas et al., 2017).

Although the steps and methods for estimating biomass in AFSs have not been defined, the results of experiments must still be disseminated, including the methodological procedures used for sample collection and treatment and data analysis, which may incorporate models and global databases (Kumar & Nair, 2011). By presenting the step-by-step guide developed in the study, the present article shares lessons learned and strategies implemented to apply indirect methods to determine the biomass stock of AFSs under different ages, management intensities and species compositions in a conservation unit of the Central Amazon.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Agroforestry Systems of the RDSU

The studied AFSs are located in the Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã (RDSU), a Sustainable Use Conservation Unit (Amazonas Government, 2004) located 300 km from Manaus between the municipalities of Itapiranga and São Sebastião do Uatumã, Amazonas State, Brazil (**Fig. 1**).

RDSU shelters 20 communities and approximately 260 families distributed on the banks of the Uatumã, Caribi and Jatapu Rivers (Amazonas Government, 2009). According to data from the Reserve Management Plan, fishing, extractivism and agriculture are among the main activities developed by residents and represent important sources of income and subsistence.

The AFS plantings at the RDSU come from the initiative of the Neutral Carbon Program (PCN, for its acronym in Portuguese), which is a project created by the Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável do Amazonas (IDESAM) to recover degraded areas and support the reduction of GHG emissions (IDESAM, 2020). The present study

addresses data from the measurement of 18 AFSs implemented between 2011 and 2019 (ages from four months to eight years old).

Studied AFSs were planted in rural areas previously used for traditional crops, such as cassava, which were cultivated by RDSU residents who agreed to participate in the project. Based on a predefined model, planting process was performed by communal work with the help of IDESAM technicians and residents of each community. The choice of species was based on the opinions of each resident farmer.

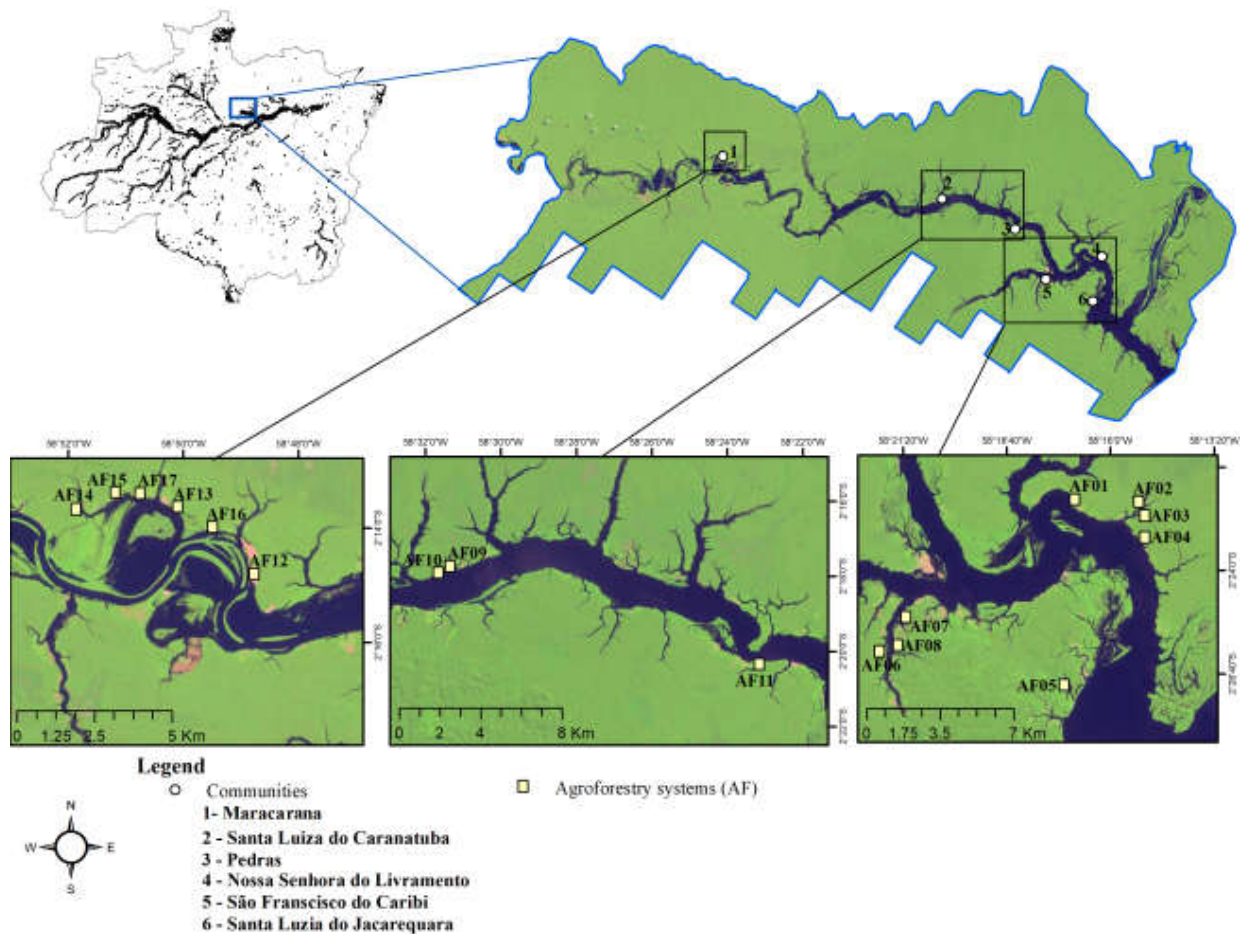


Fig. 1. Location of Uatumã Sustainable Development Reserve in Brazilian Amazon and agroforestry systems studied. Numeric labels refer to the riverine communities alongside Uatumã River. AF = agroforestry systems.

2.2. Database

Information of all tree specimens from each AFS (n=18), including the circumference at 30 cm above ground level (CGL), diameter at 30 cm above ground level (DGL), total height (h) and popular name of the tree species, was collected by the PCN team during monitoring activities between 2017 and 2019 and provided for the study.

To estimate the relationship between the DGL and diameter at breast height (DBH) for RDSU AFS trees, 63 specimens were sampled in July 2019. In 200 m² (20 x 10 m) plots marked in 16 AFS, the CGL and circumference at breast height (CBH) of three to five of the largest trees were measured using a tape measure. Circumference measurements were converted into diameters to perform the calculations.

2.3. Equations and Variables for Above-Ground Biomass Predictions

The cited studies were searched to identify the equations that should be used to estimate the above-ground biomass in AFSs. The selected equations met certain minimum criteria, such as the geographic location, vegetation type, tree species and dimensions (Rügnitz et al., 2009; **Table 1**).

To ensure the applicability of the preselected equations, specimens with a diameter at breast height (DBH) greater than or equal to 5 cm and a height greater than or equal to 200 cm were considered.

In addition to the variables obtained in the field (DBH and height), specific density data (d) were obtained in the literature (Zanne et al., 2009). Due to the lack of taxonomic information, the adopted values corresponded to the mean values available at the genus level.

2.4. Prediction of Above-Ground Biomass and Evaluation of the Preselected Equations

Dry or fresh weight estimates for above-ground biomass were performed for specimens from the 18 AFSs (n = 1.222) using the preselected equations. The data trends were analyzed in a scatter plot between the DBH and above-ground biomass.

Table 1. Preselected allometric models for above-ground biomass estimation. FW = tree mass fresh weight (kg), DW = tree mass dry weight (kg), DBH = diameter at breast height (measured at 1.30 m, in cm), h = total height (m), d = specific wood density (g cm^{-3}).

Equations	DBH range	Study site location	Source
$FW = 0.0336 * DBH^{2.171} * h^{1.038}$	$5 \leq DBH < 20$ cm	Natural Tropical Forests Central Amazonia	Higuchi et al. (1998)
$\text{Ln}(FW) = -1.754 + 2.665 * \text{Ln}(DBH)$	$5 \leq DBH < 20$ cm	Natural Tropical Forest Central Amazonia	Higuchi et al. (1998)
$\text{Ln}(FW) = -1.8338 + \text{Ln}(DBH) + 0.7662 * \text{Ln}(h)$	$5 \leq DBH \leq 33.1$ cm	Secondary Forest Central Amazonia	Silva (2007)
$DW = 0.0673 * (DBH^{2.171} * h^{1.038} * d)^{0.976}$	$DBH \geq 5$ cm	Acrossforesttypes Pantropical	Chave et al. (2014)
$\text{Ln}(DW) = -0.370 + 0.333 * \text{Ln}(DBH) + 0.933 * [\text{Ln}(DBH)]^2 - 0.122 * [\text{Ln}(DBH)]^3$	$DBH \geq 5$ cm	Natural Tropical Forest Central Amazonia	Chambers et al. (2001)
$\text{Ln}(DW) = -2.5202 + 2.1400 * \text{Ln}(DBH) + 0.4644 * \text{Ln}(h)$	$1.2 \leq DBH \leq 28.6$ cm	Secondary Forest Central Amazonia	Nelson et al. (1999)
$\text{Ln}(DW) = -1.8985 + 2.1569 * \text{Ln}(DBH) + 0.3888 * \text{Ln}(h) + 0.7218 * \text{Ln}(d)$	$1.2 \leq DBH \leq 28.6$ cm	Secondary Forest Central Amazonia	Nelson et al. (1999)
$\text{Ln}(DW) = -1.4702 + 2.4449 * \text{Ln}(DBH) + 0.9028 * \text{Ln}(d)$	$1.2 \leq DBH \leq 28.6$ cm	Secondary Forest Central Amazonia	Nelson et al. (1999)
$\text{Log}_{10}(DW) = -0.834 + 2.223 * \text{Log}_{10}(DBH)$	$5 \leq DBH < 44$ cm	Subtropical Humid Forest Coffee Agroforestry System	Segura et al. (2006)

The choice of equation was based on qualitative criteria, considering characteristics inherent to each equation and the methodology adopted by the respective authors; and quantitative criteria, considering statistical indicators.

2.5. Statistical analyses

Correlation analyses between the variables DGL and DBH and regression analysis between DBH and estimated tree weight (fresh or dry) were performed using the statistical software R (version 3.5.2). Based on biomass estimates from each preselected equation, generalized linear models were compared by explained deviance and Akaike Information Criterion (AIC). Sample size allowed the data to be applied to the Central Limit Theorem, and normality tests were not necessary. Residuals were tested for normality and homogeneity of variances.

3. RESULTS

3.1. Above-Ground Biomass

Correlation analysis between DGL and DBH resulted in the equation $DBH = 0.911 DGL - 0.640$ ($r^2 = 0.98$), which was used to estimate the DBH of trees in all AFS. Scatter plots of DBH and individual above-ground biomass (trees with $DBH \geq 5$ cm) estimated by preselected equations are shown in **Fig. 2**.

Considering this data set, the dispersion of plotted values shows how the use of different equations may result in different ranges of tree biomass estimates. In general, data scatter was greater for specimens with larger diameters, and lower to smaller diameters.

For both fresh and dry weight prediction, the highest values of tree biomass were estimated by equations that used DBH as the only predictor variable (Higuchi et al., 1998; Chambers et al. 2001) and were developed for a natural forest in the Central Amazon.

For dry weight estimation (**Fig. 2a**), models that included the specific density of wood as variable (Nelson et al., 1999; Chave et al., 2014) produced a great dispersion of values. Similarly, for fresh weight estimates (**Fig. 2b**), the model developed by Higuchi et al. (1998) with two predictor variables (DBH and height) produced the higher range of estimated values for tree biomass. Of these, the equation that did not include height (Nelson et al., 1999) led to higher biomass values while the pantropical model (Chave et al., 2014) estimated intermediate values.

The lowest values for fresh weight were estimated with the model developed by Silva (2007), which was developed for a 14-year-old secondary forest of the Central Amazonia. For dry weight, the lowest values were estimated by the pantropical model (Chave et al., 2014).

The model developed by Segura et al. (2006) estimated intermediate biomass dry weight values for the AFS trees of RDSU. Their equation derived from shadow trees in a coffee AFS in Nicaragua and is the only AFS-based equation analyzed by this work.

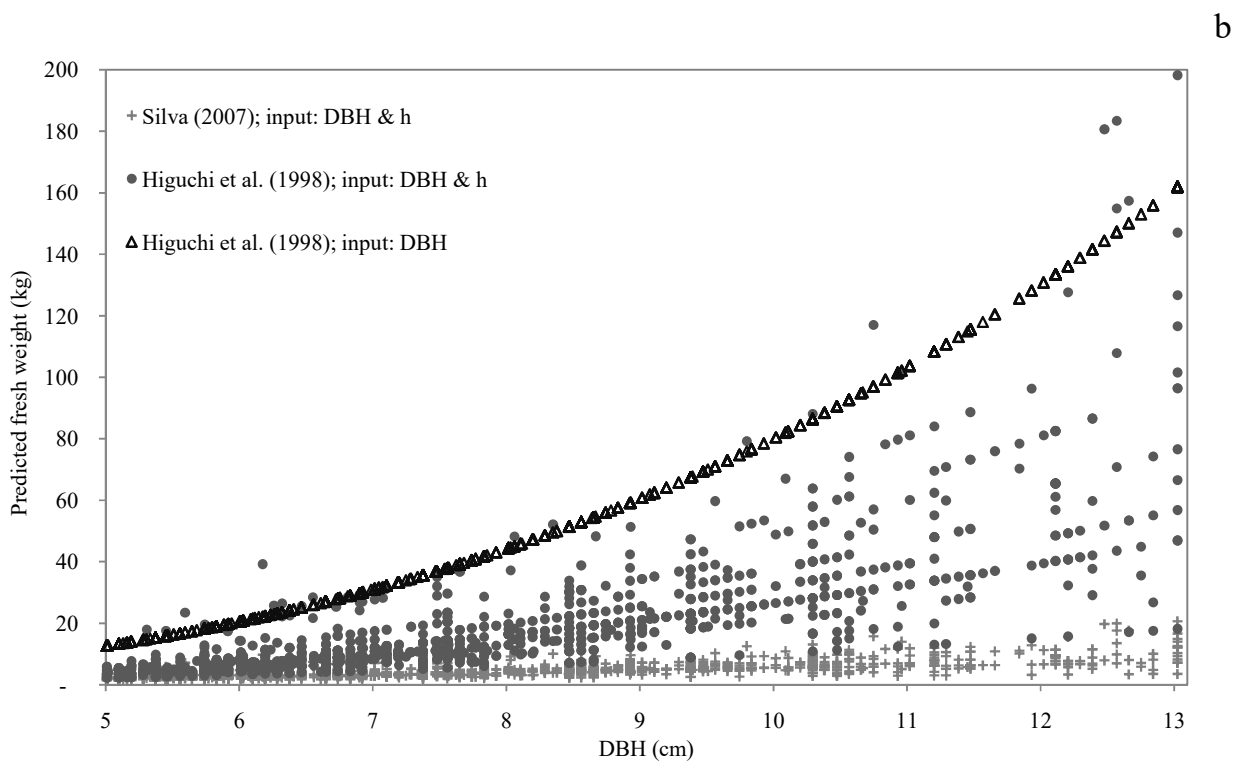
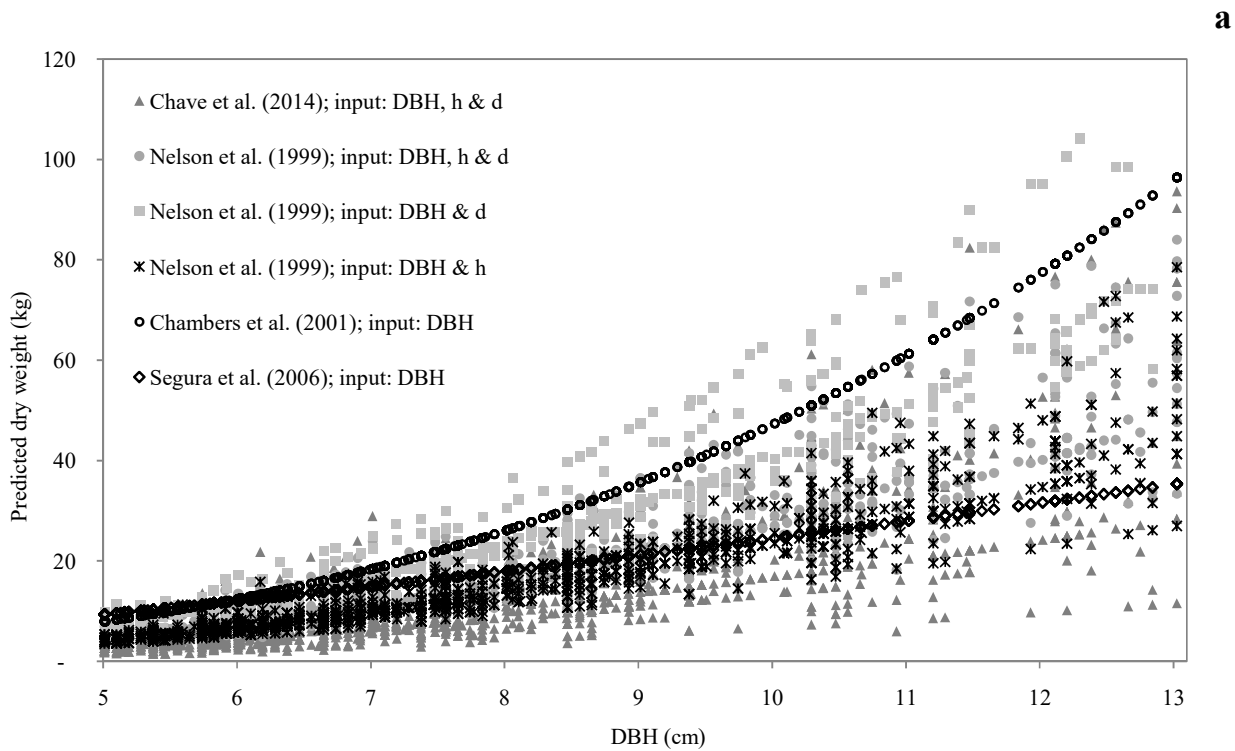


Fig. 2. Predictions of total aboveground biomass using the preselected regression models compared by scatter plot. Estimated values are shown separately for dry weight (a) and fresh weight (b) as function of each tree's

DBH (n=1,222). FW = tree mass fresh weight (kg), DW = tree mass dry weight (kg), DBH = diameter at breast height (cm), h = total height (m), d = specific wood density (g cm^{-3}).

Among the allometric models studied, regression analyses revealed that the AFS-based equation presented the highest explained deviance ($ED = 0.99$) and lowest AIC (1493.80). In addition to the good quality of fit, this model's general linear regression meets the assumptions of residual normality and variance homogeneity.

4. DISCUSSION

4.1. Criteria for Selection

4.1.1. Simple or double entry?

In Amazonian rainforests, the process of obtaining the height variable in field measurements is considered difficult and has poor accuracy (Higuchi et al., 1998; Nelson et al., 1999). Moreover, it is associated with high levels of non-sampling errors (Woortman et al., 2018) and generates limited contributions to estimates of allometric models (Nelson et al., 1999).

According to Nelson et al. (1999), the total height measurement of trees in dense forests is often underestimated compared to the measurement after cutting. To the authors, the height should be included only when it is possible to guarantee the accuracy of the measurement in the field. For these reasons, models that include only the DBH as a variable are considered more cost effective (Woortman et al., 2018) and require less time for field measurements.

However, different facts should be considered in the case of AFS estimates, in which tree height and diameter are easily measured and commonly surveyed in the field (Kumar & Nair, 2011; Riofrío et al., 2015). In the present study, the spacing between trees, which was mostly low, facilitated the measurement of height. In cases such as this, the inclusion of the variable can help increase the confidence of biomass estimates (Ketterings et al., 2001).

Nelson et al. (1999) indicated that including height and wood specific density variables in equations developed by other studies and based on other forests would produce more accurate estimates.

Notably, when visually analyzing the estimates for the RDSU AFS, equations that included only the DBH as an independent variable (Higuchi et al., 1998; Chambers et al., 2001) led to higher estimates than equations that included other independent variables in addition to DBH, which indicates an overestimation of the values. This fact coupled with the availability of height data from the AFS trees indicated that a model that included the variable should be developed.

4.1.2. Sample and environment characteristics

As weighted in the choice of predictor variables, differences in the estimates were compared in relation to the environment for which each equation was developed. In the analyzed data, equations based on natural forests led to higher estimates of biomass, which were higher than the values estimated by equations of secondary forests. Comparatively, estimates of the model by Segura et al. (2006) led to intermediate values.

Despite the similarities between the environment studied by Segura et al. (2006) and the RDSU AFS, the model was constructed at a large geographic distance and considers DBH as the only independent variable. This fact led us to exclude it from the options, once models developed in closer regions should be more suitable for biomass estimates in the present study. Likewise, even with relatively intermediate values, the pantropical model (Chave et al., 2014) is based on the growth of natural forests and was also excluded by de process.

Once biomass production estimates of multi-stratified plantations tend to be closer to the growth of secondary forests than to primary forest growth (Schroth et al., 2002), models based on secondary forests were chosen among the models tested for estimates in the AFS. .

Another characteristic to be considered is related to the database that generated the equation. That is, the data should be applied to the equation only when they meet the criteria of the predictor variables, such as diameter and/or height class of the sampled specimens, to reduce errors associated with the use of the models (Chave et al., 2004; Cole & Ewal, 2006). With this in mind, the preselected equations were those for which the data met the established assumptions.

Finally, only equations prepared by compiling data of various species were tested. Despite obtaining more accurate results from species-specific equations, which were observed by Riofrío et al. (2015) in Andean AFS and by Nelson et al. (1999) in secondary natural forests of the Central Amazon, taxonomic information is not available for the RDSU AFS, which would lead to uncertainties about the choice of specific equations based on popular names.

Including taxonomic data through the botanical identification of the AFS species could potentially increase the accuracy of above-ground biomass estimates. However, investments in time and financial resources would increase. The option for generalist equations supports the proposal of simplifying the measurement and monitoring these areas, which requires information available in the database and makes the process more feasible and contributes to its continuity.

4.1.3. Can wood density reduce estimate unreliability?

In the study by Nelson et al. (1999), the inclusion of specific density as a variable in estimates of the dry weight of multispecies equations showed good results. Ketterings et al. (2001) concluded that the mean density reported in previous studies should be included in the development of site-specific equations when destructive sampling cannot be performed.

However, some authors emphasize that the specific density varies not only among species but also among specimens of the same species and variations may occur according to

age and between different parts of the same specimen (Nelson et al., 1999; Higuchi & Higuchi, 2004).

Among the models tested, equations that included the specific density variable were excluded by the decision-making process. Despite the existence of complete databases (Zanne et al., 2009), the lack of taxonomic information on AFS species may lead to estimate uncertainties. In this case, an alternative would be to sample the trees measured to determine the density in the laboratory, a step that depends on the availability of time and financial resources.

4.1.4. Statistics criteria

Analyses of the model developed for AFS crops in Nicaragua (Segura et al., 2006) presented the best goodness of fit indicators ($ED = 0.99$). The equation included the diameter as the only independent variable and estimated intermediate values when compared to the other models.

The good values for indicators of fit obtained can be related to the similarity between the set of trees analyzed in this work and those used by Segura et al. (2006) to build their model. In their work, the authors selected the most dominant trees planted on the AFS, excluding coffee plants. Among all trees sampled, 50% was *Inga* spp., species also abundant in the AFS of RDSU. In the set of trees of this study, more than 60% are *Inga* spp., which are often the larger specimens present in each AFS.

In addition, the use of DBH as the only input variable, in practical terms, can facilitate measuring and monitoring processes of the AFS once it is an easier and more direct tree measure when compared to total height (Woortman et al., 2018).

4.2. Importance of the Measurement Protocol

In the indirect method, the first step of estimating above-ground biomass includes the measurement of variables of interest. This process, which commonly involves obtaining

measurements of tree diameter and height, is the first source of error of the estimates, especially when dealing with irregular trunks (Chave et al., 2004), as is the case of AFS trees.

Ensuring the standardization of measurement collection is a way to reduce uncertainties about estimates. In other words, throughout the entire process, it is important to standardize the obtained variables (diameter and/or height), the procedure for measuring in the field (i.e., walking and/or position in the plant in which the measurement is taken) and the equipment used, especially when the objective is continuous or periodic monitoring. In addition to contributing to more reliable estimates, a quality inventory facilitates data processing and reduces uncertainties in the sequential stages of biomass estimates.

4.3. How to Choose the Best Method?

Regardless of the existence of protocols, the choice of the best method for estimating biomass should consider the particularities of each situation. What data are available? What is the quality of the data? Which collection methods are adopted? What is the age of AFS planting? What is the AFS structural situation? These are some of the questions guiding the literature search for the best methods for a given situation.

When estimating biomass in an AFS, equations developed for mature natural forests are frequently adopted, which may lead to the overestimation of values or even the development of local equations using destructive sampling processes, which is a time-consuming task that is not financially viable.

The wide variety of AFS models combined with environmental and social factors involved in their cultivation hinders the standardization of investigative methods. Nevertheless, some practical determinations may guide the choice of methods that are more appropriate to each situation, and they involve a weighted and justifiable decision-making process.

Thus, by adopting the criteria described above, the model developed by Nelson et al. (1999) was selected for biomass dry weight estimation, considering the following facts:

- It was developed in a location close to the study site;
- It was developed using data from secondary forests, to which the development of AFS is more similar compared to those of natural and mature forests;
- It includes variables available in our database (DBH and height) and does not require information that is difficult to acquire, such as specific density;
- Data estimates and dispersion lead to intermediate values compared to those of other analyzed equations, which avoids the risk of over or under estimation.

Following the same decision path, the model developed by Silva (2007) was selected for fresh weight estimates, once it was developed for a Central Amazon secondary forest, and includes DBH and height as predictor variables.

Looking to statistical indicators of fit, the model developed by Segura et al. (2006) was selected as the best way to estimate biomass dry weight of the AFS trees studied. The model was based on a similar population of trees and only includes DBH as input variables, what may facilitate monitoring activities.

The simplification of methodological processes increases their practicality and accessibility, may contribute to their increased application in different contexts and quantifies the potential of AFSs as a GHG mitigation tool.

CONCLUSION

Through the qualitative decision-making process, the models developed by Nelson et al. (1999) and by Silva (2007) were selected, respectively, as best methods for dry and fresh above-ground biomass estimation for the RDSU AFS trees. This decision considered differences of location, species and variables between the models analyzed. Statistical-based

analyses showed that the studied data set is best fitted to the model developed by Segura et al. (2006), which was developed for a similar structured AFS.

In addition to above-ground biomass, carbon allocation below the soil, including roots and soil carbon, are realistic sources of carbon sinks in AFS (Albrecht & Kandji, 2003) and should be included in estimates of their potential contribution to global CO₂ balance.

Despite the low contribution of specimens with DBH < 5 cm to the relative biomass in natural forests (Higuchi et al., 1998), their inclusion is suggested for studies on estimates in AFS plantations.

ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to Professor Dr. Flávio Bertin Gandara and to Professor Dr. Carlos Edwar Freitas for their assistance with data analysis. We thank IDESAM for logistical support and provision of data for the research.

FUNDING

This work was supported by the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas [FAPEAM #002/2016 - POSGRAD 2017]; Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior [CAPES 2018/1]; and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico [CNPq #309319/2018-8].

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest.

AVAILABILITY OF DATA AND MATERIAL

Not applicable.

CODE AVAILABILITY

Not applicable.

REFERENCES

Abbas, F., Hammad, H. M., Fahad, S., Cerdà, A., Rizwan, M., Farhad, W. et al. (2017). Agroforestry: a sustainable environmental practice for carbon sequestration under the climate

change scenarios—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, n. 12, p. 11177-11191. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8687-0>

Albrecht, A., Kandji, S. T. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 99, n. 1-3, p. 15-27. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00138-5)

Amazonas Government - Amazonas State Secretariat for Environment and Sustainable Development – SDS. (2009). *Série Técnica Planos e Gestão: Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã*. v. 1 e 2. Itapiranga/São Sebastião do Uatumã, AM: SDS.

Brancher, T. (2010). Estoque e ciclagem de carbono de sistemas agroflorestais em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. Masters Dissertation, Belém, PA: Federal University of Pará.

Brown, S., Gillespie, A. J., & Lugo, A. E. (1989). Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest science*, 35(4), 881-902.

Chambers, J. Q., dos Santos, J., Ribeiro, R. J., & Higuchi, N. (2001). Tree damage, allometric relationships, and above-ground net primary production in central Amazon forest. *Forest Ecology and Management*, 152(1-3), 73-84. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00591-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00591-0)

Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S., & Perez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 359(1443), 409-420. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1425>

Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. et al. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>

Cole, T. G., & Ewel, J. J. (2006). Allometric equations for four valuable tropical tree species. *Forest Ecology and Management*, 229(1-3), 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.017>

Fernandes, C. D. A., Matsumoto, S. N., & Fernandes, V. S. (2018). Carbon stock in the development of different designs of biodiverse agroforestry systems. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(10), 720-725. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p720-725>

Higuchi, M. I. G., & Higuchi, N. (2004). *A floresta amazônica e suas múltiplas dimensões: uma proposta de educação ambiental*. (1st ed.). Manaus, INPA: CNPq.

Higuchi, N., dos Santos, J., Ribeiro, R. J., Minette, L., & Biot, Y. (1998). Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira. *Acta Amazonica*, 28(2), 153-153. <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282166>

Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia - IDESAM. (2020). Programa Carbono Neutro. <https://idesam.org/carbononeutro> (last checked 22 jan 2020).

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working

Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 582 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC. 151 p.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416>

Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry systems*, 76(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>

Jose, S., & Bardhan, S. (2012). Agroforestry for biomass production and carbon sequestration: an overview. *Agroforestry Systems*, 86(2), 105-111. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9573-x>

Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1-3), 199-209.

Kumar, B. M., & Nair, P. R. (Eds.). (2011). Carbon sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges. Springer Science & Business Media.

Millennium Ecosystem Assessment – MEA. (2005). *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute.

Nair, P. K. R., Kumar, B. M., & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science*, 172(1), 10-23.
<https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>

Nelson, B. W., Mesquita, R., Pereira, J. L., De Souza, S. G. A., Batista, G. T., & Couto, L. B. (1999). Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest ecology and management*, 117(1-3), 149-167.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00475-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00475-7)

Ramos, H. M. N., Vasconcelos, S. S., Kato, O. R., & Castellani, D. C. (2018). Above-and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. *Agroforestry systems*, 92(2), 221-237. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0131-4>

Riofrío, J., Herrero, C., Grijalva, J., & Bravo, F. (2015). Aboveground tree additive biomass models in Ecuadorian highland agroforestry systems. *Biomass and Bioenergy*, 80, 252-259.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.026>

Rugnitz, M. T., Chacon, M., & Porro, R. (2009). *Guia para determinação de carbono em pequenas propriedades rurais*. Belém, Brasil: Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF)/Consórcio Iniciativa Amazônica (IA).

Schroth, G., D'Angelo, S. A., Teixeira, W. G., Haag, D., & Lieberei, R. (2002). Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*, 163(1-3), 131-150. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00537-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00537-0)

Segura, M., & Kanninen, M. (2005). Allometric Models for Tree Volume and Total Aboveground Biomass in a Tropical Humid Forest in Costa Rica 1. *Biotropica: The Journal of Biology and Conservation*, 37(1), 2-8. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.02027.x>

Segura, M., Kanninen, M., & Suárez, D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*, 68(2), 143-150. <https://doi.org/10.1007/s10457-006-9005-x>

Silva, R. P. (2007). Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM). Ph.D. Thesis, Manaus, AM: Federal University of Amazonas/INPA.

Verchot, L. V., Van Noordwijk, M., Kandji, S., Tomich, T., Ong, C., Albrecht, A. et al. (2007). Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 12(5), 901-918. <https://doi.org/10.1007/s11027-007-9105-6>

Woortmann, C. P., Higuchi, N., SANTOS, J. D., & Silva, R. P. D. (2018). Allometric equations for total, above-and below-ground biomass and carbon of the Amazonian forest type known as campinarana. *Acta Amazonica*, 48(2), 85-92. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201700673>

Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L. et al. (2009). Global wood density database. *Dryad*. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>

CONCLUSÕES GERAIS

Análises sobre a percepção ambiental dos agricultores da RDSU revelaram a observação de importantes benefícios ambientais trazidos pela prática agroflorestal. Em contraste, evidencia fatores importantes para a sua adoção como forma de cultivo: a obtenção de produtos e geração de renda. Ferramentas de políticas públicas devem considerar esses fatores como essenciais ao propor alternativas produtivas para as comunidades da RDSU.

Características do solo nos SAF estudados respondem a fatores extrínsecos ao plantio e estão principalmente associadas à textura do solo. Fatores intrínsecos, como práticas de manejo adotadas, não tiveram efeito nas propriedades químicas do solo analisadas.

Apesar da heterogeneidade dos plantios estudados, foi possível observar evidências de que as práticas agroflorestais iniciaram processos de melhoria das condições do solo da RDSU.

Por fim, demonstramos que metodologias para estimativas de biomassa acima do solo em SAF podem ser descomplicadas e acessíveis para instituições de base, e podem apoiar comunidades, como as da RDSU, a estimar o potencial dos seus plantios para manutenção de estoques de carbono. Dimensionar o potencial da prática agroflorestal para sequestro de carbono cria bases para sua contribuição em balanços globais de GEE e utilização como ferramenta para a manutenção de paisagens amazônicas.

Conclui-se, portanto, que sistemas agroflorestais contribuem para a provisão de serviços ecossistêmicos, como a manutenção da produtividade do solo, havendo potencial para a provisão de alimento e renda. Dessa forma, SAF são alternativas para a o desenvolvimento de populações ribeirinhas e podem integrar estratégias de políticas públicas para o desenvolvimento da região Amazônica, construindo paisagens integradas e mais resilientes.