

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 20/09/2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**VULNERABILIDADE AMBIENTAL E DISPONIBILIDADE
HÍDRICA DA BACIA RIO PARAÍBA DO SUL (CORREDOR
SUDESTE DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA)**

Gislaine Costa de Mendonça
Bióloga

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**VULNERABILIDADE AMBIENTAL E DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA BACIA RIO
PARAÍBA DO SUL (CORREDOR SUDESTE DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA)**

Discente: Gislaine Costa de Mendonça

Orientadora: Profa. Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissarra

Coorientadora: Dra. Maria Teresa Vilela Nogueira Abdo

Coorientador: Prof. Dr. Fernando António Leal Pacheco

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de
Jaboticabal, como parte das exigências para a
obtenção do título de Doutor em Agronomia
(Ciência do Solo)

2023

M539v Mendonça, Gislaine Costa de
Vulnerabilidade ambiental e disponibilidade hídrica da Bacia do Rio Paraíba do Sul (Corredor Sudeste da Mata Atlântica Brasileira) / Gislaine Costa de Mendonça. -- Jaboticabal, 2023
164 p. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientadora: Teresa Cristina Tarlé Pissarra
Coorientador: Maria Teresa V.N. Abdo e Fernando A.L. Pacheco

1. Conservação de água e solo. 2. Bacias hidrográficas. 3. Modelagem de paisagem. 4. Serviços ambientais. 5. Agroecossistema. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

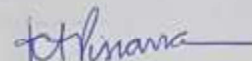
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: VULNERABILIDADE AMBIENTAL E DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA BACIA RIO PARAÍBA DO SUL (CORREDOR SUDESTE DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA)

AUTORA: GISLAINE COSTA DE MENDONÇA
ORIENTADORA: TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA
COORDENADORA: MARIA TERESA VILELA NOGUEIRA ABDO
COORDENADOR: FERNANDO ANTÔNIO LEAL PACHECO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

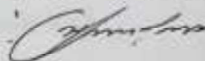
Profa. Dra. TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas DECEX / FCAV UNESP Jaboticabal



Prof. Dr. MILTON CEZAR RIBEIRO (Participação Virtual)
Departamento de Biodiversidade / IB UNESP Rio Claro

Milton Cezar Ribeiro: 1270
4118884

Prof. Dr. JOSE MARIA GUSMAN FERRAZ (Participação Virtual)
UNICAMP / Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. LUÍS FILIPE SANCHES FERNANDES (Participação Virtual)
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) / Vila Real/Portugal

Aprovado por: Luís Filipe Sanches Fernandes
Num. de identificação: 08161683
Data: 2023/09/21 08:36:51-0100

Profa. Dra. RENATA CRISTINA ARAUJO COSTA (Participação Virtual)
Universidade Guarulhos - UNG / Guarulhos/SP

gov.br Documento assinado digitalmente
RENATA CRISTINA ARAUJO COSTA
Data: 22/09/2023 10:00:53-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

Jaboticabal, 20 de setembro de 2023

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

GISLAINE COSTA DE MENDONÇA - nascida em 18 de maio de 1988 no município de Matão – São Paulo. Bióloga graduada em Ciências Biológicas pela Universidade de Araraquara – UNIARA no ano de 2013. Mestra em Aquicultura (Biologia Aquática) pelo Centro de Aquicultura da Unesp - Caunesp, em 2018. Iniciou em 2020 o Doutorado junto ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia na área de Ciência do Solo na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista, Júlio de Mesquita Filho (FCAV/Unesp). Atua desde de 2012 em avaliações ambientais relacionadas aos recursos hídricos (qualidade, bioindicadores, bacias hidrográficas), e em 2018 ingressou no monitoramento do uso e cobertura do solo (diagnóstico, planejamento, política, governança), com recentes contribuições em investigações de emissão de carbono. É Pesquisadora Associada ao Grupo de Pesquisa em Política de Uso do Solo – PolUS e desenvolve projetos de pesquisa, ensino e extensão junto ao Laboratório de Geomática – Departamento de Engenharia e Ciências Exatas da FCAV/Unesp. Consolidou se como pesquisadora na área de modelagem de paisagem, com ênfase nos serviços hidrológicos em agroecossistemas e pela aplicação de geotecnologias (geoprocessamento, sensoriamento remoto, linguagem de programação). Especialista no desenvolvimento de metodologias de delimitação de áreas prioritárias, com foco na recuperação ambiental e implantação de sistemas agroflorestais, produzindo trabalhos como suporte à decisão de projetos e políticas públicas voltados aos serviços ambientais e resiliência climática.

Apoio Financeiro

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“O meio ambiente não é o espaço em que vivemos, mas o espaço do qual vivemos”
[Ana Primavesi, 1997. In: Agroecologia. Ecosfera, Tecnosfera e Agricultura]

Aos meus pais, **Marluce M. Ferreira** e **José Miguel da Costa** pelo amor, sacrifícios e incentivos oferecidos a mim e meus irmãos.

Dedico

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Faculdade de Ciência Agrárias e Veterinárias – FCAV/Unesp, pelas oportunidades, pelo ensino e suporte acadêmico de alto nível. Aos mestres docentes e colaboradores administrativos, parte fundamental desta Instituição.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo fomento concedido para realização integral deste doutoramento e período de intercâmbio.

À Profa. Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissarra, por me acolher tão generosamente, confiar e acreditar no meu trabalho e me guiar durante esta jornada de tanto aprendizado e transformação. Agradeço pelos incentivos, pelo apoio e amizade; pelo exemplo e fonte de inspiração para mulheres na ciência (e onde quisermos!).

À Dra. Maria Teresa Vilela Nogueira Abdo por me integrar em sua “rede mágica agroecológica”, pelas oportunidades e trocas incríveis que me possibilitou durante estes anos de trabalho. Agradeço pelo exemplo de força na delicadeza e entusiasmo contagiante; por compartilhar parcerias na Rede Agroflorestal do Vale do Paraíba.

Ao Prof. Dr. Fernando António Leal Pacheco, por todo aprendizado a cada diálogo científico, sempre compartilhando um pouco de sua genialidade. Agradeço imenso pela confiança, desafios e incentivos que levo como molde; pela recepção e supervisão durante o período de intercâmbio, no Departamento de Geologia na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal.

Ao Prof. Dr. Milton Cezar Ribeiro por me receber e supervisionar em estágio docência, estimular o pensamento crítico, me reaperceber à ecologia de paisagem e contribuir com a construção deste trabalho durante as bancas de qualificação e defesa.

Aos membros da Comissão de Avaliação de Defesa (Prof. Dr. José Maria Gusman Ferraz, Prof. Dr. Luis Filipe Sanches Fernandes, Dra. Profa. Renata Cristina Araújo Costa) e de Exame Geral de Qualificação (Profa. Dra. Laura de S. Borma, e Profa. Dra. Maria José B. Zakia), pelos apontamentos e contribuições enriquecedoras.

Em especial agradeço à minha família em toda sua extensão (Ferreiras, Costas, Mendonças e Jóias) por todo carinho e suporte incondicional!

Ao meu companheiro de jornada Nestor Mendonça, pelo amor paciente e construtivo nestes mais de 15 anos; pela vida e crescimento compartilhados, pelo refúgio que contruímos dentro das adversidades!

Aos meus irmãos Leide Jane Jóia e Luís Miguel da Costa (“minhas metades “), pela cumplicidade, pelos desafios e alegrias de uma vida toda! Meu amor não caberia nestas poucas linhas...

Aos amigos incríveis e companheiros de trabalho do Laboratório de Geomática – LabGeo, pela parceria e “*brainstormings*” nos cafés com ciência.

Aos amigos da casa espírita “CEU”, pela amizade e fraternidade, pelo carinho e aprendizado nesta e em outras vidas.

À “família portuguesa”, amigos “zukas” e “tugas” que encontrei durante a vida nas terras geladas transmontanas de Vila Real.

Minha sincera gratidão a todos que fizeram parte deste processo lindo!

VULNERABILIDADE AMBIENTAL E DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA BACIA RIO PARAÍBA DO SUL (CORREDOR SUDESTE DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA)

RESUMO - O estudo da pressão em ecossistemas naturais é importante para determinar métricas que identifiquem o impacto de uma atividade antropogênica sobre o meio e a disponibilidade dos serviços ecossistêmicos. Esta pesquisa tem como objetivo verificar a vulnerabilidade ambiental, os conflitos de uso do solo e calcular a disponibilidade hídrica da Bacia do Rio Paraíba do Sul, no Corredor Sudeste da Mata Atlântica Brasileira, como suporte a identificação de áreas prioritárias para a implementação de planos de manejo específico e recomposição florestal. O aporte teórico-metodológico desta pesquisa será desenvolvido por técnicas de sensoriamento remoto, sistema de informação geográfica e levantamento de dados de geologia, solo, topografia, uso e cobertura natural do solo, vazão e clima. Também será realizada a divisão hidrogeológica da bacia hidrográfica a partir da modelagem hidrológica, para a determinação das variáveis de paisagem (uso do solo), clima (precipitação, temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar), geomorfologia e a topografia em escala de sub-bacias. E estimativa a disponibilidade hídrica nas sub-bacias será calculadas a partir das descargas líquidas nos exutórios dos cursos de água de cada sub-bacias de estudo. A partir do processo estatístico de álgebra de mapas e análise hierárquica de processos serão realizadas comparações pareadas dos fatores para criar uma matriz de razão que irão determinar a vulnerabilidade ambiental e os conflitos de uso do solo nas sub-bacias. As variáveis serão comparadas para definir sua importância relativa, para a hierarquização de áreas prioritárias e para determinar métricas que possam ser utilizadas como sistema de suporte na elaboração de um plano de reflorestamento e manejo na Bacia do Vale do Paraíba.

“Palavras-chave:” agroecossistema, bacias hidrográficas, conservação de água e solo, modelagem da paisagem, serviços ambientais

ENVIRONMENTAL VULNERABILITY AND WATER AVAILABILITY OF THE PARAÍBA DO SUL RIVER BASIN (SOUTHEAST CORRIDOR OF THE BRAZILIAN ATLANTIC FOREST)

ABSTRACT – The study of pressure on natural ecosystems is important to determine details that identify the impact of an anthropogenic activity on the environment and the availability of ecosystem services. This research aims to verify the environmental vulnerability, land use conflicts and calculate the water availability of the Paraíba do Sul River Basin, in the Southeast Corridor of the Brazilian Atlantic Forest, as a support to the identification of priority areas for the implementation of plans of specific management and forest recomposition. The theoretical-methodological contribution of this research will be developed by remote sensing techniques, geographic information system and data collection of geology, soil, topography, land use and natural cover, flow and climate. The hydrogeological division of the watershed will also be carried out based on hydrological modeling, for the determination of landscape variables (land use), climate (precipitation, air temperature, solar radiation, wind speed and relative humidity), geomorphology and topography at sub-basin scale. The estimate of water availability in the sub-basins will be calculated from the liquid discharges in the outlets of the watercourses of each sub-basins under study. From the statistical process of map algebra and hierarchical analysis of processes, paired comparisons of the factors will be carried out to create a ratio matrix that will determine the environmental vulnerability and land use conflicts in the sub-basins. The variables will be compared to define their relative importance, to rank priority areas and to determine metrics that can be used as a support system in the elaboration of a reforestation and management plan in the Vale do Paraíba Basin.

“Keywords:” agroecosystems, environmental services, landscape modelling, soil and water conservation, watersheds

INTRODUÇÃO

O equilíbrio entre o desenvolvimento socioeconómico e a gestão sustentável dos recursos naturais é um dos grandes desafios da ciência. À medida que aumenta a urgência de equilibrar e alcançar simultaneamente os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS (<https://sdgs.un.org/goals>), são necessárias estudos robusto e estratégias eficazes para promover o uso do solo, da água e dos serviços de biodiversidade e regulação atmosférica, sem comprometer a conservação dos ecossistemas naturais; pois disto também depende a segurança alimentar e hídrica, a resiliência e sustentabilidade dos sistemas (FAO, 2017; Chen et al., 2022).

Em bacias hidrográficas inseridas em agroecossistemas, as interações complexas entre os componentes do ecossistema (bióticos e abióticos) e os modelos atuais de uso da terra têm sobrecarregado a capacidade de manutenção e provisão de SE, levando à degradação destes sistemas (Foley et al., 2005; Chazdon et al., 2019). Isto representa um desafio adicional para a restauração da paisagem e recuperação ambiental, pois também requer assegurar que as funções socioeconômicas dos ecossistemas sejam mantidas, favorecendo além de práticas agrícolas conservacionistas, a adoção de sistemas de produção mais sustentáveis do ponto de vista de integração ecológica, com agroflorestas, entre outros modelos de agricultura regenerativa (Kanter et al., 2018; de Mendonça et al., 2022).

As iniciativas de restauração ecológica e reflorestamento em arranjos agroflorestais e bio diversos ganham força no cenário mundial para a regeneração de paisagens agropecuárias (Laurett et al., 2021) e integram o quadro de Soluções Baseadas na Natureza (SBN; Cohen-Shacham et al. 2016) para a proteção, gestão sustentável e restauração do ecossistema natural. Adicionalmente, estes sistemas alcançam novas perspectivas e patamares no âmbito das normativas e incentivos à prestação dos serviços ambientais e em políticas públicas para recuperação da vegetação nativa nos programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) (Bracalioni et al., 2019).

Nos últimos anos, as políticas ambientais e os investimentos associados à restauração da Mata Atlântica direcionaram a Bacia do Rio Paraíba do Sul (PSRB) a restaurar e conservar seus recursos naturais visando o uso sustentável da terra, a conservação da vegetação nativa e a recuperação florestal dentro de das

propriedades privadas, e com isto a compensação socioeconômica em pagamentos por serviços ambientais (SEMIL, 2023). Neste cenário, a ciência do solo desempenha um papel crítico na conservação das bacias hidrográficas, ao propor soluções que promovem práticas agrícolas mais sustentáveis e assim contribuir para a qualidade dos ecossistemas terrestres e aquáticos e conseqüentemente, a segurança hídrica e a sustentabilidade dos meios de produção.

Deste modo, o desenvolvimento deste projeto de pesquisa explorou fundamentos e metodologias de investigação para compreender e estabelecer critérios para a recuperação e a conservação de bacias hidrográficas em agroecossistemas. A modelação da fragilidade da paisagem, da dinâmica do uso e ocupação do solo, da disponibilidade hídrica superficial e dos padrões agrometeorológicos, foi aplicada com o intuito de avançar na compressão do nexo solo-água e promover a conservação dos serviços ecossistêmicos providos a nível da água na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Portanto, os métodos e resultados aqui relatados também apresentam tendências locais em provisão dos serviços hidrológicos, do potencial de exposição de degradação do solo relacionadas a conversão do uso da terra para apoiar estratégias de resiliência climática e as metas de restauração de paisagens e recuperação da Mata Atlântica.

CONCLUSÃO

A complexidade multifuncional dos agroecossistemas é um desafio para a expansão das ações estratégicas e políticas públicas em restauração ambiental e manutenção dos serviços de ecossistema. Para contribuir com o planejamento estratégico e a implantação das políticas públicas de incentivo a manutenção dos serviços ecossistêmicos e desenvolvimento sustentável na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, este trabalho entrega um instrumento de suporte a decisão e um protocolo de pagamentos por serviços ambientais com ênfase na conservação do solo e produção de água. A abordagem consistiu na modelagem da vulnerabilidade da paisagem, do fluxo de serviços hidrológicos e de alvos espaciais para otimizar e direcionar as ações de conservação com foco no incentivo aos serviços ambientais adotados em micro-bacias vulneráveis, ou seja, onde os impactos das atividades humanas exercem a maior pressão sobre os SE (provisão, regulação e suporte).

A análise integrada da vulnerabilidade ambiental e da disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica descrita ao longo dos capítulos, destacou cinco micro-bacias [3, 13, 14, 16, 20] em estresse hídrico considerando a demanda hídrica per capita inferior a 1000 m³/hab.ano. A modelagem dos fluxos de vazão também fornece métricas e comparativo real do potencial de produção de água nas micro-bacias que também podem ser convertidos em valoração e monitoramento de PSA. Os estudos também evidenciaram bacias críticas a segurança hídrica e de maior vulnerabilidade nas cinco zonas hidrológicas delimitadas: Setor montante Reservatório do Funil [micro-bacia 1,4, 8]; Setor Jaguari / Buquira [micro-bacia 11, 15, 14, 16, 17 e 18]; Setor Paraitinga [micro-bacia 9]; Setor Paraibuna [micro-bacia 23] e Setor Médio Curso [micro-bacias, 22,23].

Um balanço hídrico climatológico em uma série climática de 35 anos, evidenciou tendências sazonais de menor disponibilidade hídrica regional à nível de água no solo entre a maio a setembro, com período crítico de déficit hídrico em agosto. E este padrão se agrava nas unidades hidrológicas na vertente esquerda do Rio Paraíba do Sul, onde também ocorre o maior aglomeramento urbano. Com este estudo, o diagnóstico da vulnerabilidade ambiental da paisagem quanto ao potencial de degradação do solo seja por risco naturais ou uso acima da capacidade de suporte

nas micro-bacias, expõe o efeito da fragilidade da terra sobre a prioridade e complexidade operacional para recuperação (contenção de erosão) ou conversão do uso do solo (transição para sistemas de produção mais sustentáveis. A partir destas métricas, é possível estabelecer a valoração e compensação socioeconômicas aos aderentes (produtores participantes) em função do nível de prioridade (potencial de degradação e criticidade hídrica) em que a propriedade rural se localiza.

REFERÊNCIAS

Bracalioni, P. H. S., Niamir, A., Broadbenet, E. N., et al. (2019) Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes **Science Advances**, 05: eaav3223.

Chazdon, R. (2019) Towards more effective integration of tropical forest restoration and conservation. **Biotropica** 51: 463-472.

Chen, D., Zhao, Q., Jiang, P., Li, M., 2022. Science of the Total environment incorporating ecosystem services to assess progress towards sustainable development goals : a case study of the Yangtze River economic. **Sci. Total Environ.** 806: 151277.

de Mendonça, G. C., Costa, R. C. A., Parras, R., de Oliveira, L. C. M., Abdo, M. T. V. N., Pacheco, F. A. L., Pissarra, T. C. T. (2022) Spatial indicator of priority areas for the implementation of agroforestry systems: An optimization strategy for agricultural landscapes restoration. **Science of The Total Environment** 839: 156185.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2017) Strategic programme to make agriculture, forestry and fisheries more productive and sustainable: 1-28. Disponível em: <http://www.fao.org/publications/card/en/c/c021f962-c228-4c99-b8b0-01f70ed85293/> Acesso em: 25 nov. 2022.

Foley, J.A., et al. (2005) Global consequences of land use. *Science* 80: 570–574.

Kanter, D.R., Musumba, M., Wood, S.L.R., Palm, C., Antle, J., Balvanera, P., Dale, V.H., Havlik, P., Kline, K.L., Scholes, R.J., Thornton, P., Tittone, P., Andelman, S. (2018). Evaluating agricultural trade-offs in the age of sustainable development. **Agric. Syst.** 163: 73–88.

Laurett, R., Paço, A., Mainardes, E.W. (2021). Sustainable development in agriculture and its antecedents, barriers and consequences – an exploratory study. **Sustain. Prod. Consum.** 27: 298–311.

SEMIL - Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. (2023). Presentation of the results of the Atlantic Forest Connection Project. <https://fapesp.br/14985/fapesp-e-global-environment-facility-gef-projeto-conexao-mata-atlantica>