

Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

JOÃO VITOR ROQUE GUERRERO

ZONEAMENTO GEOAMBIENTAL VOLTADO AO
DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL SUSTENTÁVEL DO
MUNICÍPIO DE BROTAS, SP

São Carlos
2020

JOÃO VITOR ROQUE GUERRERO

ZONEAMENTO GEOAMBIENTAL VOLTADO AO DESENVOLVIMENTO
TERRITORIAL SUSTENTÁVEL DO MUNICÍPIO DE BROTAS, SP

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais^{1,2}.

Orientador: Dr. Luiz Eduardo Moschini

Coorientador: Dr. José Augusto de Lollo

Coorientador: Dr. António Alberto Teixeira Gomes

São Carlos
2020

¹ Apoio: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

² Apoio: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Processo 2016/19020-0 (doutorado regular) e 2018/02836-2 (doutorado sanduíche).

Roque Guerrero, João Vitor

Zoneamento geoambiental voltado ao desenvolvimento territorial sustentável do município de Brotas, SP. / João Vitor Roque Guerrero -- 2020. 167f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Luiz Eduardo Moschini

Banca Examinadora: António Alberto Teixeira Gomes, Adriana Maria Zalla Catojo, Luzia Cristina Antoniossi Monteiro, Eduardo Goulart Collares, Vitor Eduardo Molina Junior

Bibliografia

1. Serviços ecossistêmicos. 2. Planejamento territorial. 3. Cartografia geoambiental. I. Roque Guerrero, João Vitor. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato João Vitor Roque Guerrero, realizada em 18/12/2020.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Luiz Eduardo Moschini (UFSCar)

Prof. Dr. António Alberto Teixeira Gomes (U.Porto)

Profa. Dra. Adriana Maria Zalla Catojo (UFSCar)

Profa. Dra. Luzia Cristina Antoniossi Monteiro (UFSCar)

Prof. Dr. Eduardo Goulart Collares (UEMG)

Prof. Dr. Vitor Eduardo Molina Junior (UNICAMP)

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

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Processo 2016/19020-0 (doutorado regular) e 2018/02836-2 (doutorado sanduíche).

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu orientador Luiz Eduardo Moschini que com dedicação e paciência, contribuiu grandiosamente para a conclusão dessa tese.

Aos meus Coorientadores Alberto Gomes (Universidade do Porto) e José Augusto de Lollo (UNESP) pelas incontáveis contribuições.

À Cintia, por todo o carinho e apoio sem limites que foram essenciais durante essa jornada.

À toda minha família, em especial meus pais Luisa e Eder, por nunca terem medido esforços para que eu completasse esse ciclo.

Aos Professores Dra Adriana Catojo, Dr. Eduardo Collares, Dra Cristina Antoniossi e Dr. Vitor Molina Junior por disponibilizarem seu tempo para avaliar o presente trabalho. Ao professor Reinaldo Lorandi por toda a ajuda ao longo do mestrado e doutorado.

À Universidade do Porto, por meio dos professores Alberto Gomes, José Teixeira e Maria Assunção Pedrosa de Araújo, e aos amigos de Portugal que tão bem me receberam: André, Jorge, Pedro, Manuel, Vitor, Augusto, Nuno e Douglas.

Aos amigos do laboratório de Geotecnologias e Conservação ambiental, em especial à Livia, Mariana, Dayana, Vitor, Naara, Mayara e Diego.

Aos amigos da Universidade Federal de São Carlos, em especial Daniel Caiche, Luis Fernando Pestana, Murilo, Gabriel, Elton, Isadora e Vágner.

Aos amigos de toda vida que participaram ativamente durante todo o período acadêmico percorrido: Guilherme Mataveli, Michel Chaves, Eduardo Bonifácio, Rodrigo Justino, Bruno Hermes, Dilberto, Felipe e Luiz Paulo.

Ao amigo Vinicius José Freitas, secretário do PPGCAM por toda a imensa ajuda.

À todos os professores do curso de Geografia da Universidade Federal de Alfenas, e dos programas de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos por todo o conhecimento transmitido ao longo desses anos.

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

Agradecimento à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão de bolsa de doutorado regular (aportada ao processo 2016/19020-0) e Bolsa Estágio de Pesquisa no Exterior (processo 2018/02836-2)

RESUMO

A conversão de sistemas naturais em sistemas agropastoris ocorrida nas paisagens brasileiras nos últimos 50 anos produziu impactos em grande escala nos ecossistemas, diminuindo a qualidade e a quantidade de serviços ecossistêmicos prestados. A política ambiental brasileira prevê diversos instrumentos e regras que visam mitigar esses impactos, entretanto a falta de fiscalização e o tamanho continental do país dificultam sua efetividade ao longo do território. Nessa perspectiva, este estudo teve como objetivo produzir um zoneamento geoambiental para o município de Brotas, SP, incluindo como critério de agrupamento os serviços ecossistêmicos essenciais e visando contribuir com o desenvolvimento sustentável em escala local. A estrutura metodológica teve três etapas principais: i. realizar um diagnóstico geoambiental, utilizando aspectos sociais, econômicos e ambientais, para determinar os serviços ecossistêmicos essenciais ao atual padrão de desenvolvimento do município; ii. analisar individualmente as potencialidades e vulnerabilidades de cada serviço ecossistêmico a partir de modelos em cartografia geoambiental, levando em consideração as características fisiográficas e o atual padrão de ocupação antrópica; iii. gerar o zoneamento geoambiental a partir da análise integrada entre os serviços ecossistêmicos e promover medidas de ordenamento territorial que contribuam ao planejamento territorial eficiente. Os resultados demonstraram que para o município de Brotas, tanto os serviços prestados pelas águas subterrâneas quanto àqueles prestados pelos solos, apresentam altas vulnerabilidades, fato que ocorre devido à relação conflitante entre o arcabouço geoambiental naturalmente sensível e o uso inapropriado do território. Por outro lado, o mapeamento indicou alta potencialidade para a ocorrência de serviços ecossistêmicos relacionados ao ecoturismo, fator que pode fortalecer a resiliência das paisagens naturais frente ao processo de intervenção humana. Por fim, a carta de zoneamento propôs seis diferentes zonas homogêneas: consolidação, expansão, recuperação, restrição, restrições legais e zonas urbanas consolidadas. Essas zonas indicaram a atual situação da capacidade produtiva dos serviços ecossistêmicos e subsidiaram diretrizes de ordenamento territorial direcionadas ao equilíbrio entre a conservação de recursos naturais e estratégias de desenvolvimento econômico. Assim, espera-se contribuir para o processo de planejamento do município de Brotas, além de incentivar a inserção da perspectiva ecossistêmica em outros municípios brasileiros.

Palavras-Chave: Serviços Ecossistêmicos; Planejamento territorial; Sustentabilidade; Cartografia Geoambiental.

ABSTRACT

The conversion of natural systems into agropastoral systems that occurred in Brazilian landscapes in the last 50 years has produced large-scale impacts on ecosystems, decreasing the quality and quantity of ecosystem services provided. Brazilian environmental policy provides for several instruments and rules that aim to mitigate these impacts, however the lack of inspection and the country's continental size hinder its effectiveness throughout the territory. In this perspective, this study aimed to produce a geoenvironmental zoning for the municipality of Brotas, SP, including essential ecosystem services as a grouping criterion and aiming to contribute to sustainable development on a local scale. The methodological structure had three main stages: i. conduct a geo-environmental diagnosis, using social, economic and environmental aspects, to determine the ecosystem services essential to the current development pattern of the municipality; ii. individually analyze the potential and vulnerabilities of each ecosystem service based on models in geoenvironmental cartography; taking into account the physiographic characteristics and the current pattern of human occupation iii. generate geoenvironmental zoning based on an integrated analysis between ecosystem services and promote territorial planning measures that contribute to efficient territorial planning. The results showed that for the municipality of Brotas both the services provided by groundwater and those provided by soils are highly vulnerable, a fact that occurs due to the conflicting relationship between the naturally sensitive geoenvironmental framework and the inappropriate use of the territory. On the other hand, the mapping indicated high potential for the occurrence of ecosystem services related to ecotourism, a factor that can strengthen the resilience of natural landscapes in the face of the human intervention process. Finally, the zoning letter proposed six different homogeneous zones: consolidation, expansion, recovery, restriction, legal restrictions and consolidated urban areas. These zones indicated the current situation of the productive capacity of ecosystem services and subsidized territorial planning guidelines aimed at balancing the conservation of natural resources and strategies for economic development. Thus, it is expected to contribute to the planning process in the municipality of Brotas in addition to encouraging the insertion of the ecosystem perspective in other Brazilian municipalities.

Key-Words: Ecosystem Services; Territorial Planning; Sustainability; Geoenvironmental Cartography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Localização da área de estudo	20
Figura 2-2 Mapa Geológico.....	21
Figura 2-3 Mapa pedológico	25
Figura 2-4 Mapa Pluviométrico	28
Figura 2-5 Fluxograma dos procedimentos metodológicos utilizados no Zoneamento Geoambiental	29
Figura 2-6 Estrutura metodológica do Diagnóstico Geoambiental.....	33
Figura 2-7 Método para definição de zonas homogêneas.....	36
Figure 4-1 Study Area Location.....	46
Figure 4-2 Workflow that presents the mehod for groundwater acosystem services vulnerability asesment	47
Figure 4-3 DRASTIC-LU/PESTICIDE DRASTIC-LU parameters.....	51
Figure 4-4 DRASTIC and PESTICIDE DRASTIC charts	54
Figure 5-1 Study Area with Land Use types.	63
Figure 5-2 A workflow that demonstrates the methodological structure of the study.....	64
Figure 5-3 Relative importance percentages for each parameter of the model.....	69
Figure 5-4 Geospatial parameters used in the model. Normalized to fuzzy inference values.	70
Figure 5-5 Ecotourism Ecosystem Services Potential Zones Chart.	71
Figure 5-6 Percentages occupied by each potential ecotourism ES's zone. Source:.....	72
Figure 5-7 Low Potential Zone for ES's in Brotas municipality.....	74
Figure 5-8 Moderate Zone for ES's in Brotas municipality	75
Figure 5-9 High ES's potential in Brotas municipality..	76
Figure 5-10 Very High ES's potential in Brotas municipality..	77
Figure 6-1 Study area location - Soils	85
Figure 6-2: Workflow of Soil ES's Vulnerability model	88
Figure 6-3: Application and Results of AHP both for the construction of the clusters and for the generation of the final map.....	94
Figure 6-4 Model Parameters.....	96
Figure 6-5 Land Use map and Natural vs Anthropized areas map	97

Figure 6-6 Soil ES's vulnerability chart.....	99
Figure 6-7 Low vulnerability areas characterization.....	101
Figure 6-8 Moderate vulnerability areas characterization	103
Figure 6-9 High vulnerability areas characterization.....	105
Figure 6-10 Very High vulnerability areas characterization.....	107
Figura 7-1: Localização da área de estudo – Zoneamento.....	112
Figura 7-2 Procedimentos metodológicos para o Zoneamento Geoambiental	114
Figura 7-3 Tipos de Zonas Geoambientais	121
Figura 7-4 Carta de Zoneamento Geoambiental do Município de Brotas, SP	125
Figura 7-5 Caracterização da Zona 1.....	127
Figura 7-6 Caracterização da Zona 2.....	129
Figura 7-7 Caracterização da Zona 3.....	132
Figura 7-8 Caracterização da Zona 4.....	133
Figura 7-9 Caracterização da Zona 5.....	135
Figura 7-10 Caracterização da Zona 6.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Materiais Utilizados	28
Table 4-1 - Rock Units description	45
Table 4-2 - Values assigned to hydrogeological parameters	49
Table 4-3 Parameters' Index Values	50
Table 4-4 - Ranges of DRASTIC LU index	51
Table 5-1 Data used in the study.	65
Table 5-2 Parameters used, justifications for the assignment of weights to each parameter and its references.....	66
Table 5-3 Attributes of each parameter and assigned values for GIS modeling	67
Table 5-4 Relative importance values and description used in the AHP model.	68
Table 5-5 AHP in pair interactions.....	68
Table 5-6 Relationship between geoenvironmental zones, areas (km ²), number of tourist attractions and attraction index / km ²	72
Table 6-1 Materials used on Soil ES's Vulnerability Model.....	86
Table 6-2 Values of each analyzed attribute	90
Table 6-3 AHP Numerical scale	92
Table 6-4 Defuzzification values to the model.....	95
Tabela 7-1 Materiais utilizados no Zoneamento Geoambiental.....	113
Tabela 7-2 Estrutura para mapeamento das APPs	117
Tabela 7-3 Resultados da defuzzificação que gerou as zonas geoambientais.....	120

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Hipótese	17
1.3	Objetivos.....	17
1.4	Estrutura da tese	18
CAPÍTULO 2	MATERIAIS E MÉTODO.....	20
2.1	Caracterização da área de estudo	20
2.1.1	Caracterização Geológica.....	21
2.1.2	Caracterização Geomorfológica.....	23
2.1.3	Caracterização Pedológica	24
2.1.4	Caracterização Climática e Pluviométrica	27
2.2	Materiais	28
2.3	Método	29
2.3.1	Princípios de Mapeamento	30
2.3.2	Diagnóstico Geoambiental.....	31
2.3.3	Análise dos Serviços Ecossistêmicos Essenciais	33
2.3.4	Zoneamento Geoambiental	34
CAPÍTULO 3	Diagnóstico Geoambiental	37
3	DIAGNÓSTICO GEOAMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE BROTAS PARA IDENTIFICAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS ESSENCIAIS.....	37
3.1	Forças Motrizes	37
3.2	Pressões.....	38
3.3	Estados.....	38
3.4	Impactos.....	39
3.5	Identificação dos Serviços Ecossistêmicos Essenciais	40
CAPÍTULO 4	ÁGUA SUBTERRÂNEA	41
4	Identifying priority conservation zones for the sustainability of groundwater ecosystem services in an area of the Guarani aquifer, Brazil	41
4.1	Introduction.....	42
4.2	Study Area.....	44
4.3	Materials and Method	46
4.3.1	Data Collection and Treatment of geographic information.....	48
4.3.2	Parameters' Index Values.....	50
4.3.3	DRASTIC-LU / PESTICIDE DRASTIC-LU modeling in GIS	50

4.4	Results and Discussion.....	51
4.4.1	Hydrogeological parameters	51
4.4.2	Groundwater vulnerability – DRASTIC-LU and PESTICIDE DRASTIC-LU models	52
4.5	Conclusions	57
CAPÍTULO 5 ECOTURISMO		59
5	Mapping Potential Zones for Ecotourism Ecosystem Services as a tool to promote landscape resilience and development in a Brazilian municipality	59
5.1	Introduction.....	60
5.2	Materials and Methods.....	62
5.2.1	Study Area: Brotas, São Paulo State, Brazil	62
5.2.2	Methodological Framework.....	64
5.3	Results	69
5.3.1	Z1 – Low Potential for Ecotourism Ecosystem Services.....	73
5.3.2	Z2 – Moderate Potential to Ecotourism Ecosystem Services	74
5.3.3	Z3 – High Potential for Ecotourism Ecosystem Services.....	75
5.3.4	Z4 – Very High potential for Ecotourism Ecosystem Services	76
5.4	Discussion	77
5.5	Conclusions	79
CAPÍTULO 6 SOLOS.....		81
6	A GIS FUZZY-MCDA MODEL TO ANALYZE SOIL ECOSYSTEM SERVICE'S VULNERABILITY: A STUDY CASE IN A BRAZILIAN CERRADO LANDSCAPE.	81
6.1	Introduction.....	82
6.2	Materials and Method	84
6.2.1	Study Area.....	84
6.2.2	Definition of the ecosystem services analyzed: The importance of site diagnosis.	85
6.2.3	Data used	86
6.2.4	Method	87
6.3	Results and Discussion.....	95
6.3.1	GIS parameters used in the model.....	95
6.3.2	Land Use and Soil Ecosystem Services Vulnerability Chart.....	96
6.4	Conclusions	107
CAPÍTULO 7 ZONEAMENTO GEOAMBIENTAL		109
7	Zoneamento Geoambiental voltado ao desenvolvimento territorial sustentável do município de Brotas, SP.....	109
7.1	Introdução.....	109
7.2	Materiais e Método	112

7.2.1	Área de Estudo	112
7.2.2	Materiais	113
7.2.3	Método	113
7.3	Resultados e Discussão	122
7.4	Conclusão.....	137
CAPÍTULO 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS		139
REFERÊNCIAS		143

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os ecossistemas ao redor do mundo têm uma grande variedade de funções e promovem serviços de crucial importância para a saúde, qualidade de vida, bem-estar das comunidades (COSTANZA *et al.*, 2014, 2017). A apreensão acerca da quantidade e a qualidade dos ecossistemas e dos recursos naturais disponíveis é crescente devido aos serviços ecossistêmicos vitais prestados por eles (WEBSTER *et al.*, 2015). Dentre esses serviços é possível citar a sobrevivência dos seres vivos, a manutenção da agricultura e consequente disponibilidade de alimentos, a continuidade das florestas, transformação da superfície do planeta, etc. (HIRATA, VIVIANI-LIMA e HIRATA, 2009).

Entretanto, a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas globais têm sofrido rápidas transformações desde a segunda metade do século XX em decorrência do crescimento populacional e desenvolvimento econômico. Apesar da reestruturação e gerenciamento dos ecossistemas terem proporcionado às sociedades humanas alguns benefícios como o aumento da produção de alimentos, essas mudanças têm gerado grandes custos ambientais, refletindo diretamente nas funções e nos serviços ecossistêmicos (MEA, 2005).

Além disso, por ocorrerem de maneira desigual nos ecossistemas, essas alterações podem exacerbar as desigualdades no acesso aos serviços ambientais, contribuindo ainda mais para a pobreza (MEA, 2005). Apesar da efetividade de ações desenvolvidas em escalas locais para minimizar os impactos dessas mudanças, como o aumento de áreas protegidas, o manejo sustentável de florestas, as diretrizes para o controle de espécies exóticas e o aumento de recursos para a biodiversidade, a taxa de perda de biodiversidade global não aparenta estar reduzindo (BUTCHART *et al.*, 2010).

O cenário ocorrido em território brasileiro é de especial preocupação devido ao desordenado crescimento econômico no período pós-guerra. O Brasil, como um histórico produtor de

commodities (VERÍSSIMO E XAVIER, 2014), apresenta como principais fatores de degradação ambiental as transições das formações vegetais naturais para cultivos agrícolas (GARRETT *et al.*, 2018; SCHIELEIN E BÖRNER, 2018), pastagens (COHN *et al.*, 2016), mineração (SANTOS SILVA *et al.*, 2008; SONTER *et al.*, 2014), dentre outros.

As transições de uso do solo além de remodelarem a superfície da terra, acarretam impactos negativos sobre os serviços ecossistêmicos (Hasan *et al.*, 2020). Em casos de transformações abruptas (como as ocorridas em território brasileiro) os impactos sobre os serviços ecossistêmicos podem ser irreversíveis (WU, LIANG E LIU, 2019). No estado de São Paulo, o município de Brotas merece especial destaque por seu território de relevante interesse ecológico. As áreas de recarga do aquífero Guarani, diversos mananciais, e a biodiversidade sofrem pressão dos conflitos de uso do solo e das dinâmicas dos seus processos de geologia, pedologia e geomorfologia colocando em risco as funções ecossistêmicas locais (PEIXOTO, 2010a).

O ecossistema naturalmente frágil aliado ao uso não sustentável dos recursos naturais já acarreta em consequências ao município. De acordo com Costa *et al.*, (2015), no ano de 2014 o estado de São Paulo como um todo sofreu com a escassez hídrica, forçando os gestores a tomarem medidas drásticas como o racionamento de água. Em Brotas a situação não foi diferente, onde ocorreu o esvaziamento dos principais reservatórios, colocando em risco o bem-estar populacional.

Outro fator indispensável à economia do município de Brotas que pode ser afetado pela degradação dos condicionantes ambientais é o ecoturismo. Esta é uma das principais atividades econômicas e depende diretamente da qualidade ambiental e da beleza cênica das paisagens para prosperar (BROTAS, 2018).

Os pressupostos sociais, econômicos e principalmente ambientais acima citados reafirmam a necessidade dos municípios apresentarem estratégias de planejamento de seus territórios que incluam a avaliação sistemática e contínua dos serviços ecossistêmicos, auxiliando assim não só na conservação dos recursos naturais, mas também na busca pela implementação de modelos sustentáveis de desenvolvimento. Dentro desse contexto, é importante reafirmar o papel essencial da academia para a produção de documentos técnico-científicos que produzam análises acerca de vulnerabilidades e potencialidades dos serviços ecossistêmicos locais em prol da eficiência do planejamento.

Nota-se que nos últimos anos ocorreu um aumento significativo no número de produções científicas que retratam a temática dos serviços ecossistêmicos no Brasil, tais como Machado e Pacheco (2010); Parron *et al.*, (2015), Prado *et al.*, (2015); Puga *et al.*, (2015), Sampaio e Costa (2011) e Vezzani (2015).

Ainda assim existe uma carência de trabalhos que contemplem uma análise integrada entre os elementos estruturais da paisagem e as atuações antrópicas em escala municipal e que sejam

capazes de diagnosticar e espacializar as vulnerabilidades e potencialidades dos serviços ecossistêmicos. Tal análise é essencial tendo em vista que promove o suporte básico para as políticas ambientais e de desenvolvimento econômico do município, principalmente ao integrarem os planos diretores municipais.

A partir desta problematização, a cartografia Geoambiental, tal como foi originalmente proposta por Cendrero (1975, 1980) emerge como uma possibilidade de auxiliar no planejamento e gestão das paisagens, devido à sua capacidade de além representar espacialmente os atributos do meio físico e as intervenções humanas, também conceber análises e propor medidas de ordenamento do território com o objetivo de atuar de forma efetiva na melhora da qualidade ambiental dos municípios (GUERRERO, LOLLO E LORANDI, 2016).

As técnicas que compõe a cartografia geoambiental levam em consideração o fato de que as paisagens são a forma espacial do presente momento e também são reflexos das formas passadas, e são capazes de revelar a dinâmica da evolução dos processos espaciais que podem ser considerados de estabilidade, reformulação parcial ou de completa remodelação a partir das alterações antrópicas ou eventos naturais (MARTINELLI E PEDROTTI, 2001).

Na busca por auxiliar no processo de tomada de decisão que minimize os impactos da expansão das atividades antrópicas sobre os serviços ecossistêmicos prestados em um espaço geográfico, a cartografia geoambiental pode se fazer presente principalmente ao dar as bases para a produção de uma das mais utilizadas ferramentas de planejamento territorial: O Zoneamento (Geo) ambiental.

O Zoneamento Geoambiental representa a análise sistemática de um território, que a partir da obtenção e análise de características do meio físico (tais como geologia, solos, clima, relevo, etc.) sejam propostas unidades geoambientais (zonas) que auxiliem na identificação das potencialidades e restrições de um território (FALEIROS, 2012; GUERRERO, 2014). Adicionalmente, o zoneamento pode ser considerado como a última etapa do processo de planejamento, contribuindo para a exposição de forma cartográfica das unidades geoambientais produzidas a partir de critérios de agrupamento preestabelecidos (ZACHARIAS, 2010).

Usualmente os zoneamentos geoambientais produzidos em escala municipal não levam em consideração os serviços ecossistêmicos essenciais aos territórios analisados, negligenciando a importância dos ecossistemas para o desenvolvimento regional. Essa, portanto, é a principal lacuna científica que esse trabalho pretende preencher.

Com isso, é importante ressaltar que a integração dos serviços ecossistêmicos no zoneamento geoambiental visa, além de promover bases técnicas e conservacionistas, dar visibilidade à importância dos recursos naturais para a sociedade que, em geral, negligencia o valor intrínssico dos produtos fornecidos pelos ecossistemas (DAILY *et al.*, 2009; GROOT *et al.*, 2010).

Mediante a estas considerações, este trabalho visa a integração de diferentes métodos de avaliação do meio físico e biológico para identificar e analisar os serviços ecossistêmicos e suas vulnerabilidades do município de Brotas, objetivando propor um zoneamento geoambiental que contemple o desenvolvimento regional sustentável, para mediar o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a preservação dos recursos naturais.

As análises integradoras entre a dinâmica do meio físico, os serviços ecossistêmicos prestados pelas paisagens locais e o padrão de utilização do espaço geográfico por parte dos seres humanos são as bases para a identificação de zonas de maior interesse e/ou necessidade de conservação e para a proposição de medidas e diretrizes de ordenamento territorial com bases sustentáveis para o município de Brotas.

1.2 Hipótese

Diante do cenário de alto grau de antropização ocorrido nas paisagens do estado de São Paulo nas últimas décadas, esse estudo apresenta como hipótese que o atual padrão de ocupação do município de Brotas é conflitante com os serviços ecossistêmicos essenciais prestados, gerando a possibilidade de um panorama de intensificação da degradação ambiental e perda de benefícios sociais, ambientais e econômicos promovidos pelos ecossistemas.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é produzir um Zoneamento Geoambiental integrando os serviços ecossistêmicos essenciais prestados pela paisagem local como critério de agrupamento na análise territorial.

Os objetivos específicos concentram-se em:

- Caracterizar a área de estudo quanto aos elementos constituintes da paisagem, tais como solos, geologia, relevo, pluviosidade, unidades aquíferas e uso do solo
- Diagnosticar os serviços ecossistêmicos essenciais para o atual plano de desenvolvimento socioeconômico da área de estudo
- Produzir e sistematizar materiais cartográficos básicos
- Analisar a vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos promovidos pelas águas subterrâneas, integrando elementos hidrogeológicos e de ocupação antrópica
- Identificar a potencialidade local para a exploração sustentável dos serviços ecossistêmicos prestados pelo ecoturismo em Brotas
- Analisar a vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos do solo em Brotas, a partir de parâmetros geoambientais e de uso atual do solo local

- Produzir o Zoneamento Geoambiental do município de Brotas, integrando as potencialidades e restrições dos serviços ecossistêmicos essenciais
- Promover diretrizes de ordenamento territorial que contribuam para o planejamento territorial sustentável do município de Brotas.

1.4 Estrutura da tese

Esta tese de doutorado é uma coleção de oito capítulos. Os dois primeiros consistem nos elementos textuais básicos de Introdução e Materiais e Método. Os cinco capítulos posteriores representam os resultados do estudo, sendo quatro deles na forma de artigos. O capítulo 8 apresenta as considerações finais.

Considerando que os artigos produzidos serão publicados separadamente, alguma sobreposição e repetição de ideias entre eles é inevitável especialmente em relação a caracterização da área de estudo e alguns procedimentos metodológicos.

Para um panorama geral da estrutura proposta nessa tese, um resumo dos capítulos é apresentado a seguir.

- Capítulo 1: introdução da tese com a contextualização, a hipótese de estudo, os objetivos gerais e específicos e a estrutura da tese.
- Capítulo 2: caracterização da área de estudo, incluindo os materiais utilizados no desenvolvimento da tese e um panorama dos procedimentos metodológicos aplicados. A descrição detalhada dos métodos encontra-se nos artigos resultantes.
- Capítulo 3: resultado do diagnóstico geoambiental que, a partir da aplicação do método DPSIR, identificou os serviços ecossistêmicos essenciais de Brotas que direcionaram as ações do zoneamento geoambiental proposto. Os serviços ecossistêmicos essenciais diagnosticados foram os promovidos pelas águas subterrâneas, ecoturismo e solos.
- Capítulo 4: intitulado "*Identifying priority conservation zones for the sustainability of groundwater ecosystem services in an area of the Guarani aquifer, Brazil*", apresenta a análise da vulnerabilidade local quanto à provisão de serviços ecossistêmicos de provisão de água subterrânea de qualidade, utilizando os métodos DRASTIC-LU e PESTICIDE DRASTIC-LU.
- Capítulo 5: Intitulado "*Mapping Potential Zones for Ecotourism Ecosystem Services as a tool to promote landscape resilience and development in a Brazilian municipality*", identifica as áreas no município de Brotas onde há maior probabilidade de ocorrência de serviços ecossistêmicos recreacionais ligados ao ecoturismo, com uso da análise multicritério em ambiente SIG.

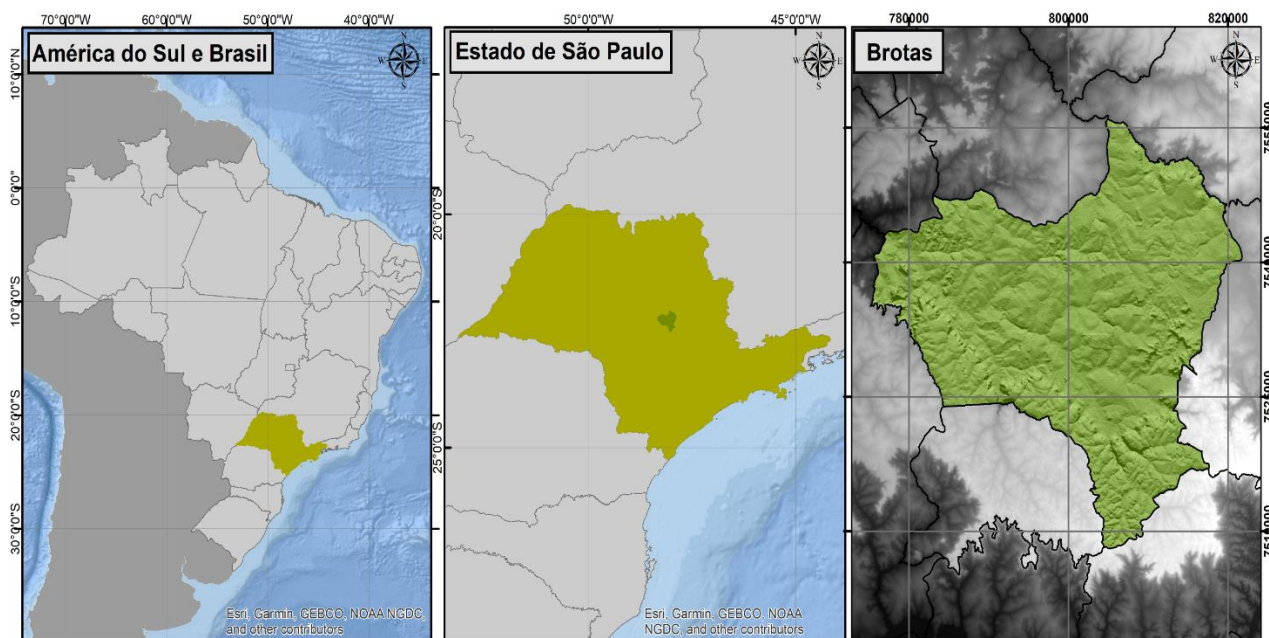
- Capítulo 6: intitulado “*A GIS FUZZY-MCDA model to analyze soil ecosystem service’s vulnerability: a study case in a Brazilian cerrado landscape*”, apresenta a análise da vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos de solo, relacionados a prevenção à erosão, retenção de solos e manutenção da qualidade de solos.
- Capítulo 7: intitulado “Zoneamento geoambiental voltado ao desenvolvimento territorial sustentável do município de Brotas, SP”, o capítulo promove uma análise espacial integrada entre os serviços ecossistêmicos essenciais na área de estudo, utilizando como base teórica os princípios do Zoneamento Ecológico Econômico do Brasil.
- Capítulo 8: Considerações finais

CAPÍTULO 2 MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Caracterização da área de estudo

O município de Brotas está localizado geograficamente na região central do estado de São Paulo (), a uma distância de 208km da capital paulista, pertencendo à região administrativa de Rio Claro (BROTAS, 2018). A área da unidade territorial municipal é de 1.101,374km², apresentando uma população estimada para o ano de 2017 de 23.858 habitantes, gerando assim uma densidade demográfica de 19,59hab./km² (IBGE, 2018).

Figura 2-1 Localização da área de estudo

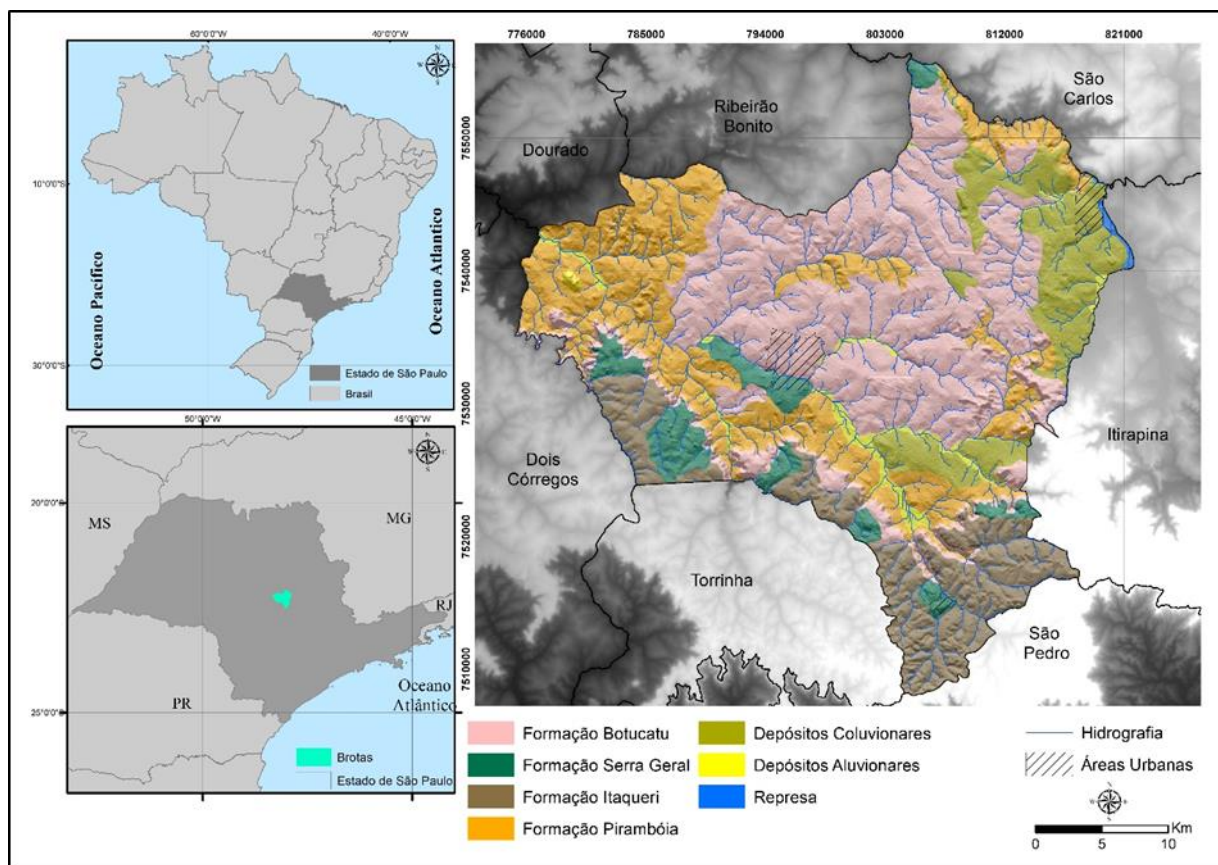


2.1.1 Caracterização Geológica

Em um nível de macro escala geológica, o município de Brotas encontra-se inserido na unidade morfoestrutural da bacia sedimentar do Paraná (ROSS e MOROZ, 1996). As bacias sedimentares são descritas por Penteadó (1983) como grandes áreas dos escudos que foram deprimidas e recobertas pelo oceano, onde houve grande deposição de sedimentos e foram posteriormente exodadas.

Estas bacias sedimentares apresentam relevo baixo, com menos de 1000 metros, contendo planaltos e formação de cuestas arenítico basálticas (PENTEADO, 1983). Como reflexos deste arcabouço, as formações geológicas identificadas no local são: Botucatu, Itaqueri, Pirambóia, Serra Geral, Depósitos Aluvionares e Depósitos Colúvio-Eluvionares, como representado na Figura 2-2.

Figura 2-2 Mapa Geológico



As formações e seus grupos correspondentes são descritas a seguir, levando-se em consideração que o grupo pode ser caracterizado como a unidade de categoria superior à formação. Já a formação pode ser descrita como uma unidade de rochas qualificada por suas características líticas e de sua posição estratigráfica relativa, sendo a unidade descritiva básica da nomenclatura estratigráfica (IPT, 1981)

2.1.1.1 Grupo São Bento

De acordo com White (1908 apud IPT, 1981), o grupo São Bento reúne um conjunto de arenitos de característica predominantemente avermelhada e granulação variada. Este grupo compõe a sequência triássico-cretácea representada pelas formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral, apresentando características de sedimentação continental condicionada por clima árido e semiárido e finalizada por vulcanismo basáltico (ZAINÉ, 1994).

- A formação **Botucatu** é formada predominantemente por arenitos de granulação fina a grossa, com características arredondadas e com grande esfericidade e coloração avermelhada e fosca. Exibem, também, estratificação cruzada tangencial que varia de tamanho, fator este que exhibe a característica de dunas caminhantes (MEZZALIRA, 1981). As características acima citadas remetem a subambientes passados de um grande deserto climático de aridez crescente (MEZZALIRA, 1981). Sendo assim, os arenitos provenientes da formação Botucatu, quando não silicificados, são excelentes camadas portadoras para a formação de aquíferos, fazendo parte, inclusive, do Sistema Aquífero Guarani (MEZZALIRA, 1981)
- A formação **Pirambóia**, segundo Mezzalira (1981), é constituída por sedimentos de formação eólica e fluvio-eólica que foram depositados em áreas de ambiente desértico, correspondendo a evolução de um campo de dunas eólicas. A formação Pirambóia pode conter por espessos arenitos de coloração avermelhada, amarelada e esbranquiçada, sendo sua granulometria de fina a média, apresentando geometria lenticular desenvolvida, com intercalação de camadas finas de siltitos e argilitos. Ainda nesta unidade, são encontradas grandes estruturas sedimentares (tais como estratificações cruzadas de médio e grande porte) (ZAINÉ, 1994).
- A formação **Serra Geral** pode ser descrita como um conjunto de derrames basálticos, entre os quais se intercalam arenitos da formação Botucatu, formando assim a chamada Bacia Serra geral, que corresponde à Supersequência Gondwana III. Associados aos derrames, estão intrusões também basálticas formadas por diques e sills (IPT, 1981). Tal formação também tem incorporadas rochas intrusivas associadas ao processo de vulcanismo ocorrido na bacia sedimentar do Paraná, constituídas por diques e soleiras de diabásio. Os afloramentos da formação ocorrem nas áreas de cuesta, associadas pela relação entre as formas de relevo, a erosão e a litologia (ZAINÉ, 1994)

2.1.1.2 Grupo Bauru

O grupo Bauru caracteriza-se por um grupo de rochas formadas por sedimentos siliciclásticos que foram depositadas em área continental da plataforma Sul-Americana no decorrer do último episódio significativo de sedimentação da unidade (SILVA, 2003).

De acordo com Zaine (1994) a faixa de afloramentos do grupo está localizada no Planalto Ocidental Paulista, onde recobre a formação Serra Geral. No município de Brotas este Grupo é representado apenas pela formação Itaqueri.

- Formação Itaqueri: Apesar de correntes geológicas proporem que a Formação Itaqueri deveria ser unificada à sua porção superior devido à sua descontinuidade geográfica, neste trabalho consideramos tal formação como um conglomerado fluvial de ocorrência geográfica na serra de Itaqueri, liticamente bem caracterizado e separado da outra formação do Grupo Bauru por uma discordância de origem erosiva (MEZZALIRA, 1981).
- Depósitos Aluvionares e Depósitos Colúvio-Eluvionares: Estes depósitos são constituídos essencialmente por sedimentos de origem aluvionar ou coluvionar que se distribuem ao longo das planícies fluviais no município de Brotas, datados do Quaternário. Apresentam textura bastante arenosa derivada das formações litológicas adjacentes e não raramente apresentam matéria orgânica em suas camadas superficiais (GUERRERO *et al.*, 2020).

2.1.2 Caracterização Geomorfológica

De acordo com o Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo (ROSS e MOROZ, 1996), o município de Brotas está localizado geomorfologicamente nas unidades morfoesculturais do Planalto Ocidental Paulista e Coberturas Sedimentares Inconsolidadas (transição entre o Planalto Ocidental e a Depressão Periférica Paulista).

As unidades morfoesculturais podem ser descritas de acordo com (IG/SMA, 2014) como sendo compartimentos produzidos pela relação entre os processos tectônicos e a ação do clima ao longo do tempo geológico, gerando padrões de relevo que refletem esta ação climática.

O Planalto Ocidental Paulista recobre praticamente 50% do território do estado de São Paulo, localizando-se em sua maior parte sobre rochas do Grupo Bauru, caracterizados por formações essencialmente arenosas. Os basaltos do local são encontrados nos vales dos principais rios de forma descontínua (IPT, 1981)

O relevo do Planalto Ocidental é considerado por Ross e Moroz (1981) como levemente ondulado com ocorrência predominante de colinas baixas e amplas com topos aplanados.

Ainda como reflexo da bacia sedimentar do Paraná, Brotas está localizada sobre um relevo de cuesta. Os relevos cuestiformes podem ser descritos como relevos em estrutura monoclinal e discordante, com características dissimétricas, formados por um lado com perfil côncavo com íngremes declives e outro com planalto suavemente inclinado, que se forma por erosão diferencial (IPT, 1981)

As cuestras se formam essencialmente em áreas de estruturas concordantes inclinadas, nas bordas das bacias sedimentares, que é onde o contato entre as estruturas litológicas intensifica a ação da erosão remontante.

Para a existência do relevo de Cuestas é necessário que existam camadas inclinadas, alternância de camadas com diferentes durezas e ações erosivas que resultam na formação da frente de cuesta em relação a sua depressão subsequente, sendo assim o relevo cuestiforme pode ser considerado como resultado do trabalho da erosão diferencial ao longo do tempo (GUERRA, 1983).

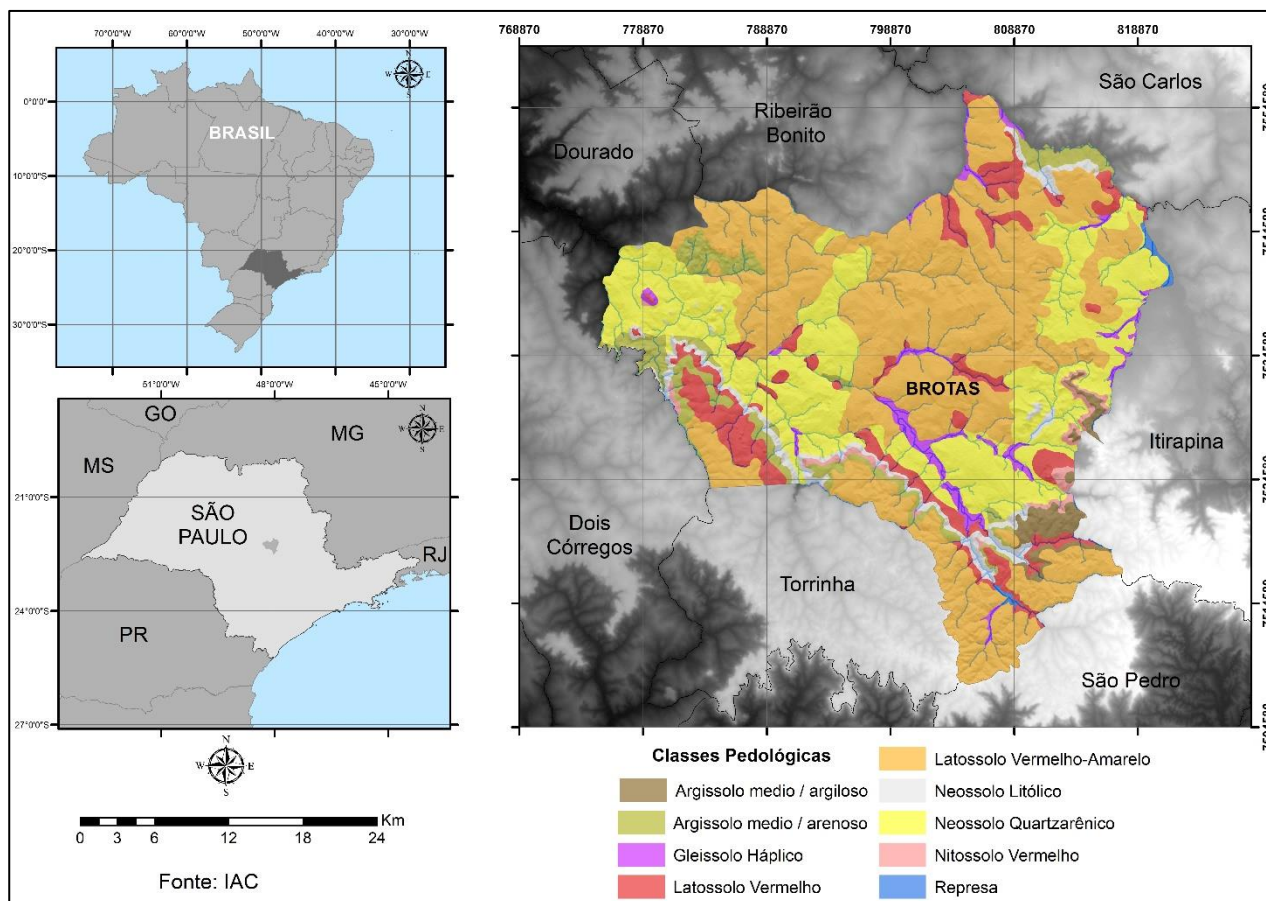
Dentro destes elementos topográficos, o município de Brotas localiza-se no Reverso da Cuesta Arenítico Basáltica, que pode ser descrito como o compartimento que começa na parte terminal superior do front e se direciona ao centro da bacia sedimentar do Paraná (CASSETI, 2005).

Quando analisado em uma escala maior de trabalho, o município apresenta morros isolados, áreas de planalto centro ocidental indiferenciado, planaltos, planícies fluviais e áreas de serras / escarpas (IG/SMA, 2014).

2.1.3 Caracterização Pedológica

Os tipos de solo presentes na área de estudo foram identificados nos trabalhos do Instituto Agronômico de Campinas e são demonstrados na Figura 2-3 . Para este estudo, o mapeamento original de IAC (1981) foi adaptado à nomenclatura em conformidade como o sistema brasileiro de classificação de solos (EMBRAPA, 2013). A distribuição das unidades pedológicas no município pode é representada na Figura 2-3 e a descrição posterior das unidades provém das publicações do Instituto Agronômico de Campinas – (IAC, 2014).

Figura 2-3 Mapa pedológico



2.1.3.1 Argissolos

Os Argissolos são solos de origem mineral que apresentam clara diferenciação entre seus horizontes e podem ser divididos entre os que apresentam textura média ou arenosa.

Quando apresentam textura arenosa localizam-se em relevos suaves a ondulados apresentando pequeno grau de coesão e menor permeabilidade nos horizontes superficiais, além de destacarem-se por sua relativa elevada suscetibilidade à erosão, fato que demanda práticas intensivas de manejo.

Já os Argissolos de textura argilosa são frequentemente derivados de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares finas. Tais solos apresentam textura essencialmente argilosa e frequentemente com pouca profundidade com maior presença de minerais, o que os torna mais aptos à exploração de atividades agrícolas do que os de textura média/arenosa.

2.1.3.2 Gleissolos

Os Gleissolos são solos também de origem mineral em que sua formação ocorreu em ambiente de saturação, ocorrendo principalmente em áreas de fundo de vale, várzeas de inundação etc. Conhecidos como solos Hidromórficos, sua textura e fertilidade são bastante variáveis e dependem diretamente das rochas derivadas e dos tipos de solo que estão em seu entorno.

Fatores que limitam a utilização dos Gleissolos são a frequente inundação, longos períodos de saturação e elevações no nível do lençol freático, o que dificulta a sua utilização para a produção agrícola ou qualquer outra atividade.

2.1.3.3 Latossolo Vermelho

De uma maneira geral, os Latossolos são de origem mineral, com horizontes estruturais pouco diferenciados apresentando certo grau de homogeneidade, sendo também bastante profundos, com boa drenagem e considerados de pouca ou média fertilidade.

Os Latossolos Vermelhos do estado de São Paulo apresentam textura argilosa ou muito argilosa e concentram-se na região de Cuestas, ao longo da Depressão Periférica e na Porção oeste paulista. Por terem certa capacidade de reservar nutrientes (macro e micro) e terem estabilidade mecânica, apresentam elevado grau de resiliência.

2.1.3.4 Latossolo Vermelho-Amarelo

Os Latossolos Vermelho-Amarelos dividem-se em duas classes de acordo com sua textura: os que apresentam textura argilosa e os de textura média. Na região de Brotas estão presentes os Latossolos Vermelho-Amarelos de textura média, que são aqueles desenvolvidos de rochas areníticas e encontrados em relevos com declividades de 0 a 20 %.

Estes apresentam como características elevada permeabilidade, baixa coesão e baixa retenção de água, enfrentando estresse hídrico nos períodos mais secos e maior suscetibilidade à erosão nos períodos chuvosos, o que indica que seus serviços ecossistêmicos são menos resilientes.

2.1.3.5 Neossolo Litólico

Os Neossolos são solos formados pelo transporte e deposição sedimentar que apresentam pouco desenvolvimento pedogenético e pequena profundidade, geralmente formado por areias quartzosas ou por camadas variadas provenientes dos materiais de origem. Na área de estudo foram identificados os Neossolos Litólico e Quartzarênico.

O Neossolo Litólico localiza-se na área de estudo em regiões mais íngremes, onde há maior dissecação geomorfológica. A pequena profundidade, pouco desenvolvimento e presença de

pedregulhos indica que são solos muito frágeis e que impossibilita a maioria das atividades antrópicas, tais como práticas agrícolas e construções.

2.1.3.6 Neossolo Quartzarênico

Já o Neossolo Quartzarênico diferencia-se essencialmente do seu homônimo Litólico pela sua localização em terrenos mais suaves. Entretanto também apresenta elevada permeabilidade, baixa retenção de água e nutrientes e elevada suscetibilidade à erosão.

2.1.3.7 Nitossolo Vermelho

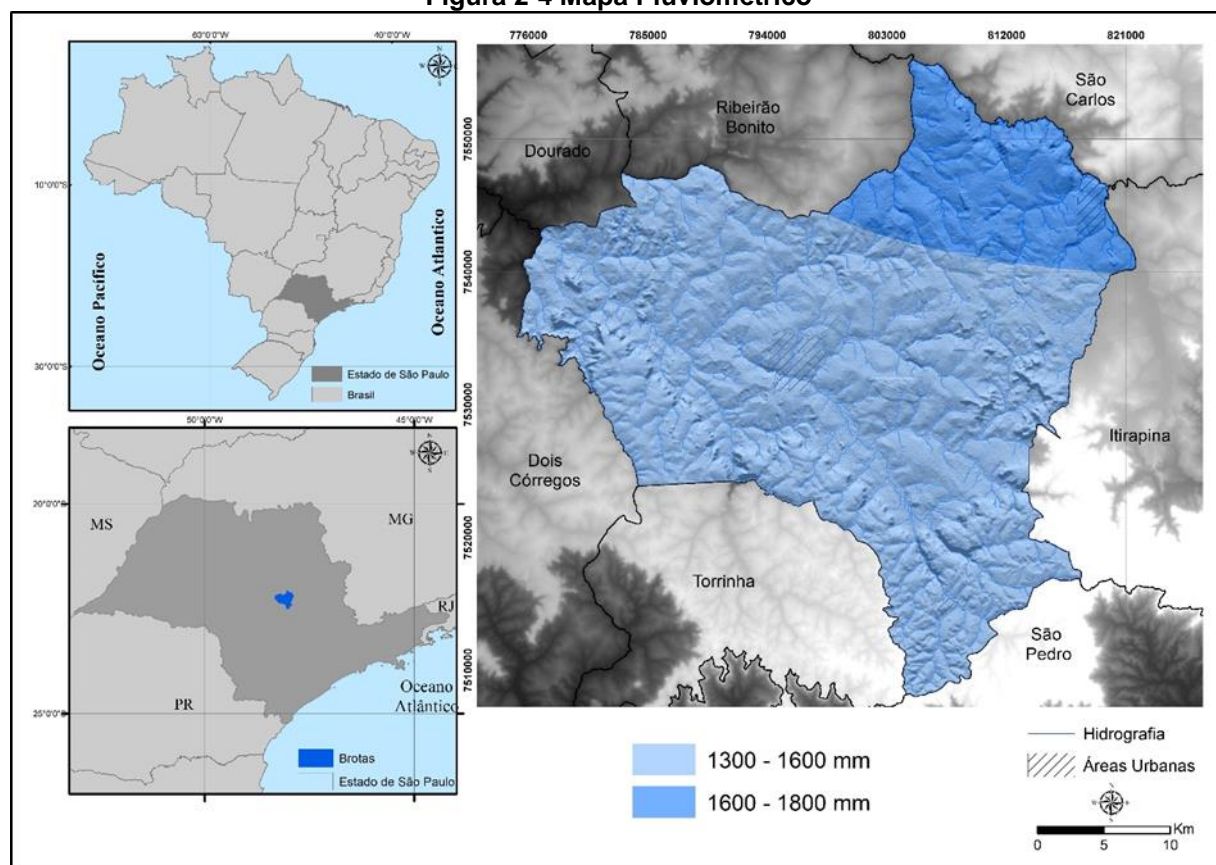
Os Nitossolos Vermelhos são solos minerais de característica argilosa, que favorece inclusive a retenção de água, o armazenamento de nutrientes, drenagem favorável e resiliência frente à diferentes condições climáticas. Quanto à fertilidade, os Nitossolos do estado de São Paulo são bastante favoráveis já que derivam de basaltos e diabásios, entretanto como ocorrem em áreas de relevo ondulado, necessitam de cuidados de estabilidade para evitar processos erosivos.

2.1.4 Caracterização Climática e Pluviométrica

De acordo com (SALIS, 1990) o clima da região de Brotas corresponde às características do clima Cwa, que é descrito segundo a classificação climática de Köppen como Subtropical de verão úmido (temperaturas superiores a 22°) e inverno seco (temperaturas inferiores a 18°), sendo o tipo climático predominante nas regiões central, leste e oeste do Estado de São Paulo (EMBRAPA, 2016).

Quanto às precipitações, os dados de estações meteorológicas disponibilizados pelo CEMADEN (Figura 2-4) mostram que há duas classes de pluviosidade no município (ROSS,2012). A primeira está localizada na porção extremo norte e apresenta de 1600 a 1800 mm de média anual de chuvas. Já na porção sul, a média anual de chuvas é de 1300 a 1600mm.

Figura 2-4 Mapa Pluviométrico



2.2 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho são demonstrados na Tabela 2-1, bem como suas escalas aproximadas, ano e fontes de obtenção.

Tabela 2-1 Materiais Utilizados

Dado	Escala Aproximada	Ano	Fonte de Obtenção
Imagem Landsat 8	1:50.000	2018	USGS
Carta Topográfica Brotas	1:50.000	1970	IBGE
Áreas Urbanas Consolidadas	1:50.000	2010	IBGE
DEM ALOS	1:50.000	2011	JAX
Geodiversidade	1:500.000	2015	CPRM
Geologia	1:75.000	2016	IG - SP
Mapa Pedológico Folhas SF.22-Z-B-III-4; SF.23-Y-A-I; SF.23-Y-A-IV	1:50.000	1981	IAC - SP
Feições Erosivas	-	2020	CPRM
Poços Profundos	-	2019	CPRM
Recarga de Aquíferos	-	2006	Rabello
Condutividade Hidráulica	1:50.000	2016	Tanajura e Leite
Formas de Terreno	1:50.000	2008	TOPODATA
Dados Turísticos	1:50.000 (pós-mapeamento)	2018	BROTAS
Dados Saneamento	Dado Descritivo	2016	PMB
Dados geográficos Cadastro Ambiental Rural	1:50.000	2018	SFB
Folhas SRTM s23_w048 e s23_w049	1:50.000	2017	USGS
Dados pluviométricos	1:50.000	2017	CEMADEN
RPPN's	1:50.000	2014	SMSP
Unidades de Conservação	1:50.000	2014	SMSP
Carta de Uso do Solo	1:50.000	2018	MapBiomias
Rodovias	1:50.000	2018	Ministério dos Transportes
Geodiversidade	Dado descritivo	2015	CPRM
Uso do solo coleção 4.0	1:50.000	2018	MapBiomias

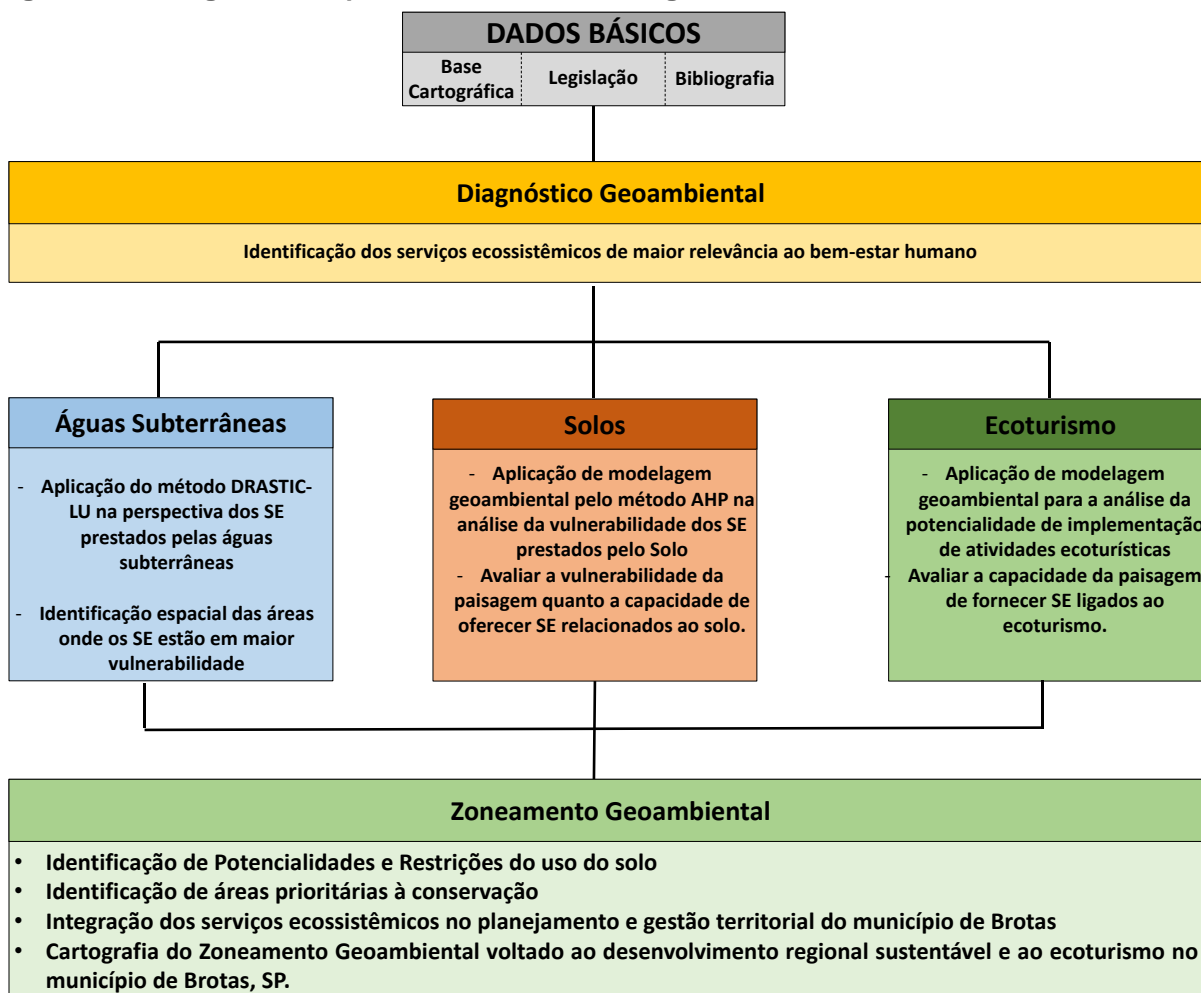
2.3 Método

A estrutura básica desse trabalho considerou a utilização de geotecnologias como ferramenta de suporte à tomada de decisão em escala municipal para propor um Zoneamento Geoambiental voltado ao desenvolvimento regional sustentável de Brotas.

O zoneamento proposto utilizou técnicas e procedimentos metodológicos sistematizados em revisões bibliográficas para diagnosticar a realidade local e da cartografia geoambiental para produzir uma análise integrada dos fatores físicos e antrópicos que interagem no território.

A Figura 2-5 ilustra os procedimentos metodológicos aplicados, sendo as descrições de cada um deles aprofundadas posteriormente:

Figura 2-5 Fluxograma dos procedimentos metodológicos utilizados no Zoneamento Geoambiental



2.3.1 Princípios de Mapeamento

Um Zoneamento, qualquer que seja, representa propor zonas territoriais com o objetivo de identificar e hierarquizar áreas homogêneas da paisagem para o delineamento das potencialidades e restrições territoriais (ZACHARIAS, 2010) . Releva-se, então, a importância única de estudar a organização territorial como uma forma de identificar como uma ação se insere na dinâmica natural, objetivando corrigir aspectos desfavoráveis e facilitando a exploração sustentável dos recursos que o meio oferece (TRICART, 1977).

Portanto, trabalhar a paisagem como categoria de estudo por meio da cartografia de paisagens / cartografia geoambiental tem se tornado um poderoso instrumento de análise para áreas como a geografia física, ciências ambientais, dentre outras (CAVALCANTI, 2014). Concomitantemente, a utilização de sistemas de informações geográficas também representa um desafio aos profissionais da área, dado a quantidade de técnicas e métodos disponíveis além de proposições teóricas diversas.

Assim, os princípios de mapeamento realizados nesta tese seguem o conceito de unidades ecodinâmicas de (TRICART, 1977), que, baseados no instrumento lógico de geossistemas, propõe o direcionamento à análise das relações mútuas entre os diversos componentes da dinâmica geoambiental e os fluxos de energia e matéria do meio ambiente.

Considerou-se que a maioria das paisagens apresenta certo grau de estabilidade dinâmica até um momento de rompimento, que pode ser causado tanto por processos naturais, quanto por (na maioria das vezes) intervenções progressivas dos seres humanos sobre os ecossistemas. Cabe aos geocientistas a complexa tarefa de identificar as vulnerabilidades naturais dos territórios estudados, os pontos de inflexão que desestabilizam os ecossistemas naturais e os impactos das atividades humanas.

A partir destes pressupostos, espera-se que a gestão territorial e a utilização dos recursos naturais ocorram a partir da avaliação dos possíveis impactos das ações antrópicas nos ecossistemas, determinando, a partir de métodos e técnicas com viés conservacionista, ações de extração de recursos ecológicos e utilização do território com menores taxas de degradação (ROSS, 1994, 2012; TRICART, 1977).

Como efeito, a utilização dos SIG's baseados nas unidades ecodinâmicas apresenta como resultados a proposição de áreas poligonais com características semelhantes quando a estabilidade ecodinâmica local, permitindo identificar áreas estáveis, transitórias, instáveis ou muito instáveis (inclusive com outras nomenclaturas para tal), dependendo exclusivamente do objetivo final do mapeamento.

Apesar de atualmente as competências legislativas e polícias que envolvem o planejamento ambiental estarem sob responsabilidade da União (por meio de seus órgãos ambientais federais), é a nível municipal que tais aplicações têm maior eficácia, já que é nos municípios que efetivamente ocorrem as interações sociais, ambientais e econômicas que atuam na dinâmica ecossistêmica (RECH e RECH, 2012).

A própria Constituição Federal Brasileira, por meio dos artigos 1º e 18º, corrobora com esse ideal, ao delegar autonomia de gestão aos municípios inclusive para a proteção do meio ambiente e conservação dos recursos naturais (SOUZA, 2012).

Com isso, os municípios brasileiros apresentam competências constitucionais que os tornam atores decisivos no processo de planejamento e gestão ambiental, principalmente dentro do contexto dos planos diretores, que contempla o conjunto de regras que norteia o desenvolvimento dos municípios brasileiros.

Como já mencionado, esse estudo traz como prioridade básica que os serviços ecossistêmicos essenciais sejam utilizados obedecendo critérios técnicos e científicos (ROSS, 1994), buscando auxiliar o processo de tomada de decisão por parte dos gestores municipais. Os princípios e critérios de mapeamento usados nesta tese permitem, então, propor critérios de planejamento e gestão das paisagens com o intuito de dar suporte à tomada de decisão por parte dos maiores responsáveis pelas ações a serem tomadas: os gestores públicos nas esferas federal estadual e principalmente municipal.

2.3.2 Diagnóstico Geoambiental

Dentro da estrutura deste trabalho, o diagnóstico ambiental torna-se um instrumento primário e de fundamental importância para a construção de um zoneamento coerente com a realidade da área de estudo, tanto nos aspectos relacionados ao meio físico, quanto aos que tangem à sociedade e a economia.

O diagnóstico consiste primeiramente na obtenção de dados e caracterização relativos à dinâmica geoambiental de um território, tais como geologia, geomorfologia, clima, hidrogeologia, uso do solo e infraestruturas, bem como da dinâmica econômica e social local. A partir deste levantamento prévio, busca-se avaliar as potencialidades e restrições de um território a partir da interação entre seus condicionantes, incluindo as ações antrópicas.

Assim, esse instrumento foi aplicado para identificar e demonstrar quais são os serviços ecossistêmicos mais relevantes à manutenção do equilíbrio ecológico e ao bem-estar dos seres humanos e ao desenvolvimento econômico local. Levou-se em consideração, também, que diagnosticar os serviços ecossistêmicos essenciais aprimora o processo de tomada de decisão por parte do poder público, evitando gastos desnecessários e contribuindo de forma mais efetiva

para o estabelecimento de melhores condições de vida para a população e para a conservação dos ecossistemas locais (KOSMUS, RENNER e ULLRICH, 2012).

Como método, foi aplicada uma adaptação da proposta metodológica de Kristensen (2004), denominada “DPSIR”, que visa, a identificação das forças motrizes das alterações da paisagem no local, as pressões do território, os impactos causados e as respostas que são aplicadas às problemáticas para identificar os serviços ecossistêmicos essenciais e sua relação com as atividades de origem humana.

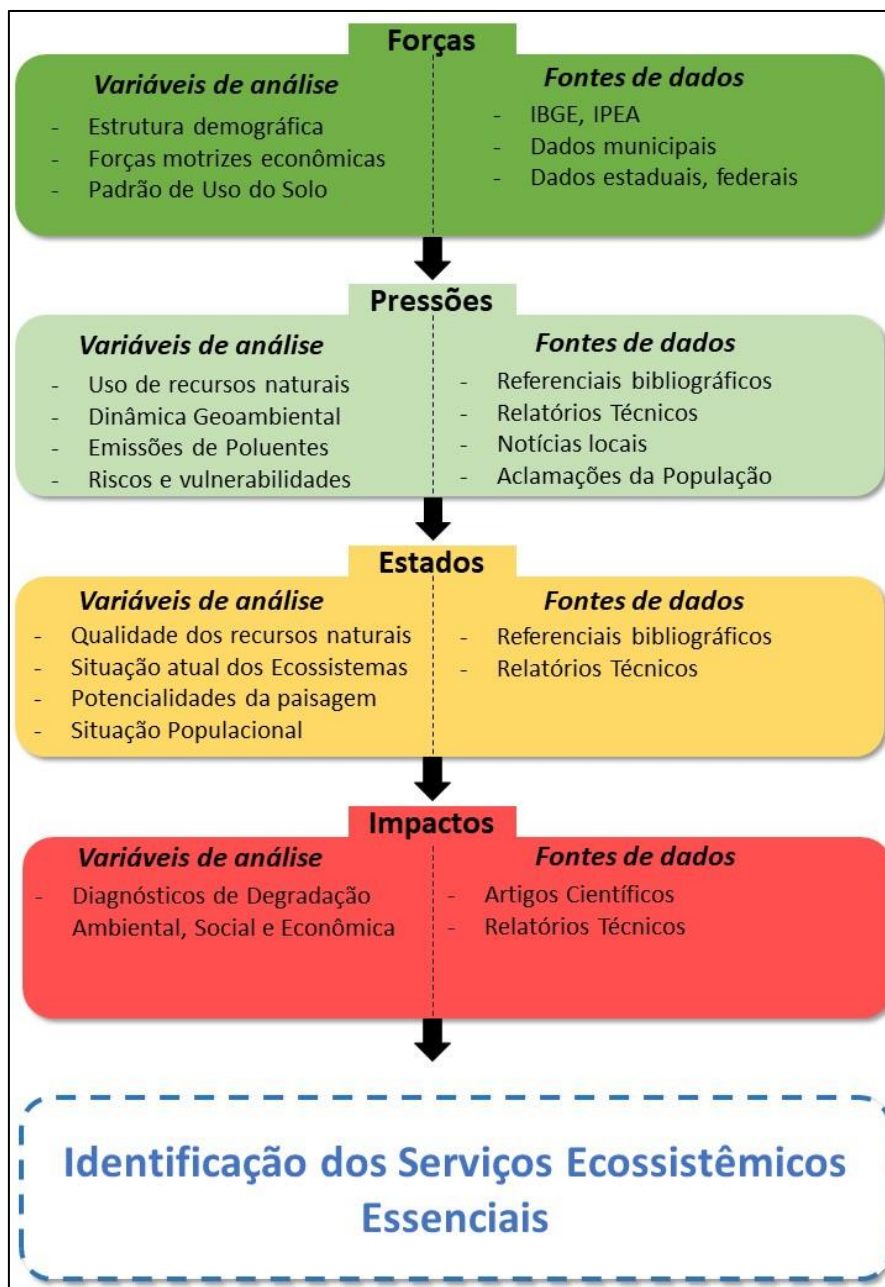
Esta metodologia parte de uma análise qualitativa da dinâmica territorial, social e econômica em que os indicadores analisados promovem um *feedback* aos formuladores de políticas públicas sobre a qualidade ambiental e dos impactos resultantes das políticas territoriais passadas e das futuras (KRISTENSEN, 2004)

A estrutura de aplicação metodológica baseia-se na existência de uma cadeia de vínculos causais relacionadas à cinco elos principais, sendo elas as Forças Motrizes, Pressões, Estados, Impactos e Respostas.

As **Forças Motrizes** representam as necessidades locais, ou seja, todas as atividades que movem o município para que sejam atendidas suas necessidades atuais, tais como à dinâmica populacional, dinâmica econômica, padrão de ocupação do solo, indústrias, etc.; já as **Pressões** são os resultados das atividades das forças motrizes sobre o território, tais como o uso de recursos, emissões, riscos, produção de barulho e resíduos, etc.; Como resultado das pressões, o **Estado** do ambiente é afetado, ou seja, o Estado é a qualidade dos vários compartimentos ambientais em relação aos serviços ecossistêmicos que são capazes de produzir, sendo uma combinação entre condições físicas, químicas e biológicas; Estas alterações no estado físico, químico e/ou biológico do ambiente determinam a qualidade dos ecossistemas locais, ou seja, apresentam **Impactos** no funcionamento dos ecossistemas; por fim, as **Respostas** são ações tomadas pela sociedade ou gestores públicos para enfrentar os problemas anteriormente diagnosticados.

Neste contexto, a aplicação da metodologia DPSIR para este estudo sofreu pequenas adaptações, onde a identificação dos serviços ecossistêmicos se dá a partir da análise das Forças Motrizes, Pressões, Estado e Impactos, sendo as Respostas designadas aos resultados desta tese. A Figura 2-6 ilustra a metodologia aplicada e demonstra as variáveis de análise para cada elo da cadeia DPSIR e as fontes de obtenção dos dados.

Figura 2-6 Estrutura metodológica do Diagnóstico Geoambiental



2.3.3 Análise dos Serviços Ecossistêmicos Essenciais

Após a identificação dos serviços ecossistêmicos que mais se relacionam com o padrão de desenvolvimento municipal, fez-se necessário analisar individualmente cada um deles, estabelecendo suas potencialidades, restrições e propondo sugestões de uso sustentável, a partir da utilização de técnicas de cartografia geoambiental.

A cartografia geoambiental se apresenta como um instrumento eficaz para a produção desse tipo de análise, já que é capaz de representar computacionalmente a dinâmica da paisagem além de

permitir a identificação das relações do terreno com as atividades antrópicas (GUERRERO, LOLLO E LORANDI, 2016)

Assim, foram aplicados diferentes métodos de acordo com os objetivos individuais dos serviços essenciais: Águas subterrâneas, Ecoturismo e Solos.

Para analisar a vulnerabilidade dos serviços prestados pelas águas subterrâneas foi utilizado o método DRASTIC-LU / PESTICIDE DRASTIC-LU (ALAM *et al.*, 2014), já que se mostrou eficiente para integrar os parâmetros hidrogeológicos que regem a dinâmica do aquífero guarani com as intervenções antrópicas potencialmente contaminadoras.

Já para identificar o potencial para ocorrência de serviços de Ecoturismo e para avaliar a vulnerabilidade dos serviços de solos foram utilizadas técnicas de modelagem geoambiental baseadas em análise multicritério em ambiente SIG.

A descrição detalhada dos procedimentos metodológicos que geraram as cartas de vulnerabilidade / potencialidade dos serviços ecossistêmicos essenciais é apresentada dentro dos artigos finais.

2.3.4 Zoneamento Geoambiental

Podemos definir o zoneamento geoambiental como a análise sistemática de um território visando identificar zonas homogêneas de acordo com suas potencialidades e restrições, a partir da integração entre os parâmetros do meio físico e as ações antrópicas ali exercidas (ZACHARIAS, 2010).

Em suma, os zoneamentos ambientais são instrumentos de planejamento e gestão territorial voltados ao desenvolvimento sustentável, não significando apenas um instrumento corretivo, mas também ativo, que estimule o desenvolvimento territorial (BECKER E EGLER, 1996).

Assim, como ressalta o documento de direcionamento metodológico do Zoneamento Ecológico-Econômico do Ministério do Meio Ambiente (BECKER E EGLER, 1996), o Zoneamento é um instrumento técnico para o planejamento das diferenças, a partir de critérios de sustentabilidade, absorção de conflitos e de temporalidade. Tais condições atribuem a este documento um caráter dinâmico que deve ser regularmente atualizado e revisado de acordo com os novos padrões de desenvolvimento local.

O Zoneamento Geoambiental voltado ao desenvolvimento regional sustentável do município de Brotas, proposto nesta tese, é baseado nas considerações teóricas propostas por Groot *et al.*, (2010) que discutem as dificuldades ainda existentes em integrar os serviços ecossistêmicos nos planejamentos territoriais / ambientais.

Em um panorama geral, Groot *et al.*, (2010) indicam que a grande maioria dos ecossistemas terrestres foi convertido em algum outro tipo de cobertura do solo e as formas com que esses ecossistemas são gerenciados influencia diretamente na capacidade das paisagens em promoverem serviços ecossistêmicos essenciais ao bem-estar das comunidades.

Corroborando à esta temática, emerge o conceito de Serviços de Geossistema, uma proposição teórico-metodológica de Van Ree e Beukering (2016) que propõe analisar também os serviços ecossistêmicos prestados pela subsuperfície, ou seja, incluindo também a análise do subsolo de maneira holística e sistêmica, o escopo desta tese.

Neste sentido, é necessário utilizar instrumentos disponíveis para analisar a influência das atividades antrópicas sobre a disponibilidade dos serviços ecossistêmicos e dos serviços de geossistema, concentrando-se em serviços individuais, bem como no pacote completo de serviços de uma região. Assim, Groot *et al.*, (2010) indicam que as geotecnologias são poderosas ferramentas, já que as decisões de gestão territorial em geral se relacionam a questões de orientação espacial.

Para este estudo, foi proposto que o Zoneamento Geoambiental do município de Brotas parte de dois princípios metodológicos: A análise dos serviços ecossistêmicos considerados essenciais (águas subterrâneas, solos e ecoturismo) e a definição de áreas (zonas) homogêneas que representem o meio físico local e a dinâmica dos serviços ecossistêmicos prestados pela paisagem.

A análise dos serviços ecossistêmicos essenciais foi produzida com auxílio de técnicas de cartografia geoambiental e foi baseada na identificação da capacidade atual da paisagem em promover benefícios aos seres humanos, a partir da relação entre a dinâmica do meio físico local e a dinâmica de ocupação humana. Assim, estas análises identificaram as vulnerabilidades e aptidões do território em promover serviços ecossistêmicos essenciais.

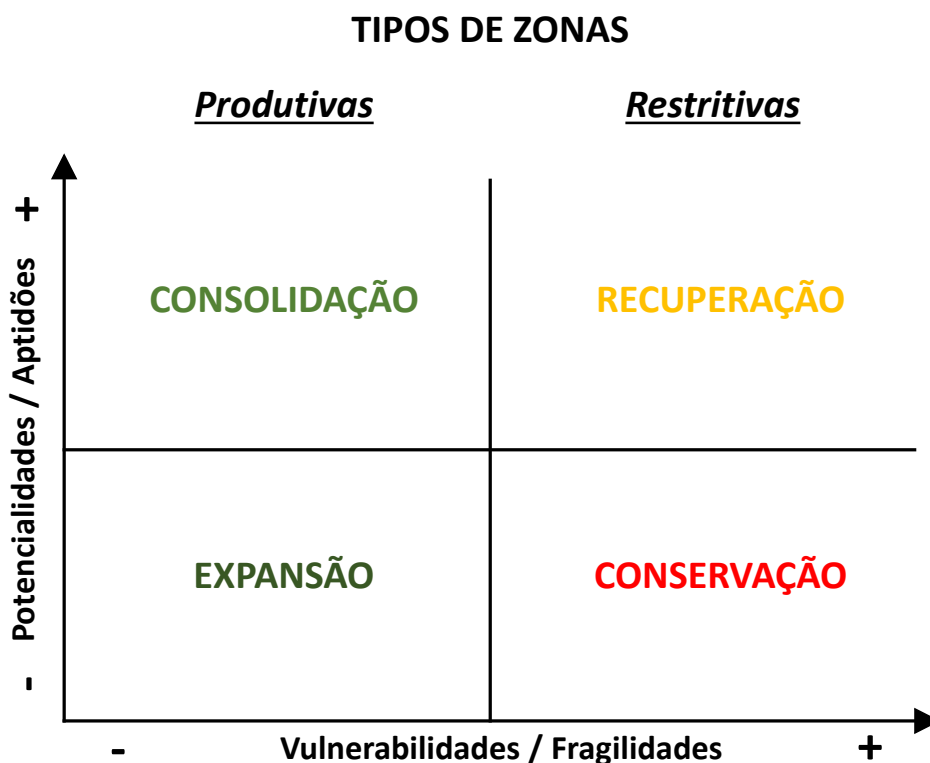
Para a definição das zonas homogêneas que compõe a estrutura do território foi realizada uma adaptação da proposta metodológica de (BECKER E EGLER, 1996), que consiste em analisar dois processos dinâmicos que interagem nos territórios: Os processos naturais e os processos sociais que correspondem aos objetivos políticos e econômicos locais.

Consideraram-se como diretrizes práticas das dinâmicas naturais e sociais os serviços ecossistêmicos essenciais diagnosticados, tendo em vista que são estes serviços que deveriam nortear os processos de planejamento territorial no município de Brotas.

A sistematização e operacionalização dos elementos analisados se deu com auxílio de técnicas de geoprocessamento, baseados na sobreposição de produtos cartográficos que apresentam como resultados, zonas homogêneas do território quanto suas vulnerabilidades e aptidões.

Para tal, os valores de vulnerabilidade / potencialidade de cada mapa de entrada foram padronizados e reclassificados para uma escala fuzzy. Tais dados reclassificados foram sobrepostos a partir da técnica de soma linear ponderada, onde foram definidas ponderações iguais (0,33 para cada), evitando assim a sobrevalorização de algum parâmetro. A interação resultante da relação entre as variáveis mapeadas identificou áreas produtivas ou restritivas, de acordo com a classificação gráfica demonstrada na Figura 2-7:

Figura 2-7 Método para definição de zonas homogêneas



Por fim, a partir das áreas resultantes do mapeamento final foram propostas medidas de ordenamento do território visando uma gestão mais eficiente e baseada em princípios de sustentabilidade, além de compatibilizar o desenvolvimento econômico / social com a manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais ao bem-estar humano.

A identificação e análise de zonas de expansão, consolidação, recuperação e conservação de acordo com as aptidões e restrições do território são os instrumentos norteadores do zoneamento geoambiental aqui proposto, servindo não só como medidas de organização e planejamento territorial, mas principalmente como instrumento de auxílio à tomada de decisão por parte dos gestores municipais, tendo em vista que a visualização cartográfica das áreas torna o planejamento menos dispendioso em termos financeiros e de tempo de aplicação.

CAPÍTULO 3 DIAGNÓSTICO GEOAMBIENTAL

DIAGNÓSTICO GEOAMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE BROTAS PARA IDENTIFICAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS ESSENCIAIS

Para o direcionamento dos serviços ecossistêmicos considerados nessa tese, foi aplicado o diagnóstico geoambiental do município de Brotas, a partir da metodologia DPSIR proposta por Kristensen (2004). Para tal, foram considerados indicadores sociais, econômicos e ambientais, bem como os resultados das interações entre atividades antrópicas (entre elas as políticas públicas) com o meio físico. A análise dos cinco elos do DPSIR para o município de Brotas é apresentada a seguir.

3.1 Forças Motrizes

A primeira análise consistiu em dados socioeconômicos disponibilizados pelo IBGE (2020) corroborada com dados de ocupação antrópica do território, a partir de dados geoespaciais produzidos e disponibilizados pelo projeto MAPBIOMAS. Esta análise identificou que o Produto Interno Bruto municipal ainda é voltado às atividades agropecuárias, em especial a cana-de-açúcar, café, laranja, silvicultura de eucaliptos, etc.; este fato é confirmado pelo mapeamento de uso do solo (MAPBIOMAS, 2019).

Ainda focado no território, foi realizada uma análise geoambiental, baseada nos trabalhos de Brotas (2018), Guerrero *et al.* (2018), Manzione, Soldera e Wendland (2017), que identificou a capacidade do território para a produção de serviços ecossistêmicos de acordo com o atual viés de desenvolvimento local. Levou-se em consideração características específicas como a presença de materiais geológicos favoráveis à presença de aquíferos, a vocação territorial para atividades agropecuárias (apesar de muitos solos arenosos); as belas paisagens que favorecem o

ecoturismo etc. Sendo assim, identificou-se que as características do meio físico locais são forças motrizes para a atual dinâmica socioambiental municipal.

Destaca-se como característica hidrogeológica essencial no local a presença de áreas de recarga do Aquífero Guarani, que vem sendo muito explorado para irrigação das lavouras e abastecimento humano no município.

Pesquisadores como Guerrero *et al.* (2018); Ronquim *et al.* (2018) indicam que a paisagem do município vem sofrendo alterações causadas pelo incentivo ao ecoturismo, tal como o aumento visível de áreas de vegetação natural. O incremento do ecoturismo na economia de Brotas é também demonstrado no inventário turístico municipal e pelo fato de que atualmente 25% da população economicamente ativa está empregada em atividades ecoturísticas (BROTAS, 2018), sem contar os empregos temporários e indiretos.

3.2 Pressões

As pressões sofridas pelo território remetem aos possíveis resultados que as forças motrizes exercem no local. No município de Brotas, é possível indicar como pressões mais relevantes: Contaminação de solo e água por atividades agropecuárias (REPÓRTERBRASIL, 2020); Erosão dos solos pelas características geoambientais locais (MORAES *et al.*, 2020); Degradação dos recursos naturais pela política pouco conservacionista e possível empobrecimento da população por consequência das pressões anteriores (MEA, 2005).

Desta forma, destacam-se algumas condições derivadas da importância da água para a economia que aumentam as pressões locais, tais como o encarecimento do tratamento da água potável e o encarecimento da produção agrícola diante da pior qualidade da água e do solo. Por outro lado, pode haver pressões positivas, tais como as ações de recuperação ambiental e incremento das receitas municipais propiciadas pelas ações de incentivo às atividades relacionadas a provisão do ecoturismo na cidade.

3.3 Estados

A interação entre as forças motrizes e as pressões é avaliada por meio dos estados situacionais dos serviços ecossistêmicos, representados por sua qualidade ambiental atual. O primeiro estado identificado foi o das águas e solos derivados das atividades agrícolas. O cultivo extensivo da cana-de-açúcar no município, além de outros cultivos agrícolas, vem acarretando diversos problemas para o local. O primeiro deles é a contaminação das águas e dos solos por agrotóxicos.

Um estudo produzido pelo instituto Por trás do Alimento (2018), com dados disponibilizados pelo Ministério da Saúde, indicou que entre os anos de 2014 e 2017 foram detectados 27 agrotóxicos

nas águas superficiais e subterrâneas que abastecem Brotas. Dentre esses, 11 são associados a doenças crônicas, tais como câncer, doenças congênitas e distúrbios endócrinos.

Quanto a contaminação dos solos e águas por esgoto, mesmo registrando um índice de 91% de esgotamento sanitário, a eficiência do tratamento é de apenas 61%, não sendo satisfatória para a sustentabilidade ambiental local (CBH/TIETÊ-JACARÉ, 2018; IBGE, 2018). É importante ressaltar, então, que a qualidade do solo e água é diretamente afetada por contaminações por esgoto doméstico e industrial, causando desequilíbrios ambientais graves para o município.

Os solos do município de Brotas ainda enfrentam problemas relacionados à erosão e movimentos gravitacionais. O estudo de Moraes *et al.*, (2020) demonstrou diversas ravinas, voçorocas e cicatrizes de deslizamento que indicam suscetibilidade local ou pontual no município, como resultado da interação entre os aspectos do meio físico e da ocupação humana no local. Trabalhos como os de Bueno e Stein (2004); Costa (2005); Michette (2015); Souza e Galvani (2017) também demonstraram áreas prejudicadas pelos processos erosivos tanto em Brotas como em toda bacia do Tietê-Jacaré.

Quanto aos estados positivos, ou seja, aqueles que trazem benefícios ao município, Brotas (2018), Guerrero *et al.* (2018) e Ribeiro e Amaral (2016) demonstram que há um alto potencial para implementação de atividades ecoturísticas e que os gestores municipais têm dado atenção ao tema. Nesse sentido, algumas medidas por parte do poder público também podem ser destacadas, como o incentivo à construção de infraestruturas e atração de parcerias público privadas que aumentam a visibilidade da atividade na cidade.

3.4 Impactos

Os impactos resultantes de todos os elos anteriormente descritos, são apresentados na perspectiva dos ecossistemas e dos serviços que as paisagens prestam.

- Serviços de regulação e de provisão de água superficial e subterrânea são afetados diretamente e indiretamente pelo uso desenfreado de agrotóxicos sem a devida regulação ou fiscalização;
- Solos apresentam perda de serviços ecossistêmicos relacionados à capacidade de manutenção de terras potencialmente agricultáveis, formação e regeneração, habitat para diversas espécies, prevenção a erosão e contenção de solos, dentre outros, fatores estes que são indispensáveis para o bem-estar do ecossistema local;
- A atual dinâmica geoambiental e de ocupação da área, por outro lado, incentiva impactos positivos, como o aumento da provisão de serviços ecossistêmicos recreacionais, ou seja, àqueles relacionados com atividades ecoturísticas, à recreação em geral, aos aspectos de

pertencimento e identidade cultural, estética e apreciação paisagística e oportunidades de educação e ciência.

3.5 Identificação dos Serviços Ecossistêmicos Essenciais

A partir da análise geoecológica sobre todos os elos que compõe o modelo DPSIR, foi possível diagnosticar que os mais importantes tipos de serviços ecossistêmicos para o atual viés de desenvolvimento socioeconômico do município de Brotas são aqueles relacionados às **águas subterrâneas, solos** e **ecoturismo**. Portanto, estes são os três fatores que nortearão o zoneamento geoambiental proposto neste trabalho.

CAPÍTULO 4 ÁGUA SUBTERRÂNEA

Artigo publicado na revista *Sustainability* (<https://www.mdpi.com/journal/sustainability>). Para citar, verificar a versão publicada em <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10345>

IDENTIFYING PRIORITY CONSERVATION ZONES FOR THE SUSTAINABILITY OF GROUNDWATER ECOSYSTEM SERVICES IN AN AREA OF THE GUARANI AQUIFER, BRAZIL

Abstract

Free aquifers have become good water options for underdeveloped and developing countries due to resource quality and relatively low extraction prices. However, overexploitation and lack of territorial planning in these locations endanger groundwater availability and quality. In this context, this study aimed to apply the DRASTIC and PESTICIDE DRASTIC models in an area of the Guarani Aquifer, Brazil, to analyze vulnerability to groundwater contamination. The resultant areas of this model application help to identify priority conservation areas within the context of ecosystem services that groundwater provides to local inhabitants. To this end, we obtained, treated and analyzed seven different hydrogeological data in order to help understand the environmental dynamics of the site and to identify which areas are most vulnerable to aquifer pollution. The results showed that the Guarani aquifer recharge areas are the most naturally vulnerable to contamination due to their hydrological characteristics and correspond to more than 70% of the study area, reinforcing the need for sustainable land use planning techniques to minimize the risk of degradation of local water resources. We expect that the results obtained here can serve as a basis for public action strategies in the territorial management of the Guarani aquifer.

Keywords: Groundwater Research; Ecosystem Services; Planning; GIS; Guarani Aquifer.

4.1 Introduction

Critical reflection about the importance of ecosystem services provided by water resources for human well-being is currently growing, primarily by the concern about the natural resource deterioration and the relationship between human actions and the quality and availability of drinking water (MEA, 2005). These factors get more evidence by the fact that 40% of the world's population, mainly associated with peripheral economies, does not have access to water resources with appropriate quality (BOUABID and LOUIS, 2015).

Because of the lack of superficial water quality and low technological advancement, underdeveloped and developing countries are looking for alternatives to find groundwater with low-cost and the resource with quality and quantity to assure human and agricultural demands (BAALLOUSHA, 2011).

Groundwater represents about 97% of the world's potable freshwater reserves, supplying 1.5 billion people in urban areas and a large part of the rural population, making it the main source of human supply. Although aquifers are the largest reservoir of freshwater globally, their distribution is quite uneven throughout the planet, since for some areas, this resource is abundant, and in others, there is a total scarcity (HIRATA and FERNANDES, 2008).

Brazil is one country largely benefited by the presence of large aquifers since it has large reserves with high natural quality (HIRATA and SUHOGUSOFF, 2019). One of the main Brazilian reservoirs is the Guarani Aquifer System (SAG, for the Portuguese abbreviation), comprehending a Triassic-Jurassic age sequence of layers essentially composed by sands, whose deposition occurred in continental, fluvial, lagoon, and eolic environments, under a large layer of basalt dating from the Cretaceous.

The SAG occupies an area of approximately 1.087000 km² over the sedimentary basin of Paraná in South America. It has an accumulated volume of 37,000 km³ and has transboundary character, as it covers Brazil's territories, Argentina, Paraguay, and Uruguay (GUERRERO *et al.*, 2017).

In the Brazilian territory, Guarani Aquifer occurs in eight states, representing a base for essential services such as human supply, industry, and agriculture (PUGA *et al.*, 2015). As an example of its importance, we can mention that in the state of São Paulo (the richest and most industrialized in the country) 70% of the water used comes from the SAG, which raises concerns about the pressures that urban, industrial, and mainly agricultural activities can cause in their provided ecosystem services.

Despite that most parts of SAG still have their natural quality preserved, recent studies, such as those of Ferrari et al. (2019), already indicate the contamination of the SAG in intensive agriculture and urbanization areas.

The high anthropization degree levels of SAG areas in the state of São Paulo, combined with indications of contamination, generates reflections on the need for studies based on scientific methods and techniques that help in the decision-making by public managers.

In the current scenario, which corresponds to an increasing degradation of the quality of the Guarani aquifer and the lack of conservation guidelines in the legal strategies of territorial planning of the Brazilian municipalities, it is necessary that public managers set up strategies to organize and minimize the anthropic activities taking into account the potentials and fragilities of this landscape regarding groundwater contamination and pollution.

Research about the intrinsic vulnerability of groundwater resources to pollution and their provided ecosystem services is an effective tool to control their quality degradation and contribute to their protection (AUGUSTSSON *et al.*, 2020). With this kind of study, it is possible to characterize the vulnerability of an aquifer as the intrinsic susceptibility of the aquifer to the adverse impact of a contaminant load of anthropogenic origin, assisting public managers in decision-making in environmental planning (HIRATA E FERNANDES, 2008).

Even having knowledge of a large number of academic contributions regarding groundwater contamination (AUGUSTSSON *et al.*, 2020), it is still a challenge to insert the perspective of ecosystem services in territorial planning and management (GROOT *et al.*, 2010). The insertion of this perspective tends to favor processes of interaction between economic development and the conservation of natural resources, attributing a sustainability character to the plans and procedures of territorial planning (GROOT *et al.*, 2010)

The general goal of this study was to assist the decision-making process of public managers in the Guarani aquifer areas by applying an environmental mapping method to identify vulnerability to groundwater contamination and consequently, loss of essential ecosystem services. The groundwater contamination chart is an instrument capable of identifying priority conservation areas where the essential ecosystem services provided by this resource are at risk, directing the most effective planning and land management actions for each studied environment.

In recent years, several studies have been dedicated to mapping vulnerability to contamination such as Gharaibeh et al. (2019), Kumar et al. (2019), Pedretti et al. (2019), Parizi et al. (2019), Mfonka et al. (2018) and Teixeira et al., (2015) among others.

It is also noteworthy that the concern to consider the vulnerability of groundwater ecosystem services has been growing, as recommended by the united nations and reflected in the studies of

Bouchet et al. (2019), Hérivaux & Grémont (2019), Grizzetti et al. (2016), and Kløve et al. (2011). These studies prove the feasibility and importance of inserting the perspective of services provided by ecosystems in environmental modeling aimed at territorial planning, helping in the sustainable development of geographic spaces around the world.

Faced with so many methodological possibilities, one stands out for its wide acceptance in academia: the DRASTIC / PESTICIDE DRASTIC. This methodology, proposed by Aller et al. (1987) analyzes multiple hydrogeological parameters to identify natural vulnerability to contamination, supported by geographic information systems. The effectiveness of the DRASTIC methodology for studies on this subject is evidenced by its extensive use, as for example in Freitas et al. (2019), Kadkhodaie et al. (2019), Hasan et al. (2019), Hamamin & Nadiri (2018).

In the context presented above, we applied a variation of the DRASTIC / PESTICIDE DRASTIC methodology, called DRASTIC-LU (ALAM *ET AL.*, 2014), to identify areas where groundwater ecosystem services are most threatened by the relationship between the geoenvironmental structure and human activities.

The study area is the municipality of Brotas, Brazil. The relevance of this study is that 100% of the Brotas municipality is located on the Guarani aquifer System Zone, one of the largest groundwater reservoirs in the world. In addition, according to CETESB (2006), 85% of the Brotas' territory represents outcrop areas of this aquifer, which further suggests the need for conservation in order to ensure the provided ecosystem services.

We expect that the results can contribute to the decision-making process at a local scale, by spatially demonstrating the most vulnerable areas, making the planning and management processes more efficient, an essential factor for developing countries.

4.2 Study Area

The Guarani Aquifer System (SAG) is the largest underground freshwater spring in the world, with an extension of 1.2 million km² and an estimated cumulative volume of 37,000 km³. As shown in figure 1.1, its occurrence cross-borders since it covers the territories of Brazil, Argentina, Paraguay, and Uruguay (CETESB, 2018)

Inserted in a complex structural geological context, the Guarani aquifer system is defined as a set of Mesozoic sedimentary rocks continental regions located geographically in the Paraná and Chacoparanaense basins (MMA, 2010).

The hydrogeological composition of its structure is essentially shaped by a sequence of sandy layers of the Piramboia formation of Triassic age and Botucatu Formation of Jurassic age (SINDICO, HIRATA E MANGANELLI, 2018)

The sandstones of the Botucatu Formation are noteworthy for the existence of large quantities of groundwater since they are of wind origin, which makes them have greater water capacity than the sandstones of the Pirambóia Formation, originated from flue-lake and wind, which causes them to have a greater amount of clay and decreases their hydraulic efficiency (RABELO, 2006; SINDICO, HIRATA and MANGANELLI, 2018)

In addition to the sandstones mentioned above, the SAG also contains rocks from the Cretaceous Period, called the Serra Geral Formation (MEZZALIRA, 1981). This formation, composed of basaltic spills located above the sandy layers gives the aquifer a certain degree of confinement and protection in 80% of its total area.

The last 20% of the total area of the SAG represents areas where the aquifer outcrops, being areas of direct recharge where the vulnerability to contamination is greater (CETESB, 2018). Only in the state of São Paulo the outcrop areas occupy about 16,000 km² located in the peripheral depression (figure 1.2), which demonstrates the importance of the system for this territory (CETESB, 2018)

Brotas, the study area of this project, is a Brazilian municipality located in the central region of São Paulo State, southeast Brazil (Fig 1.3), and the distance to São Paulo city is about 250 km. In the context of groundwater, the municipality is completely inside the SAG, and 85% of its territory corresponds to this outcrop.

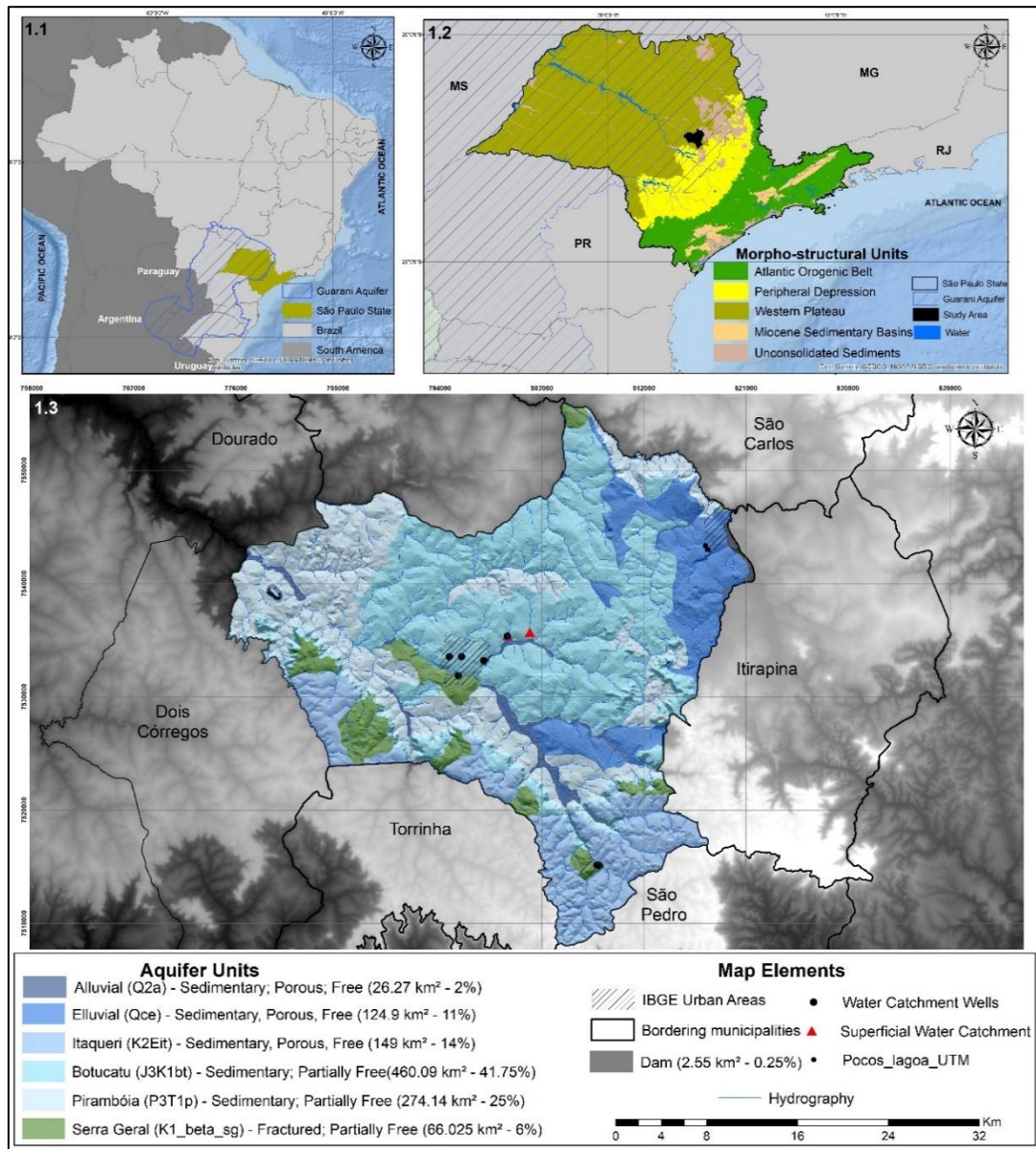
According to the Geomorphological Map of the State of São Paulo (ROSS E GOUVEIA, 2011), and as a reflection of the Sedimentary Basin of Paraná, the study area is located in the morphosculptural units of the São Paulo's Western Plateau and Unconsolidated Sediments (Fig. 1.2).

Studies of the Geological Institute of the State of São Paulo identified six rock units in the study area (IG/SMA, 2014), with predominance of the Botucatu and Pirambóia formations (SAG formers). The characterization of these units is in table 1:

Table 4-1 - Rock Units description

Rock Unit	Description
Botucatu Formation	Formed predominantly by fine to coarse-grained sandstones, with rounded characteristics and with great sphericity and reddish and matte coloration. Refers to past sub-environments of a large climate desert of increasing aridity
Pirambóia Formation	It consists of sediments of wind and fluvium-wind formation that were deposited in areas of desert environment, corresponding to the evolution of a field of wind dunes. Characterized by thick reddish, yellowish, and whitish sandstones, with fine to medium
Serra Geral Formation	Set of basaltic spills, including sandstones of the Botucatu Formation, forming the so-called Serra Geral Basin.
Itaqueri Formation	Sandstones and conglomerates that present silicification and stratification essentially form it. It comprises rudaceous deposits from alluvial fans located geographically in the Itaqueri, Cuscuzeiro, São Carlos, and São Pedro mountains, thus comprising the southern region of the municipality of Brotas.
Alluvial deposits	Alluvial deposits derive from the weathering of rocks near them, and thus are formed primarily by transported and deposited sandy sediments, and are located in plains allocated in the valley bottoms and surrounding areas.
Eluvial deposits	Eluvial deposits are considered chaotic and poorly selected sediments ranging from blocks and fragments to clays. Such deposits are the result of mechanical breakdown of rocks and slopes; The transport and deposition of this eroded material occur by the action of gravity or flow current.

Figure 4-1 Study Area Location



4.3 Materials and Method

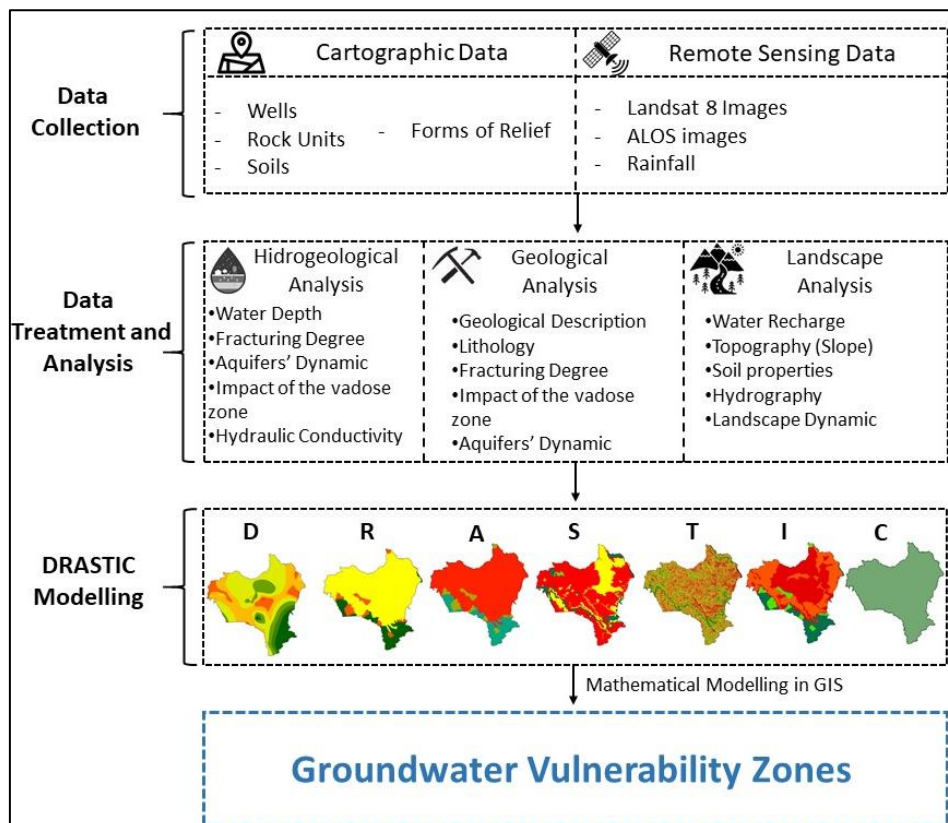
The Environmental Protection Agency of the United States developed the DRASTIC and PESTICIDE-DRASTIC models. Consists of a methodology that allows systematic assessment of vulnerability to groundwater contamination from two main structures: mapping of hydrogeological parameters and overlapping of the proposed classification system (ALLER *et al.*, 1987).

The main difference between the models is that the attribution of parameter weights to Pesticide DRASTIC highlights the possible interactions of hydrogeological dynamics in the presence of pesticides. At the same time, DRASTIC evaluates hydrogeological dynamics under regular conditions. Taking into account that the study area is essentially rural and that, consequently, the greatest risk vectors to the aquifer come from agricultural uses, we used the PESTICIDE DRASTIC model since it best represents the local landscape structure.

However, in order to analyze in an integrated way the relationship between natural vulnerability to contamination and anthropic activities, we applied a variation of the Pesticide DRASTIC model, called PESTICIDE DRASTIC-LU. Alam et al. (2014) first proposed these modifications, seeking to combine hydrogeological parameters with land use to understand in an integrated manner the complexity of vulnerability to contamination.

The application of the PESTICIDE DRASTIC-LU methodologie occurred based on three main procedures: Data collection, treatment of geographic information, and hydrogeological modeling in a GIS environment. Figure 4-2 illustrates the methodological procedures.

Figure 4-2 Workflow that presents the mehod for groundwater acosystem services vulnerability assesment



4.3.1 Data Collection and Treatment of geographic information

As DRASTIC-LU / PESTICIDE DRASTIC-LU are hydrogeological models systematized in GIS, we acquired and treated several geolocalized information. After acquisition and characterization, we prepared the data for their insertion in the hydrogeological model in GIS. This preparation consisted of assigning values to the attributes of each data used and assigning index values to each parameter.

4.3.1.1 Parameters' Characterization

The parameters' characterization presents the description of the parameters we used, the sources of data collection, and the way they were reclassified in order to insert them in the GIS model.

- **Depth to water (D):** The Depth to water parameter determines the level of the water table, which is of great importance because it demonstrates the depth of the material through which a pesticide or pollutant has to cross until finding the groundwater (ALAM *et al.*, 2014). We produced this parameter from data from Deep Wells, made available by SIAGAS- (CPRM, 2019), by interpolating the static level information, thus generating an estimate of water depth for the entire study area.
- **Net Recharge (R):** The Net Recharge refers to the amount of water that infiltrates the soil layers and reaches the aquifer. This infiltrated water is the main vehicle for transporting pollutants that degrade aquifer systems (HASAN *et al.*, 2019). The recharge values obtained for this work come from studies conducted in the Guarani aquifer, such as Rabelo (2006). We attributed the values according to the geological materials present in the area and reclassified from the values of the original DRASTIC methodology.
- **Aquifer Media (A):** Aquifer media evaluates the characteristics of the materials that constitute the aquifer, which present a greater capacity to attenuate or aggravate the contamination of groundwater (NESHAT and PRADHAN, 2017). We produced this information from the analysis of the geological map of the state of São Paulo (IG/SMA, 2014) and of the Deep Wells (CPRM, 2019).
- **Soil Media (S):** Soil media refers to the superficial layer that overlies the vadose zone and presents great biological activity. The surface soil has the ability to attenuate, accelerate, or aggravate the contamination of groundwater, depending on characteristics such as permeability and elements that constitute (sand, clay, and organic matter). In general, the protection capacity of the aquifer increases the extent to which there is the presence of clay material in the soil (KNOUZ *et al.*, 2018). We used the Pedological Map of the State of São Paulo (IAC, 1981) to analyze the soil characteristics mentioned.

- **Topography (T):** Topography is particularly important for the contamination of groundwater because it directly affects aspects of runoff and infiltration by indicating the dynamics of accumulation or dispersion of fluids along the slopes. Therefore, to analyze this parameter, we produced the slope chart using the ALOS-PALSAR Digital Elevation Model.
- **Impact of Vadose Zone Media (I):** The Impact of Vadose Zone Media represents the influence that the constituent materials of the region between the superficial soil and the water table infer in the contamination of the underground water resources. This information comes from the deep, well lithology analysis (CPRM, 2019).
- **Hydraulic Conductivity (C):** According to Aller et al. (1987), hydraulic conductivity is the capacity of the constituent materials of the aquifer to transmit underground water, controlled by a hydraulic gradient. Therefore, the higher the hydraulic conductivity of the material, the greater the vulnerability of the aquifer to contamination. The values of hydraulic conductivity for this work derives from the analysis of the constituent materials of the aquifer according to the literature review and values proposed in CPRM (2019) and Tanajura & Leite (2016).
- **Land Use (LU):** The groundwater quality of the study area has been deteriorating mainly by the uncontrolled use of pesticides in monocultures, especially sugar cane. Therefore, assessing the relationship between hydrogeological parameters and the pattern of land occupation is essential to indicate the most vulnerable areas to contamination. The land use data comes from the MapBiomass project (MAPBIOMAS, 2019). The assigned vulnerability values were adapted from the work of Alam et al. (2014), according to the Brazilian scenario.

4.3.1.2 Values assigned to Hydrogeological Parameters

In Table 4-2, we present the values assigned to each attribute of the eight parameters of the model, according to the PESTICIDE DRASTIC-LU methodology, adapted to the study area's characteristics, with the help of experts on the subject and extensive bibliographic review.

Table 4-2 - Values assigned to hydrogeological parameters

Value	Hydrogeological Parameters							
	D	R	A	S	T	I	C	LU
1	>30,5	Itaqueri	--	Red Nitisols Loamy Ultisols	>18	Confining Layer	<4,1	Natural formations, Water
2	22,9- 30,5	--	Serra Geral	Red Oxisols;	--	Basalt	--	Pasture
3	15,22-22,9	--	--	--	12-18	--	--	--
4	--	--	Itaqueri	Sandy Ultisols	--	--	--	--
5	9,1-15,2	--	--	--	6-12	--	--	--
6	--	--	--	--	--	--	--	Forestry

7	4,6-9,1	--	--	Red-Yellow Oxisols	--	--	--	Annual Crops
8	--	Serra Geral	--	Lithic Entisols	--	--	--	Sugar Cane
9	1,5-4,6	Pirambóia Botucatu Alluvium Colluvium	Alluvium Colluvium	Quartzipsamments Entisols Alfisols	2-6	Sand (1)	--	Urban
10	<1,5	--	Botucatu Pirambóia	--	<2	Sand (2)	--	Bare Soil

4.3.2 Parameters' Index Values

The parameter index is the value (weight) that we assigned to each of the seven input data for executing PESTICIDE DRASTIC-LU. Those values (Table 4-3) represents the relative importance between the analyzed parameters.

Table 4-3 Parameters' Index Values

	Parameters' Index Values							
	D	R	A	S	T	I	C	LU
PESTICIDE DRASTIC-LU	5	4	3	5	3	4	2	5

4.3.3 PESTICIDE DRASTIC-LU modeling in GIS

The original mandatory hydrogeological parameters for the application of PESTICIDE DRASTIC-LU are Depth to water (D), Net Recharge (R), Aquifer Media (A), Soil Media (S), Topography (T), Impact of Vadose Zone Media (I), Hydraulic Conductivity of the Aquifer (C) and Land Use (LU). The systematization of the model occurs from the following equation, proposed by Aller et al. (1987), and applied with the "raster calculator" tool in ArcGis 10.6:

$$Vulnerability = D(p) \times D(i) + R(p) \times R(i) + A(p) \times A(i) + S(p) \times S(i) + T(p) \times T(i) + I(p) \times I(i) + C(p) \times C(i) + LU(p) \times LU(i)$$

Where:

(p) = PESTICIDE DRASTIC-LU parameters weights values

(i) = Index Values for Parameter

The values resulting from the application of the PESTICIDE DRASTIC-LU model were classified into four classes of contamination vulnerability (ALAM et al., 2014), as shown in Table 4-4. We adapted the ranges of the original PESTICIDE DRASTIC-LU indices to make this method compatible with the reality of Brazilian landscapes.

Table 4-4 - Ranges of DRASTIC LU index

PDRASTIC LU INDEX	PDRASTIC LU VALUE	Color in the Map
Low	< 120	Green
Moderate	120 - 160	Yellow
High	160- 200	Brown
Very High	>200	Red

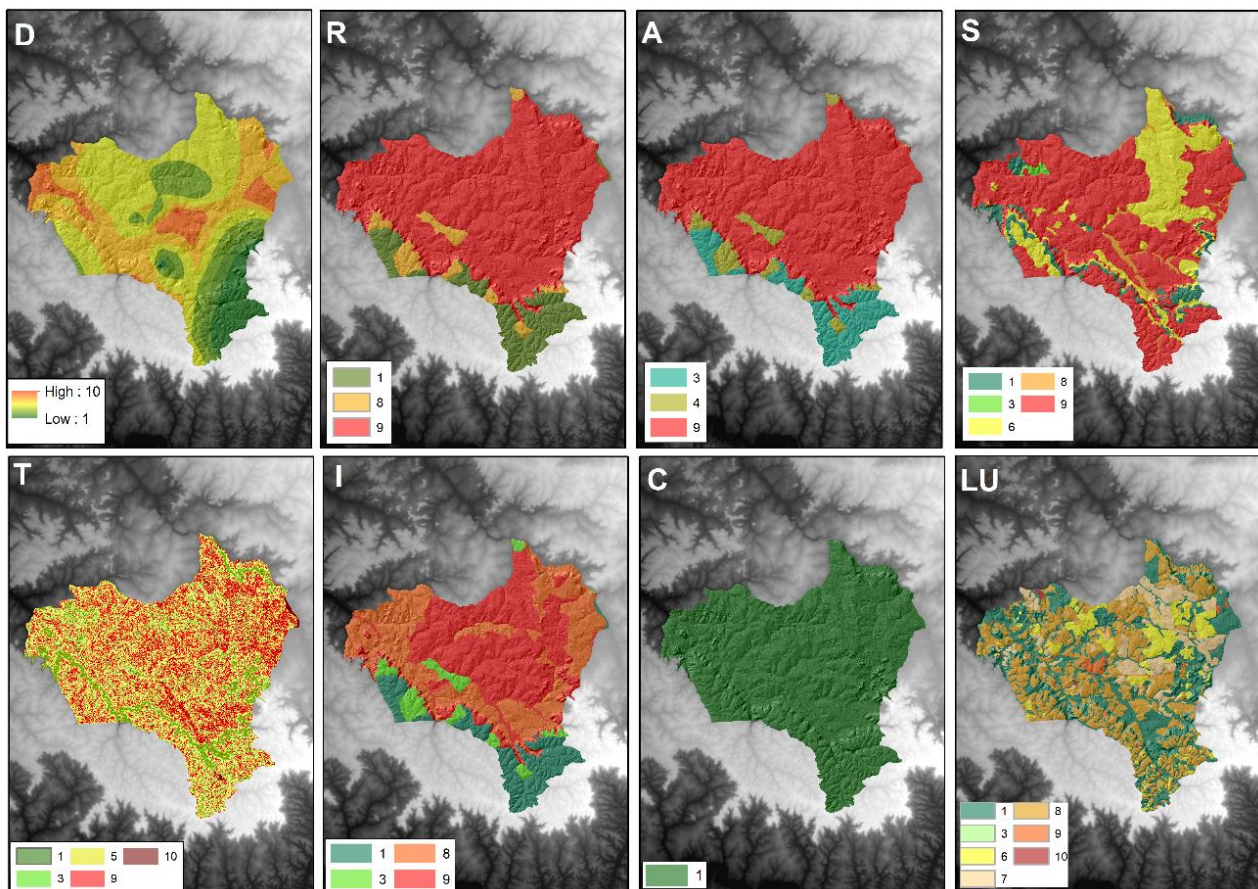
The resulting map of this application presents four zones of vulnerability. These zones spatially indicate priority areas for the conservation of groundwater ecosystem services in the municipality of Brotas.

4.4 Results and Discussion

4.4.1 Hydrogeological parameters

The first products we generated after applying the methodological model were the seven hydrogeological variables that are the input data for the execution of PESTICIDE DRASTIC-LU. Figure 4-3 shows the parameters already reclassified according to the values proposed by Aller et al. (1987) and Alam et al. (2014) for the municipality of Brotas, Brazil.

Figure 4-3 PESTICIDE DRASTIC-LU parameters



Notice that 67% of the territory contains the Botucatu and Pirambóia geological formations. These are the main structure of the Guarani aquifer and refer to sandstones formed in a desert environment (MANZIONE, SOLDERA and WENDLAND, 2017). Soils, as a reflection of geological processes, present favorable conditions for infiltration in more than 70% of the territory, with the main emphasis on Lithic Entisols, Quartzipsamments Entisols, and Sandy Ultisols.

Such geological/pedological constitution directly interferes with the dynamics of the aquifer media, soil media, impact on the vadose zone, and recharge, indicating that the aquifer can present high degrees of natural vulnerability (RABELO, 2006).

Another factor that increases local vulnerability concerns is topography since 41% of the study area represents flat areas (<6%), which favor infiltration into the system. On the other hand, 59% of the land has more steep slopes (between 6 and 100%), which are places with more runoff and less chance of contamination.

Land use is a significant anthropogenic intervention, which directly affects the stability of the landscape dynamics, including ecosystem services provided by groundwater (SAHA E ALAM, 2014). Brotas' land use reflects the Brazilian history of producing agricultural commodities, meeting the current pattern of appropriation of rural areas in the State of São Paulo with the vast production of sugar cane.

The current occupation demonstrates that the municipality has faced in the last decades an intense process of alterations, substituting natural formations of Cerrado for agricultural crops and pastures (GUERRERO, MOSCHINI, *ET AL.*, 2020).

According to Valadares, Alves e Galiza (2020), Brotas is part of a group of municipalities that registered a significant increase in the use of pesticides in the period from 2006 to 2017. Among these pesticides, 2,4D and Tebuconazole stand out due to the extensive use in the sugar and alcohol industry (REPÓRTERBRASIL, 2020), indicating the conflicting relationship between groundwater and land use.

The interaction between the hydrogeological parameters provided an assessment of the integrated vulnerability of ecosystem services provided by the groundwater of the Guarani Aquifer in the municipality of Brotas.

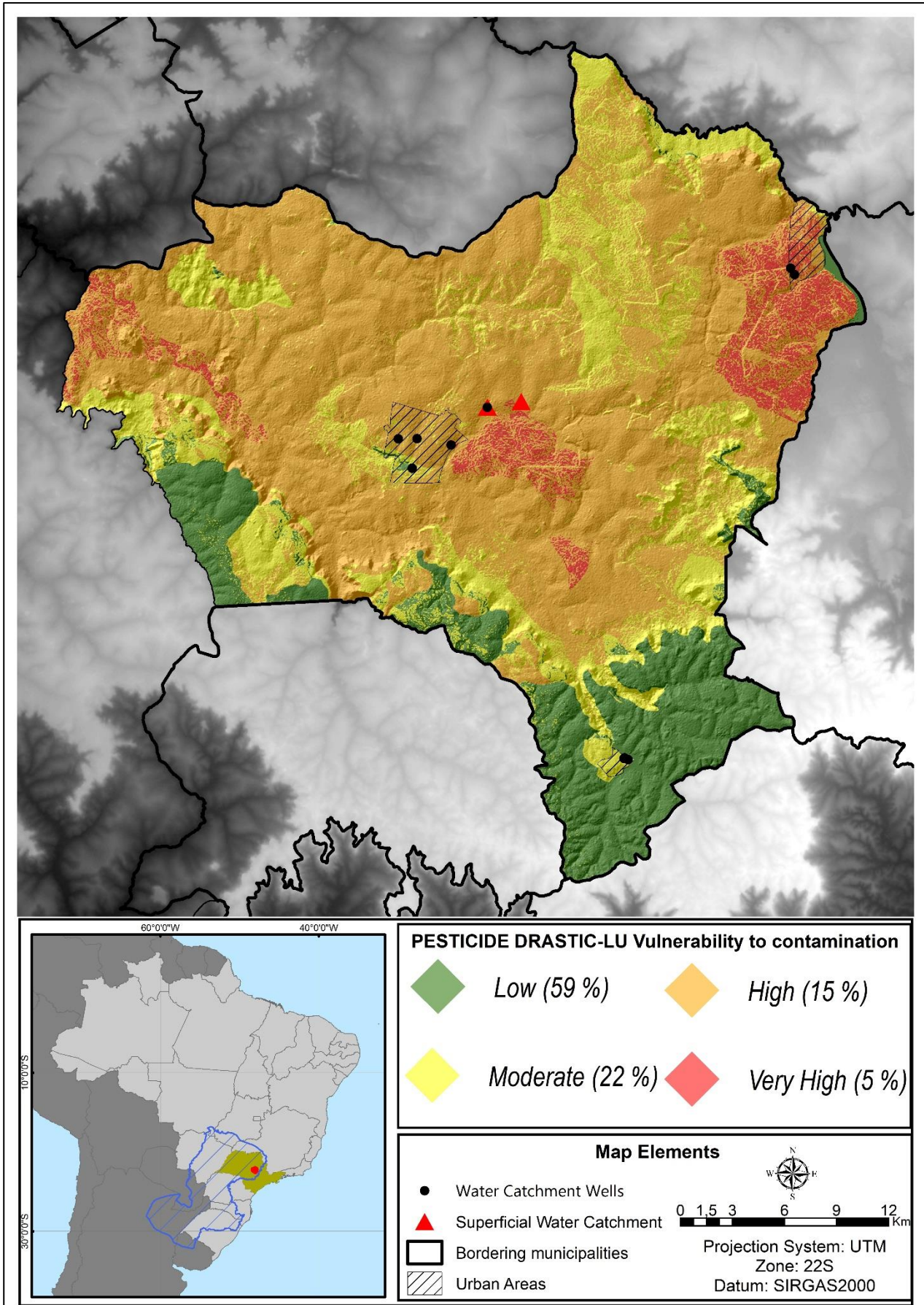
4.4.2 Groundwater vulnerability – PESTICIDE DRASTIC-LU model

The originally proposed DRASTIC methodology seeks to assess the natural vulnerability of territories to aquifer contamination. However, the great concern that exists in the Guarani aquifer with the relationship between groundwater and anthropic activities (mainly those of agricultural

origin) led us to apply the PESTICIDE DRASTIC -LU variation proposed by Alam et al. (2014), aiming at inserting the variable "Land Use" in the hydrogeological analysis.

The application of the Pesticide DRASTIC-LU resulted in a vulnerability to contamination map (Figure 4-4), which spatially demonstrate the areas that require the greatest attention of the public managers for more sustainable management, due to the essential ecosystem services that groundwater provides for human well-being.

Figure 4-4 DRASTIC and PESTICIDE DRASTIC charts



We consider that in the application of PESTICIDE-DRASTIC LU the contaminant behaves like a typical pesticide, which simulates highly mobile contaminants in the aquifer system in question. This approach is extremely valid in places such as Brotas, which is strictly agricultural in composition with large areas of monoculture covering the aquifer systems, which reliably corresponds to the territorial dynamics of the study area.

Data produced by (IBGE, 2018) indicate that the production of sugarcane in Brotas increased from 480,000 tons in 1994 to 2,640,000 tons in 2018, with an increase in the planted area of 550% in the same 24 years, demonstrating that more and more commodity agriculture is the driving force for changes in the local landscape.

Concern about the conflicting relationship between monocultures and aquifers is highlighted with the result of applying the PESTICIDE DRASTIC LU model. This chart demonstrated that 64% of the study area has a very high or high vulnerability to contamination to pesticides, which spatially demonstrates that the aquifer media, soil media, recharge, and impact of vadose zone parameters have a high correlation with the vulnerability index.

They are areas composed of sandy geological formations of the Botucatu and Pirambóia formations (which form the Guarani aquifer), which due to their structure and porosity imply a spatial dichotomy: a high infiltration capacity to recharge the aquifer at the same time as the improper uses corroborate directly to an increased vulnerability to contamination.

Corroborate these results, analyzes promoted by RepórterBrasil (2020) who, using Brazilian Ministry of Health data, diagnosed 27 pesticides in water and soil in the municipality of Brotas, most of them related to monocultures such as sugarcane.

The model also indicates that the topographic factor has a high relationship with the areas of greatest vulnerability since infiltration over the lower slopes exceeds runoff and contributes directly to the vulnerability of these areas. (CHANDOUL, BOUAZIZ e DHIA, 2015) in a South East Tunisia aquifer also obtained similar results. In addition to the fact that, in flatter terrains, there is a greater probability of implementation of mechanized monocultures, which contribute to the degradation of groundwater ecosystem services (MANZATTO *et al.*, 2009).

These highly vulnerable zones indicate that the relationships between internal and external geodynamics intervene negatively in aquifers, causing Ecodynamic instability. Thus, the local geoenvironmental structure is highly susceptible to anthropogenic changes promoted in the upper layers, lacking agricultural practices and/or territorial planning aimed at sustainable uses of the territory in order to promote the conservation of essential ecosystem services provided.

The sensitivity of hydrogeological materials due to their sandy characteristics also exposes the “high” and “very high” zones to various landscape risks of Geoenvironmental order, becoming a

challenge to the integration between economic development based on the production of agricultural commodities and the conservation of ecosystem services (PEIXOTO, 2010b).

Currently, land use in these most vulnerable areas shows a high degree of anthropization, mainly with sugarcane, annual crops (orange and coffee), forestry and pastures. We also observe areas of vegetation, in the floodplains of the largest rivers that cross these areas.

Given the impossibility of removing sugarcane crops from the study area, it is suggested that the planting approach be rethought, leading to proposals with more sustainable bias, as well as agroecological techniques or investments in agricultural technologies that reduce the need for pesticides in areas so sensitive to contamination.

We also emphasize that in areas of very high vulnerability the local government must restrict anthropic uses in order to protect the quality of the aquifer. Transforming these areas into integral conservation units, with the application of reforestation projects, is an alternative that can be efficient in reframing the landscape in favor of the conservation of ecosystem services promoted by the Guarani aquifer.

Areas diagnosed with moderate vulnerability represent 22% of the total, demonstrates areas of transition between hydrogeological stability regarding contamination of aquifers, and have a strong spatial correlation with the topographic thresholds, where the larger slopes increase the runoff and contribute to the protection against contamination. Moreover, in these areas, anthropogenic interventions are smaller, given that there is greater constructive complexity, making forests remain intact, where this set of factors also contributes to a slightly milder vulnerability.

The yellow color on the PESTICIDE DRASTIC-LU chart shows that these areas occupy the transition between the geological formations Itaqueri and Botucatu / Pirambóia as well as some sparse areas where there is a slightly steeper slope. These are areas where, despite the steeper slope, they are already better suited to certain types of anthropogenic use without major risks to groundwater contamination.

Despite representing a region with greater security for the aquifer, it is imperative that, due to the landscape structure, land use be regulated in order to limit uses with a high degree of degradation, preventing this class from changing to high vulnerability.

Finally, areas of low vulnerability occupy only 21% of the territory, indicating that the current landscape is under pressure due to the relationship between the natural dynamics of the physical environment and the anthropic activities of the municipality.

These areas are direct reflections of the hydrogeological parameters related to geology and soils, considering that the basaltic conditioners hinder the infiltration of pollutants ensuring a greater

degree of protection to aquifers. In addition, the chart demonstrated a significant relationship with the presence of preserved forests, reinforcing the need for territorial planning to include reforestation programs to maintain the ecological balance of the landscape.

In summary, these are stable areas where municipal managers can direct essential activities with a greater degrading action, such as heavy industries. Although we consider encouraging sustainable development as an essential factor for Brazilian landscapes, we cannot neglect the national history of producing agricultural and industrial commodities. Thus, it is essential that activities of greater degradation are implemented with a technical basis about the territory, so that they offer the least possible risk to ecosystem services provided by natural resources.

4.5 Conclusions

Assessment of vulnerability to groundwater contamination is an indispensable tool in land planning and management projects, even more so when it has a cartographic character since it allows identifying the most vulnerable areas spatially and that need greater attention of the public power.

Brotas, the study area of this article, is of special interest to strategic environmental planning because it is 100% inserted in the Guarani aquifer system, in addition to 85% of its territory representing recharge areas.

The study indicated four vulnerability zones for each model (DRASTIC-LU and PESTICIDE DRASTIC-LU). The analysis also demonstrated a strong relationship between the Guarani aquifer sandstones and the vulnerability to contamination. This factor is aggravated by the low presence of forests and the high spatial representativeness of agricultural crops in the study area.

The PESTICIDE DRASTIC-LU model proved to be an efficient alternative for the conservation of groundwater ecosystem services in areas where agricultural crops predominate in the landscape. When considering the dynamics of both pesticides and the local geoenvironmental structure, it was able to indicate that 64% of the study area has high or very high vulnerabilities, spatially determining that such areas are a priority for conservation.

Rethinking the ways of acting on the landscape taking into account the potentialities and restrictions of the territory is crucial for the environmental, social, and economic well-being of the Guarani aquifer areas, especially in the attributions of the managers, who must implement programs and techniques based on sustainable development to ensure the maintenance of groundwater ecosystem services.

Thus, we can conclude that the application of the DRASTIC-LU and PESTICIDE DRASTIC-LU models produces essential technical documents for public managers. From the final charts, it is possible to direct territorial planning actions based on technical and scientific advice, giving

managers an integrated information base composed of diagnoses and answers to the problems presented.

CAPÍTULO 5 ECOTURISMO

MAPPING POTENTIAL ZONES FOR ECOTOURISM ECOSYSTEM SERVICES AS A TOOL TO PROMOTE LANDSCAPE RESILIENCE AND DEVELOPMENT IN A BRAZILIAN MUNICIPALITY¹

Abstract: In recent decades, with the increasing global need for sustainable development, ecotourism has emerged as one of the most efficient activities that can be used to reconcile economic development with environmental conservation. A growing interest in the ecotourism and ecosystem services provided by landscapes makes such services increasingly necessary within municipal planning processes. This study aims to construct a geoenvironmental model based on Geographic Information Systems (GIS) to spatially identify areas with greater capacity to promote ecotourism, with a practical case study of the city of Brotas, Brazil. The model can produce integrated analyses of landscape components using geoenvironmental, topographic, and urban data. As a result, four zones were classed according to their ecotourism potential, with 81% of the overall local territory showing great potential, which not only reinforces the territory's resilience regarding sustainable development, but also demonstrates that ecotourism should be included in discussions related to environmental planning in Brotas, as well as in other municipalities that have ecotourism potential.

Keywords: landscape planning; GIS; ecotourism; ecosystem services; AHP; fuzzy inference; zoning

¹ Nota: Este capítulo (artigo) está no prelo para publicação no periódico *Sustainability* (<https://www.mdpi.com/journal/sustainability>) com previsão de publicação para Dezembro / 2020.

5.1 Introduction

Due to its spatial magnitude, the Brazilian territory has favorable conditions for the occurrence of tropical landscapes and ecologies (AB'SABER, 2012). However, disorderly population growth and economic development based on agriculture and industrialization in the last five decades have caused large-scale changes in ecosystems and the services they provide (MEA, 2005).

Ecosystem services (ES) are understood to provide a wide range of benefits from terrestrial ecosystems, which are of fundamental importance for human well-being, subsistence, health, development, and survival, making them a crucial subject for study and analysis (COSTANZA *ET AL.*, 1997, 2014; MEA, 2005).

Despite the increasing interest in ES (ENGLUND, BERNDES E CEDERBERG, 2017; PARRON *ET AL.*, 2019), there has been a significant reduction in the quantity and quality of ES on a global scale (BAVEYE, BAVEYE E GOWDY, 2016; BUTCHART *ET AL.*, 2010; HASAN *ET AL.*, 2020).

The greatest impacts on ES in nature come from land use changes made by humans without rational planning (HASAN *ET AL.*, 2020), which in Brazil essentially refers to the conversion of natural systems into agricultural areas (GARRETT *ET AL.*, 2018; OLIVEIRA *ET AL.*, 2017; SCHIELEIN E BÖRNER, 2018). These changes are continuously producing landscapes that are less resilient to anthropic interventions, increasing the natural and anthropogenic risks and directly affecting quality of life (MARCHESE *ET AL.*, 2018).

Landscape resilience can be defined as the ability of an environment to withstand disturbances and reorganize itself while being subject to forces of change, ultimately maintaining its essential functions, structure, identity, and mechanisms (WALKER *ET AL.*, 2004). Thus, resilience is a subject that is increasing in significance in geographic studies (CUMMING, OLSSON E HOLLING, 2013), since it provides the theoretical basis for new ways of defining degraded landscapes through the development and implementation of territorial planning instruments.

As such, the systematic and methodological integration of the fundamental concepts of ecosystem services and landscape resilience can provide important tools for socioenvironmental analysis, which can directly contribute to the adaptation of sustainable practices to specific territories, especially those that are excessively anthropized (BARAL, 2014; CHOI *ET AL.*, 2017; SGROI, 2020).

The analysis of ecotourism and ecosystem services as agents promoting land sustainability has contributed to the advancement of the topic of territory resilience. This is because ecotourism is considered an activity that balances economic development, natural resource conservation, and the institutional valorization of local communities (BRASIL, 2010; FONSECA, MELO E CARVALHO, 2018; MONDINO E BEERY, 2019; SALEMI *ET AL.*, 2019).

Considering that territorial management is typically related to spatial decisions, it is crucial to cartographically or spatially demonstrate how we can change the current landscape to improve ecosystem services (GROOT, R. S. DE ET AL., 2010). Thus, tools used to analyze landscape components, such as geographic information systems (GIS), have gained greater recognition for this type of research.

The application of cartographic techniques and GIS analysis to ecotourism planning is relatively recent, with an exponential increase in publications since 2015. The main focuses have included the analysis and identification of suitable areas for ecotourism, as presented by Çetinkaya et al. (ÇETINKAYA ET AL., 2018) and Aliani et al (ALIANI ET AL., 2017); the effects of land use changes in relation to public policies, as discussed by Kertezs et al. (KERTÉSZ, NAGY E BALÁZS, 2019); the effects of CO₂ emissions, as discussed by Paramati et al. (PARAMATI, ALAM E CHEN, 2016); and ES in watersheds, as discussed by Paudyal (PAUDYAL ET AL., 2019).

As examples of the effectiveness of GIS, several papers have used this technique to analyze aspects of ecotourism and land planning, such as Gigovic et al. (GIGOVIĆ ET AL., 2016), who used a multicriteria model to identify appropriate areas for the development of ecotourism in Serbia in order to reduce the negative impacts caused by mass tourism. Jeong et al. (JEONG ET AL., 2014) developed an operational GIS model to support ecotourism planning in Spain, while Bunruamkaew and Murayama (BUNRUAMKAEW E MURAYAMA, 2011) used GIS and the analytic hierarchy process (AHP) to assess favorable areas for sustainable tourism in Thailand.

GIS approaches with the application of geoenvironmental data (internal structure, topography, and land use data) have been of particular interest for ecotourism and decision-making processes. As examples of these applications, Çetinkaya et al. (ÇETINKAYA ET AL., 2018) and Gigovic et al. (GIGOVIĆ ET AL., 2016) used the internal composition of the landscape as an essential parameter in their analyses, while Suriale et al. (STURIALE ET AL., 2020) and Sahani (SAHANI, 2019) applied topographic and geoenvironmental remote sensing data in their AHP models. In addition, studies by Nahuelhal et al. (NAHUELHUAL ET AL., 2013) and Thompson and Friess (THOMPSON E FRIESS, 2019) using geoenvironmental data from the perspective of ecotourism ecosystem services are also highlighted.

Few papers have dealt with the introduction of tourism and ecosystem services in the Brazilian environmental planning process, partly because the lack of researchers and managers involved in the subject still poses a challenge (GROOT, R. S. DE ET AL., 2010). According to Bocco et al. (BOCCO, MENDOZA E VELAZQUEZ, 2001), the lack of adequate environmental planning is an imminent risk to developing countries, which are usually under severe environmental and demographic strain. In addition, as proposed by Kosmus et al. (KOSMUS, RENNER E ULLRICH, 2012), the inclusion of an ecosystem services perspective in the planning processes is essential, because it clearly

demonstrates the importance of the conservation of natural resources for local economic development, which is an important part of sustainable development.

Regarding Brazilian ecotourism, the situation is the same as outlined above. The lack or inefficiency of territorial planning means that there is no integrated development in relation to ecotourism activities. The current Brazilian strategy consists of stimulating private ecotourism, which covers significant areas of interest but neglects the rest of the territory, creating only specific points of development (CRUZ, 2005).

Thus, it is of vital importance to give scientific support and to encourage policy makers (through municipalities) to be protagonists of the ecotourism process, promoting its implementation at the municipal scale. Based on these assumptions, this study applies a geoenvironmental model using GIS capabilities to evaluate the landscape current capacity to provide ecosystem services for ecotourism in a Brazilian municipality, i.e., identify the best places where locals and tourists can obtain ecosystem benefits regarding a sustainable touristic exploitation of the territory.

The research is applied to Brotas, a municipality in southeastern Brazil, characterized by its considerable potential to promote ecotourism ecosystem services, such as waterfalls, viewpoints, canoeing, and zip lines, among others.

However, such potential for ecotourism faces conflicts with the current configuration of land use, which, being primarily dedicated to intensive agriculture and pastures and without proper planning has caused degradation processes such as contamination by pesticides (REPÓRTERBRASIL, 2020), deforestation, and soil erosion (MORAES *ET AL.*, 2020).

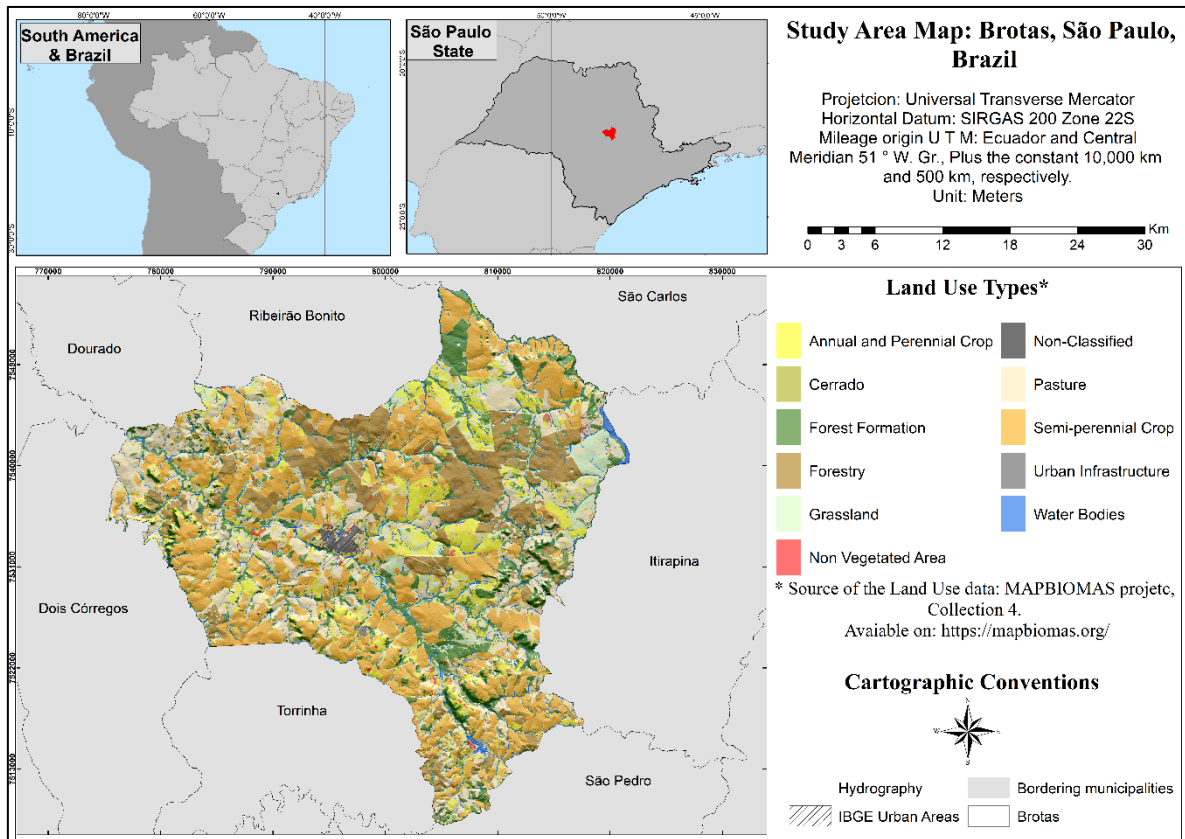
The results obtained here are intended as a framework guide for sustainable territorial management, cartographically demonstrating the local potential of EES to encourage an efficient and resilient use of the landscape as well as to promote sustainable development on a local scale.

5.2 Materials and Methods

5.2.1 Study Area: Brotas, São Paulo State, Brazil

The study area comprises the municipality of Brotas, located in the central region of the state of São Paulo, southeastern Brazil (Figure 1). It was chosen due to its richness of landscape elements that are extremely favorable for the promotion of ecosystem services linked to ecotourism.

Figure 5-1 Study Area with Land Use types.



Geomorphologically, low dissected plateaus, hills, and degraded escarpments predominate in the study area (MORAES *ET AL.*, 2020), which are a direct reflection of the modeling history of local lithology, mainly composed of sandstones of Botucatu and Pirambóia formations and sandy-conglomeratic deposits of Itaqueri formation (MEZZALIRA, 1981).

In this relief-geology relationship, it is worth noting that, in many areas in the municipality, the contact between Botucatu and Pirambóia formations with great topographic steps corresponds to several waterfalls and attractive sights (BROTAS, 2018; GUERRERO *ET AL.*, 2018; PEIXOTO, 2010a).

According to (SALIS, 1990) the climate in Brotas corresponds to the characteristics of the CWA climate, which is described, according to the Koppen climate classification, as humid summer subtropical and dry winter, being the predominant climatic type in the central, eastern and western regions of São Paulo State (EMBRAPA, 2016).

In relation to local ecotourism, Brotas is nationally known for being one of the preferred destinations when it comes to adventure tourism and landscape contemplation in Brazil (MARTINS E MADUREIRA, 2019; PEREIRA E GONÇALVES, 2004). Its main attractions are waterfalls, water sports (rafting, canoeing), high vantage points, rural tourism, zip lines, among others, which already correspond to a significant percentage of the municipality income.

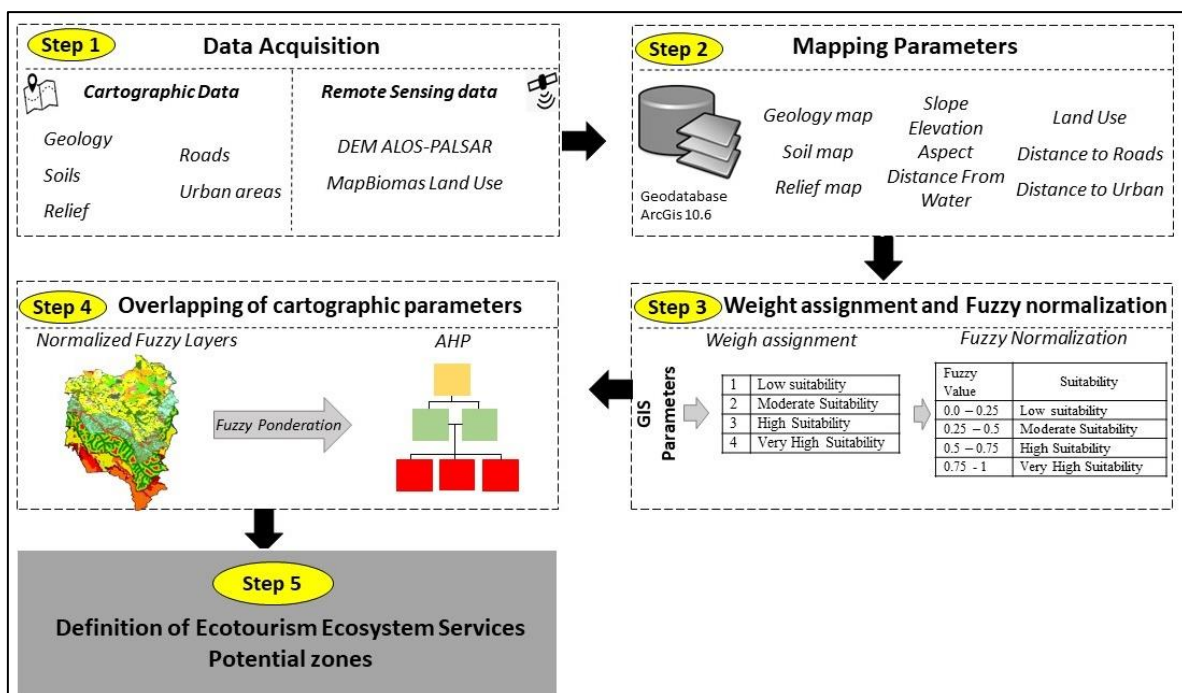
5.2.2 Methodological Framework

The structure of this work aims to identify, applying geospatial data modeling, homogeneous zones in terms of landscape capacity to promote suitable sites for the development of ecotourism activities, i.e., areas where ecosystem services for leisure and recreation are promoted, contributing to landscape resilience and sustainable development.

For this, we applied a five-step geoenvironmental model: Data acquisition; Mapping parameters; Weight assignment and Parameters normalization; Cartographic parameters overlapping; and Definition and analysis of the ES's potential zones.

Figure 5-2 demonstrates the methodological procedures.

Figure 5-2 A workflow that demonstrates the methodological structure of the study



5.2.2.1 Step 1: Data Acquisition

The first step was the acquisition of spatial data in three different groups: geoenvironmental, topographic, and socioeconomic. The used data reflects the landscape structural organization according to its importance for ecotourism activity implementation, as proposed by (GIGOVIĆ ET AL., 2016), adapted to Brazilian context.

Geoenvironmental data represent the local physical environment i.e. the landscape structure regarding geological, pedological, and geomorphological processes.

The topographic data aimed to evaluate the terrain relief from altimetry records, demonstrated in georeferenced lines and columns, where each pixel of the image has an elevation value (VALERIANO, 2008).

Finally, socioeconomic data exposed the most relevant human actions regarding the territory ecotourism potential, such as highways and urbanization.

Table 5-1 presents the data used, sources, year of production, and approximate cartographic scale.

Table 5-1 Data used in the study.

Group	Data	Source	Year	Scale
Geoenvironmental	Geology	IG/SMA	2014	1:75000
	Soils	IAC	1981	1:50000
	Geodiversity	CPRM	2015	Descriptive data
	Relief	CPRM	2020	1:100000
Topographic	ALOS/PALSAR DEM	JAX	2011	12.5m pixel
	Urban areas	CPRM	2020	1:50000
Socioeconomic	Land Use	MapBiomias	2018	1:50000
	Roads / Railways	BIT/IM	2018	1:50000
	Tourist attractions	BROTAS	2018	1:50000

5.2.2.2 Step 2: Mapping Parameters and Cartographic treatment

This step consisted of obtaining primary products from the previously acquired data, building a geographic database, and standardizing the new maps produced. The Brazilian cartographic norm (BRAZIL, 1984), suggests the standardization process to unify the geometric and geographic characteristics of cartographic documents in order to minimize errors and distortions that might harm the final analysis.

Geology and relief maps are primary documents from Brazilian research institutions. These data, required clipping for the study area, re-projection, and Datum conversion. The soil map, as it is available in a .tiff image, required georeferencing and manual vectorization of its attributes before insertion in the project database.

The ALOS-PALSAR data were pre-processed using spatial analysis tools in ArcGis 10.6, producing secondary data related to aspect, elevation, and slopes.

For the production of road distance maps and distance from negative factors, we processed data on roads, urban areas, and negative land uses with the Euclidean distance tool, which calculates, for each cell, the Euclidean distance to the closest source.

Finally, all products were standardized for the Universal Transverse Mercator projection, Datum Horizontal SIRGAS 2000 (Brazilian standard), and Zone 22 south.

5.2.2.3 Step 3: Weight Assignment and Fuzzy Normalization of Parameters

The overlapping of cartographic products in a GIS requires standardization values, based on mathematical weighting, to be assigned for both the parameter classes and the spatial parameters themselves (MALCZEWSKI E RINNER, 2015).

The parameters classes' standardization consists of defining adequate factor values for a common scale to allow comparisons. Thus, we defined four classes (values) according to land suitability for the implementation of ecosystem services related to ecotourism: Low (1), Moderate (2), High (3), and Very High (4).

When evaluating the structure and spatial distribution of the used parameters, we observed that the potential zones of ecotourism ecosystem services would be properly distributed in four classes, avoiding as much as possible subjugated classes with spatial distributions so statistically irrelevant that they make their analysis impossible.

To assist with weight allocation, we mapped the ecotourism attractions registered in the Brotas Tourist Inventory (BROTAS, P. M. DE, 2018) and applied a spatial correlation to the analyzed parameters, mapping only officially registered ecotourism attractions despite the fact that several unregistered attractions in the municipality.

Table 5-2 shows the justifications for the assignment of weights to each parameter:

Table 5-2 Parameters used, justifications for the assignment of weights to each parameter and its references.

Parameter	Justification of weight assignment	References
Geological Units	The assignment of weights for the Geology parameter occurred with the aid of the spatial correlation analysis between ecotourism activities and the characterization of São Paulo State Geodiversity (CPRM). We analyzed the characteristics of rocks, their potential fragility, the landscape complexity and the evolution of the model to identify their favorability to produce ecotourism potential.	(BROTAS, 2018; PEIXOTO, 2010a)
Soils	As a superficial attribute, of direct interaction with anthropic activities, we evaluated (from the characteristics of texture, composition, derived rock, and maturity) its vulnerability to the implementation of ecotourism infrastructures	(IAC, 1981))
Relief	The area relief directly reflects its geological characteristics and external interactions. Thus, weights were assigned based on the characterization of São Paulo State Geodiversity and on the analysis of how the modeled feature can offer greater propensity to recreational ecosystem services	(PEIXOTO, 2010b)
Distance from water bodies	We analyzed that the water bodies in the study area are essential to ecotourism, since the municipality offers several ecotourism attractions related to rivers, such as rafting, buoy cross, canoeing, etc.	(BROTAS, 2018)
Slope	As for slopes, we considered that flatter areas are more favorable due to their accessibility. However, the highest slopes were also evaluated as favorable because they produce topographic conditions for the presence of waterfalls and scenic beauty.	Authors
Aspect	The Aspect data spatially showed the places with the highest solar incidence in the landscape, directly regulating local microclimates. In the case of the study area, the areas directed to the north are the ones with greater solar insolation thus providing the best conditions for local ecotourism.	(FRANCISCA, ROVANI E CASSOL, [s.d.])
Elevation	We considered that the highest elevations reflect the possibility of scenic beauty and greater visibility to contemplate the local landscape.	(GUERRERO ETAL., 2018)
Land Use	Land use reflects the degree of local anthropization. Thus, we considered that the higher the level of landscape naturalness, the greater the propensity to provide ecosystem services related to ecotourism.	Authors
Distance from Roads	The distance to the transport routes represents, for this study, the easy access to ecotourism activities. Thus, the closer to the access roads, the greater the assigned value. We also considered the proximity to the railways, which can be integrated into the ecotourism model.	Authors
Distance from negative factors	These are all factors that put ecotourism activity at risk, such as urbanization and highly degraded agricultural areas. Thus, the further away from these areas, the greater the chance that an area will provide Ecotourism ES.	Authors

From the classification key shown above, we assigned values for each attribute of the analyzed parameters, presented in Table 5-3

Table 5-3 Attributes of each parameter and assigned values for GIS modeling

Parameter	Potential for Ecotourism Ecosystem Services			
	Z1 Low	Z2 Moderate	Z3 High	Z4 Very High
Value	1	2	3	4
Geological Units	Alluvium Colluvium	Itaqueri	Serra Geral	Botucatu; Pirambóia;
Soil type	Lithic Entisols Quartzipsamments Entisols; Entisols	Sandy Ultisols	Red-Yellow Oxisols, Medium / Sandy Ultisols	Red Oxisols; Red Nitisols
Relief	Flood Plains Erosive Edges	Colluvium/Alluvium Ramps, Lithostructural Levels	Hills, Degraded Cliffs, Low Dissected Plateaus	Plateaus, Valleys. Inselbergs, Water Bodies
Distance from water bodies	>500m	300 – 500 m	150 – 300 m	0 – 150m
Land Use	Agriculture, Forestry, Urban, Non-vegetated areas	Pasture	Grassland	Forest, Cerrado, Water
Distance from Roads	>1500m	750 – 1500 m	350 – 750 m	< 350 m
Distance from urban	>1000 m	500 – 1000 m	300 – 500 m	< 300m
Aspect	East, West	Southeast, Southwest	Northwest, South	North, Northeast
Slope	25 – 35 %	15 – 25 %	3 – 15 %	0 – 3%; > 35%
Elevation	<550 m	550 – 650 m	650 – 750 m	>750 m

Considering that the landscape spatial characteristics do not have clearly defined limits and that many of these geographic phenomena show a high degree of inaccuracy (especially in transitory zones), it is evident that such data cannot be properly expressed with clear sets class limits, such as Boolean logic sets (KAINZ, 2007).

As a solution, several authors such as (CEREDA JUNIOR, 2011; KAINZ, 2007) indicates Fuzzy inference as an instrument for cartographic normalization, capable to solve this problem caused by traditional Boolean analysis.

Zadeh (ZADEH, 1965) introduced Fuzzy inference to deal with inaccurate concepts, which is a methodology for characterizing classes that, for different reasons, do not contain exact limits or borders. Thus, (BURROUGH E MCDONNEL, 1998) stated that whenever there is ambiguity, ambivalence, or abstraction in mathematical models, scientists should implement fuzzy sets.

The fuzzy inference systematization in GIS requires the normalization of the parameters analyzed on a scale that reflects a decision rule, which in this study corresponds to the potential classes for the occurrence of ecotourism ecosystem services. Among the various fuzzy normalization functions available, we used the linear function, with the aid of the Fuzzy Membership tool in the ArcGis 10.8 software.

2.2.4. Step 4: Overlapping of Cartographic Parameters

Map overlay is a geospatial analysis function that considers that the landscape can be modeled by overlaying geographic layers, where each layer is an analyzed spatial parameter (FERREIRA, 2014).

In this study, we used the Analytic Hierarchy Process (AHP) to support the cartographic overlap of the analyzed parameters. Created by (SAATY, 1980), the AHP is a mathematical theory, based on the paired comparison logic, which allows organizing and evaluating the relative importance among all the geospatial layers of the model (MOREIRA *ET AL.*, 2001).

This technique application consists of elaborating a paired comparison between the used parameters (2 in 2), using a scale of values corresponding to the relative importance between the elements, thus building a correlation matrix. Table 5-4 shows the classes of relative importance with assigned values.

Table 5-4 Relative importance values and description used in the AHP model.

Values	Relative importance Description
1	Equal importance: Both factors contribute equally to the objective
3	Moderate importance: One factor is slightly more important than the other
5	Essential importance. One factor is clearly more important than the other
7	Demonstrated importance: One factor is strongly favored, and its greatest relevance has been demonstrated in practice
9	Extreme importance: The evidence that separates the two factors is of the greatest possible order
2,4,6,8	Intermediate values between judgments: Possibility of additional commitments

For the correlation matrix construction, we inquired seven specialists, such as geographers, geologists, and biologists, with prior knowledge of the physiographic structure of the study area. Their opinions were about the relative importance of each element analyzed, taking into account factors such as the propensity to implement infrastructure, environmental risks and the landscape ability to promote attractions.

The built-in pair interactions are shown in Table 5-5

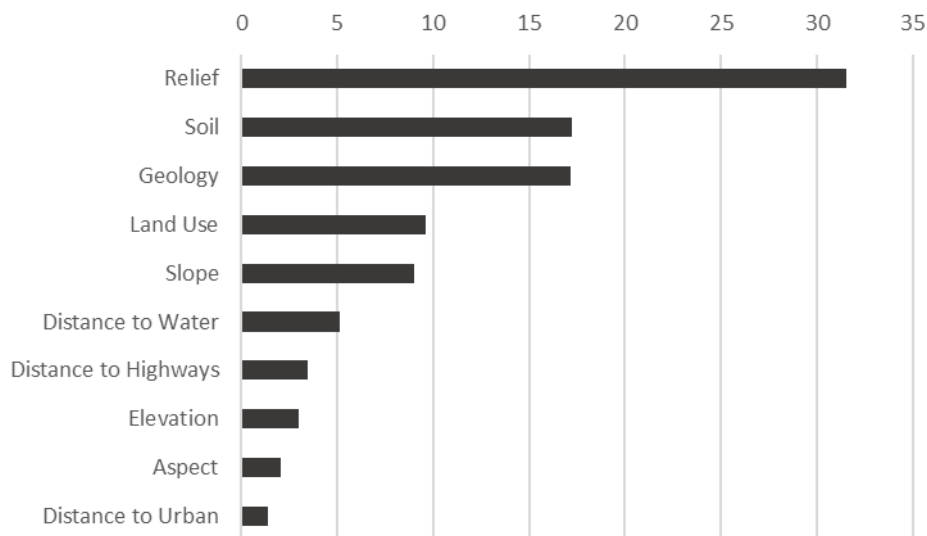
Table 5-5 AHP in pair interactions. DR = Distance to roads; DW= Distance to Water; DU= Distance to Urban.

	Relief	Soil	Geology	Land Use	Slope	DW	DR	Elevation	Aspect	DU
Relief	1	3	3	5	5	7	7	7	9	9
Soil	0.333	1	1	3	3	5	5	7	9	9
Geology	0.333	0.1	1	3	3	5	5	5	7	9
Land Use	0.2	0.333	0.333	1	1	3	5	5	5	7
Slope	0.2	0.333	0.333	1	1	3	3	5	5	7
DW	0.143	0.2	0.2	0.333	0.333	1	3	3	3	5
DR	0.143	0.2	0.2	0.2	0.333	0.333	1	1	3	5
Elevation	0.143	0.143	0.2	0.2	0.2	0.333	0.1	1	3	3
Aspect	0.111	0.143	0.143	0.2	0.2	0.333	0.333	0.333	1	3
DU	0.111	0.111	0.111	0.143	0.143	0.2	0.2	0.333	0.333	1

The consistency ratio, which is a single numerical index to check for consistency of the pair-wise, was 0.019, demonstrating the consistency of the relationships proposed in the model. Finally,

Figure 5-3 indicates the relative importance of the parameters (in percentage), diagnosed by the AHP.

Figure 5-3 Relative importance percentages for each parameter of the model.



5.2.2.4 Step 5: Ecotourism Ecosystem Services Potential Zones and Supporting Decision Making

The fifth step consisted of analyzing the cartographic products and establishing the contribution of geoenvironmental cartography to the decision-making process (DMP). The DMP is defined as “a spatially based computer application or data that assist a researcher or manager in making decisions”(TIMOTHY FOX *ET AL.*, 2016).

In the context of this research, the decision-making process starts from the concern that the territory and its natural resources must be used sustainably, based on technical and scientific criteria.

Thus, the definition of ecotourism ecosystem services potential zones assists territorial planning processes by identifying local potential and restrictions regarding the implementation of ecotourism activities.

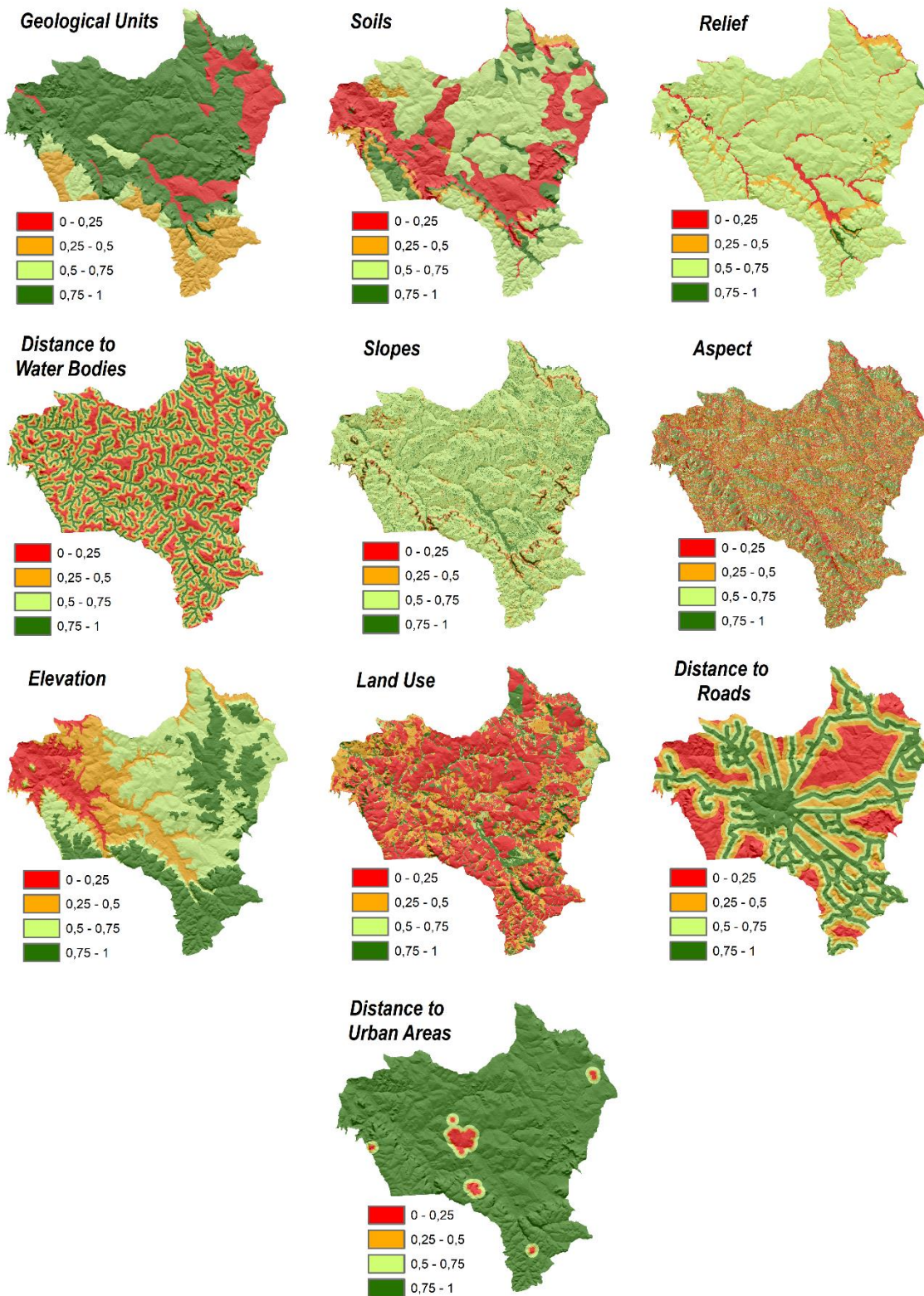
Furthermore, considering ecotourism as a form of landscape resilience in the face of anthropic degradations, it is understood that the DMP based model is a direct contributor to encourage sustainable territories through efficient environmental planning.

5.3 Results

The model parameters were normalized using fuzzy inference, as shown in Figure 5-4. The process of numerical allocation to space occurred respecting the transition zones between the

attributes of each data, predicted during methodological application and proven by several authors as (CEREDA JUNIOR E RÖHM, 2014; GIGOVIĆ *ET AL.*, 2016; KAINZ, 2007).

Figure 5-4 Geospatial parameters used in the model. Normalized to fuzzy inference values.

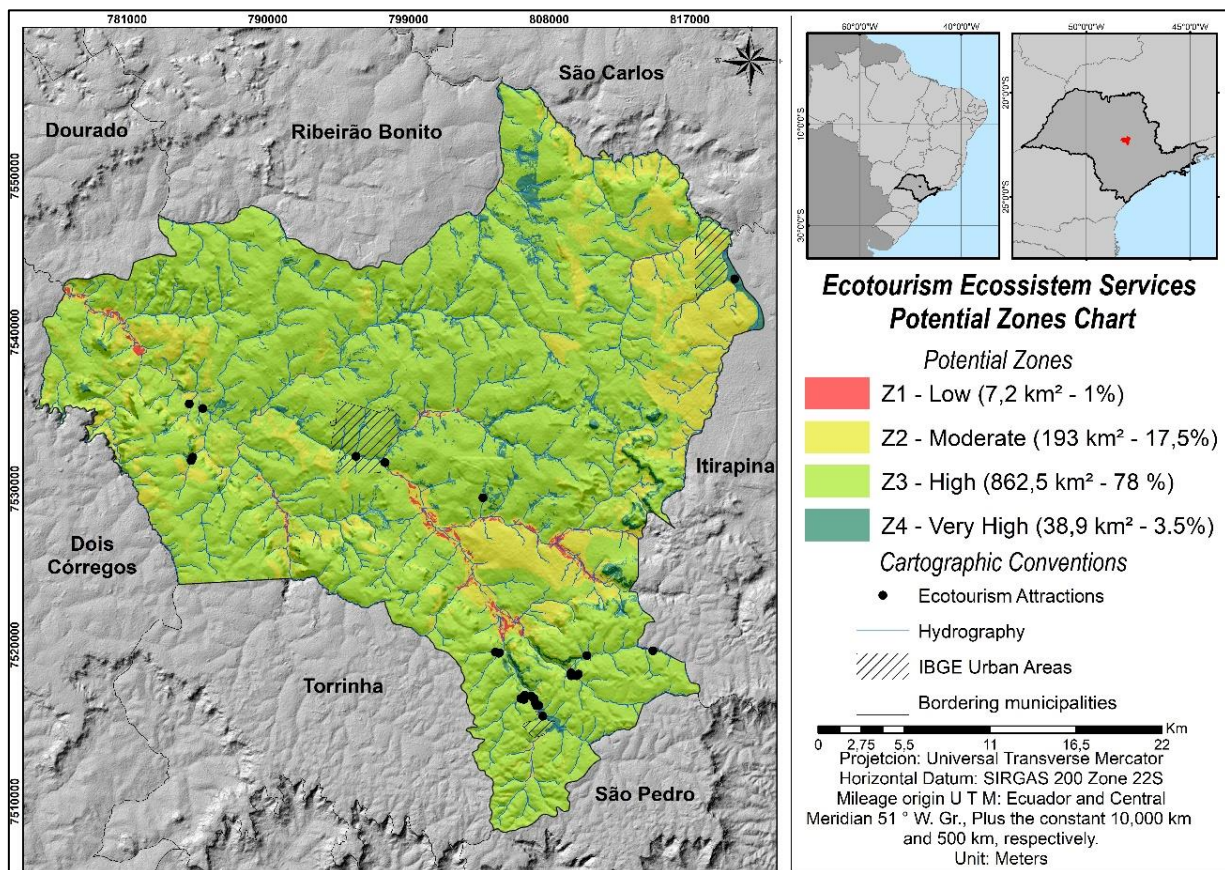


The result of the geoenvironmental model application is the Ecotourism Ecosystem Services Potential chart for the municipality of Brotas, São Paulo, Brazil (Figure 5-5). It shows the most suitable areas for ecotourism attractions implementation, contributing to sustainable territorial planning and to landscape resilience at a local scale.

Strengthening landscape resilience through territory spatial planning is a viable alternative to sustainable development in Brazil, as discussed by (GUERRERO *ET AL.*, 2018; SILVA E MATTOS, 2020; “The dynamics of tourism discourses and policy in Brazil”, 2016), although it is still a challenge to planning processes of municipalities.

Seeking to reconcile the resignification of the landscape promoted by ecotourism with local sustainable development, our chart presents four zones of interest, classified as Z1 (Low), Z2 (Moderate), Z3 (High), and Z4 (Very High) that represent only the region potential and do not necessarily reflect the current use of the territory for ecotourism attractions.

Figure 5-5 Ecotourism Ecosystem Services Potential Zones Chart.



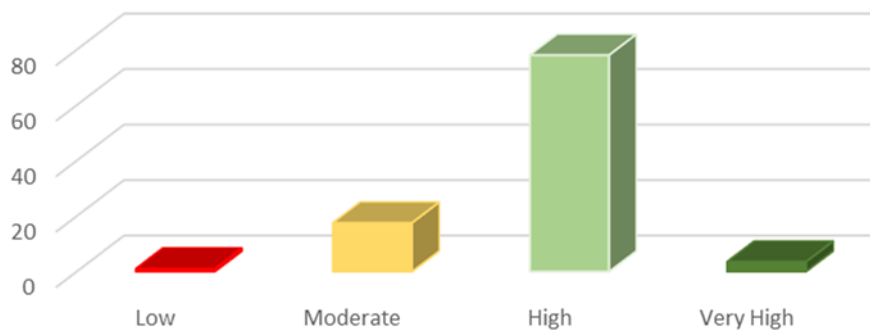
The analysis of human interventions on-site, made it possible to identify, with the assistance of the land use chart (MAPBIOMAS, 2019), that Brotas is in an advanced stage of anthropization, with 22% of the remaining types of natural use (forests, fields, savannah and water bodies). It also indicated that the local economy main driving force is the agricultural activity, especially the vast areas sugarcane crops, a traditional activity in the state of São Paulo with considerable potential

for degrading landscapes (ANDRADE *ET AL.*, 2011; CORRÊA, MORAES E LUPINACCI, 2018; RONQUIM, 2010).

The final map identified the potential zones to promote ecosystem services associated to ecotourism and their relative percentages (Figure 5-6), showing that 81.5% of the territory has High or Very High potential.

Such an expressive result comes from geological, geomorphological, and local climate conditions that allow the occurrence of morphological features of ecotourism interest (on a punctual or regional scale), such as river rapids, waterfalls, fishing sites, scenic beauty derived from topographic differences, among others.

Figure 5-6 Percentages occupied by each potential ecotourism ES's zone. Source:



To support the results, we performed Pearson's correlation analysis among the potential classes and the number of attractions contained in each class. Given the differences between the sizes of the areas of classes, we adopted as standard the number of attractions / km area, for each class, thus creating a comparable unit. Table 5-6 shows the data used in the correlation.

Table 5-6 Relationship between geoenvironmental zones, areas (km²), number of tourist attractions and attraction index / km².

Zone	Area (km ²)	Touristic Attractions	Index attractions / km ²
1 - Low	7.2	0	0
2 - Moderate	193.058	1	0.005
3 -High	862.49	18	0.02
4 - Very High	38.8684	7	0.18

The result of Pearson's linear correlation was 0.83, indicating a positive correlation of the geoenvironmental model, that is, the greater the potential, the greater the proportion of occurrence of ecotourism attractions

5.3.1 Z1 – Low Potential for Ecotourism Ecosystem Services

Zone 1 (Figure 5-7) shows, the areas where exploiting ecosystem services provided by ecotourism features is less viable. These areas occupy 1% of the study area and their main characteristic is the fragility of their geoenvironmental structure, mainly due to the susceptibility to the occurrence of periodic floods, as proposed by (MORAES *ET AL.*, 2020). One factor that proves the inadequacy of these areas for ecotourism is that no active tourist attractions were identified by the municipal touristic inventory.

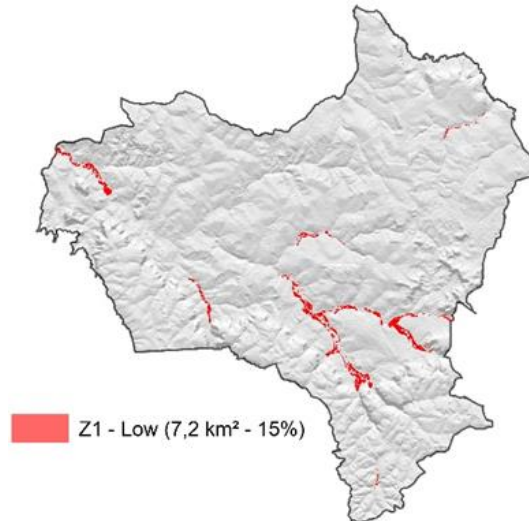
These areas present lack of accessibility and consist of flood plains, fragile soils, low elevations and geological formations with a sandy surface resulting from deposition in valley bottoms. Researchers as (CEREDA JUNIOR E RÖHM, 2014; GUERRERO, LOLLO E LORANDI, 2016; LOLLO *ET AL.*, 2019) point out that such areas present high environmental vulnerability regarding erosion processes, posing risks if tourism infrastructure is implemented .

This characteristic occurrence in valley bottoms coincides with permanent preservation areas (APP) established by law 12.651 (BRASIL, 2012), which are specially protected territorial spaces with restricted use, designed to preserve the environmental services of sensitive areas (SCHÄFFER *ET AL.*, 2011).

The recommendation is that reforestation actions must be implemented in these areas, aiming at the environmental conservation of these fragile areas and at the landscape composition that can enhance other areas with greater ecotourism potential. Several authors demonstrate the effectiveness of reforestation in combating various environmental problems, such as (MACHADO, OLIVEIRA E LOIS-GONZÁLEZ, 2019; NUNES *ET AL.*, 2020; OTA *ET AL.*, 2020; RUPRECHT *ET AL.*, 2019), reinforcing the importance of forest restoration for local ecosystem services.

Due to the impacts of poorly planned anthropic interventions, it is also fundamental to develop mechanisms of Environmental Impact Assessment and to recuperate degraded areas, mainly with effective social participation in these actions (IBAMA, 1995).

Figure 5-7 Low Potential Zone for ES's in Brotas municipality.



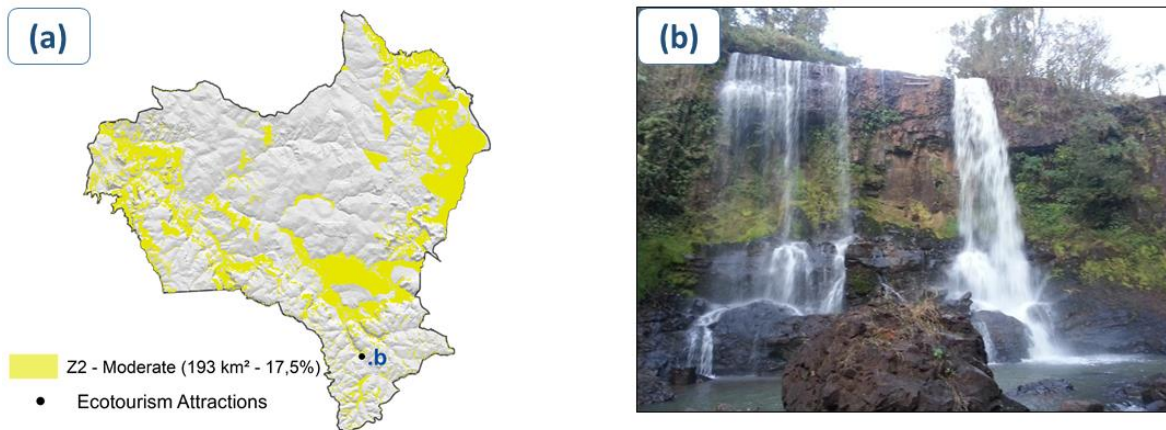
5.3.2 Z2 – Moderate Potential to Ecotourism Ecosystem Services

Considering the 1102 km² of the study area, 17.5% has moderate potential for the occurrence of ecosystem services. The spatial distribution of this zone occurs throughout the municipality, but its highest concentration occurs in the center, Northeast, and Northwest of the territory (Figure 5-8). It covers areas considered as environmentally restricted due to their structural characteristics (fragile soils, sandy geology); however, they still have some potential for ecotourism.

The lower degree of the slopes reflects the minor possibility of large waterfalls, river rapids, and extreme sports, among others. However, its landscape has potential for activities such as fishing and rural tourism.

In this area, only one tourist attraction was mapped, which is a waterfall, but with low amplitude due to its low topographic step. This occurrence demonstrates that even in moderate areas there is the prospect of ecotourism exploration, however, due to the potential fragility of their land, precautionary measures should be taken aimed at the safety of visitors and focused on low environmental impact.

Figure 5-8 a) Moderate Zone for ES's in Brotas municipality. Map Source: Authors (2020); b) São Sebastião Waterfall. Image Source: (TERRITORIOSELVAGEM, 2020).



5.3.3 Z3 – High Potential for Ecotourism Ecosystem Services

Zone 3 (High Potential), illustrated in Figure 5-9, occurs in 78% of the territory of Brotas, indicating that the set of factors that form the local geoenvironmental structure superficially reflects in favorable conditions to the presence of touristic interest morphologies. Besides, the spatial correlation applied indicates that 70% of the mapped tourist activities are in these locations.

The structure of this zone consists of hills, escarpments, and low dissected plateaus; the Red-Yellow Latosols; the relative proximity to water resources; good accessibility, and favorable geological formations. In this region, the presence of springs with landscape potential (Fig 5-9b), waterfalls (Fig 5-9c), rapids, and areas of landscape contemplation (in the highest elevation) stands out.

It is in this area that the main flow of the Jacaré-Pepira River can be observed, considered by (MARTINS E MADUREIRA, 2019) as a determining element of the landscape and as an arrangement of socialization, leisure and cultural identity for the local population and visitors, and where several companies promote leisure/sport activities in boats, canoeing, rafting, among others.

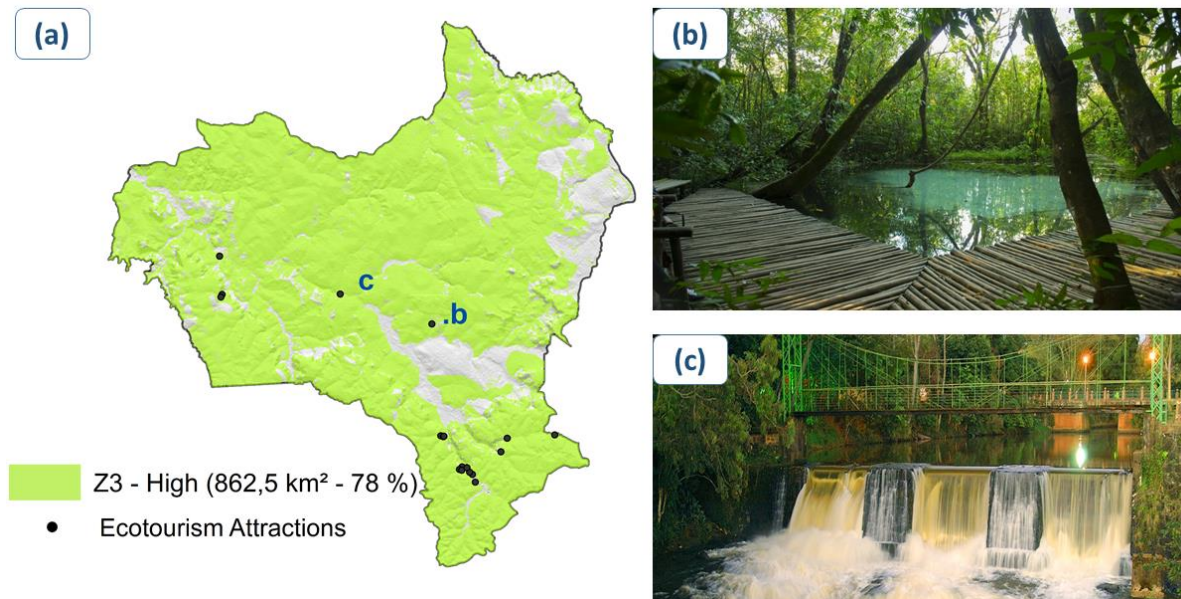
The limiting factor observed is that, despite the potential for ecotourism, the current pattern of land use is concentrated on extensive agricultural cultivation, mainly sugar cane.

Although ecotourism allows maintaining traditional rural activities (AZEVEDO, LOPES E GONÇALVES, 2013), a paradigm shift is currently taking place with the appreciation of nature aesthetics, due to travelers' desires to reconnect with what is considered natural.

This reconnection is a reflection of the global environmental crisis experience, where what was previously considered "bush" or "jungle" has become a pleasant counterpoint to the total urban and degraded landscapes witnessed daily by people (LAYRARGUES, 2004).

One possibility for facing this spatial/economic dichotomy is the development of rural tourism as a planning strategy, which allows appreciating the historical value of the municipality, adding value to the traditions and customs of local communities. Several projects related to this theme have been developed in the Brazilian territory, with relative success in supporting sustainable development, such as (CUNHA, 2014; PADILHA *ET AL.*, 2015; SANTANA E SANTOS, 2016).

Figure 5-9 a) Zone 3 – High ES’s potential in Brotas municipality. Map Source: Authors (2020). b) Areia que Canta spring, Source: Vaca Nautica Brotas (2020); c) Saltos Park; Source: (BROTASONLINE, 2020).



5.3.4 Z4 – Very High potential for Ecotourism Ecosystem Services

Zone 4 shows areas with a very high potential for the provision of ecosystem services for ecotourism across the landscape and covers 3.5% of the study area (Figure 5-10).

Its structural composition includes relief forms that promote scenic beauty, such as high waterfalls and leisure spaces (tops, plateaus, embedded valleys), mature and well-structured soils; natural land uses (forests, savannah, water bodies), easy accessibility for visitors, proximity to usable water resources and surface geological formations that have ecotourism appeal.

We realized that the reduced spatial occurrence in this zone is not due to the low local ecotourism potential, but rather to the high degree of the anthropization, where the landscape is mainly composed of vast sugarcane plantations, which directly interfered in the applied geoenvironmental model.

Even so, 7 duly registered (BROTAS, P. M. DE, 2018) tourist attractions (27%) are currently explored in those areas, and their high potential results in different types of landscape that can promote

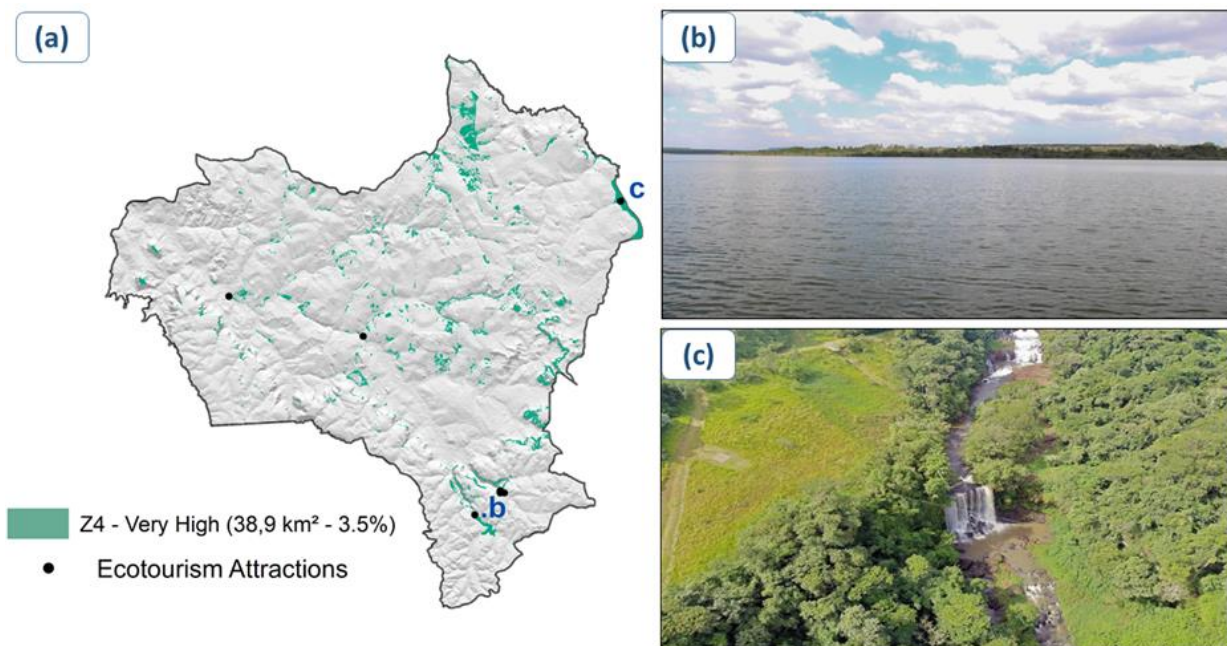
different tourist attractions such as nautical leisure (Fig 5-10b), wide waterfalls (Fig 5-10c), landscape contemplation and adventure tourism.

Similarly to Zone 3, Zone 4 also occurs over regions considered as permanent preservation (APP), mainly related to hilltops and riparian vegetation, where a more efficient governmental inspection is critical to the long term compliance with environmental laws and to quality preservation of the ecosystem services provided.

Potentially impactful areas prone to land use conflicts require the development/implementation of sustainable environmental management instruments, such as payments for environmental services, which enable a more harmonious relationship between rural producers and local sustainable development.

Therefore, more in-depth studies with greater cartographical detail are recommended for Zones 3 and 4 in order to allow a more efficient analysis related to what types of ecotourism can be implemented in each mapped area, contributing more efficiently to local territorial planning.

Figure 5-10 a) Zone 4 – Very High ES's potential in Brotas municipality. Map Source: Authors (2020). b) Broa Dam, source: (MARINABROA, 2020); c) Jacaré Waterfall; Source: (TERRITRIOSELVAGEM, 2020).



5.4 Discussion

The importance of ecotourism as an instrument of landscape resignification and sustainable development has been discussed by several authors, such as (CHOI *ET AL.*, 2017; MARTINS E MADUREIRA, 2019; MONDINO E BEERY, 2019), indicating the theme relevance to landscape sustainable planning. However, ecotourism expansion often conflicts with land use, since the

recent development of these green activities has not yet been able to overcome traditional uses in Brazil.

Some authors have already reflected on the theme of ecotourism in Brotas, studying the applied public policies ((PEREIRA E GONÇALVES, 2004) and Ribeiro and Amaral (RIBEIRO E AMARAL, 2016)), and the history of local ecotourism (Martins and Madureira (MARTINS E MADUREIRA, 2019)). The work of Guerrero et al.(GUERRERO *ET AL.*, 2018), for example, aimed to identify suitable areas for ecotourism, finding 88% of such areas in Brotas, which is similar to our results using a different technique.

Our results showed that the municipality of Brotas directly faces such conflicts, given that it has a high potential for the provision of ecosystem services for ecotourism, while its economy remains deeply dependent on traditional agriculture (MAPBIOMAS, 2019). Even though these conflicts are still a challenge, authors like (BUDEANU *ET AL.*, 2016; RAINERO E MODARELLI, 2020) demonstrate the positive transformative potential that sustainability brought by ecotourism projects has had on landscapes around the world.

As proposed by Martins and Madureira (MARTINS E MADUREIRA, 2019), the municipality of Brotas historically presents land use conflicts . However, from the 90s onwards, the population's ideals and the public policies turned to environmental conservation and ecotourism, seeking to explore, mainly, the most favorable areas such as those shown in our study.

Thus, proposing zoning that takes into account local geoenvironmental characteristics and land use with a GIS model to identify the main potentialities and restrictions to ecotourism becomes an important tool for environmental planning when seeking to reconcile the forms of land use from a natural resources conservation perspective.

The significant results obtained from the applications of Multicriteria Decision Analysis (MCDA) / GIS analysis have made this technique quite usual for the planning of ecotourism areas with multiple uses (ÇETINKAYA *ET AL.*, 2018; GIGOVIĆ *ET AL.*, 2016; SAHANI, 2019), contributing to enhancing this kind of application in the Brazilian territory.

From the dynamics presented above, we can consider that the municipality of Brotas has the necessary conditions to promote a more sustainable development since the high capacity of the local landscape to provide ecosystem services for ecotourism can enable a restructuring of anthropized landscapes based on the valorization of the natural capital.

Considering that the municipality has high or very high potential in 81% of its territory, its resilience capacity is worth noting. However, such resilience is only fully activated as long as there are public policies aimed at environmental sustainability which strengthen ecotourism ecosystem services as primary assets of the local economy (BARAL, 2014; CHEER E LEW, 2017).

As mentioned by the Brazilian Ministry of Environment (MMA, 2018a), the maps produced at a scale of 1: 50,000 (just like the ones used in this work) refer to the tactical / operational approach at a municipal scale, being the basis for the territory planning processes. Thus, it is clear that for the individual management of each ecotourism attraction within the diagnosed areas, further studies on the issue of cartographic scale (1: 10,000 and greater) are necessary.

5.5 Conclusions

Our methodological application produced four geoenvironmental potential zones to provide ecosystem services for ecotourism, taking into account environmental, topographic, and socioeconomic parameters.

The results obtained indicated a high probability of occurrence of the ES's, as 81.5% of the territory presents High or Very High potentials and, if we consider the moderate zone, this index rises to the expressive value of 99%.

Such potential allied with a growing appreciation of ecotourism activities in the municipality present planners and local managers with a viable strategy for the sustainable re-signification of the land use strengthening the environmental resilience of the landscape.

Bearing in mind that it is impossible to promote abrupt transitions in the current economic matrixes (focused on agribusiness), it should be noted that the resilience promoted by ecotourism activities also acts in the social sphere, with the valorization and insertion of local communities in the territory appropriation process.

In the places of greatest potential from the defined areas, we recommend studies on the valuation of ecosystem services that are accompanied by cartographic products and inventories on a larger scale, which allow a more detailed planning process of the local territory.

The use of geoenvironmental cartography with GIS and multicriteria analysis (Fuzzy-AHP) proved to be a consistent tool to support decision-making on the theme of ecotourism ecosystem services, as it allows a faithful representation of landscape conditions, in addition to spatially demonstrating the potential and restrictions of the municipality.

From the perspective of urban/environmental planning in Brotas, we recommend that the Ecotourism ES's zoning chart be included as a basic document in the municipal master plan, considering that this set of rules that guide development provides the use of environmental zoning to promote sustainable development

It is crucial to emphasize that, for the areas with the greatest potential, more detailed studies and are necessary to allow more specific actions regarding the sustainable territorial planning of the municipality of Brotas.

Finally, as the modeling exercise of ES's for Ecotourism has proven to be an efficient environmental planning tool, this study also hopes to encourage other municipalities to assess their ecotourism capacity as well as to include this perspective in their planning processes.

CAPÍTULO 6 SOLOS

A GIS FUZZY-MCDA MODEL TO ANALYZE SOIL ECOSYSTEM SERVICE'S VULNERABILITY: A STUDY CASE IN A BRAZILIAN CERRADO LANDSCAPE.

Abstract: Soils are the structural basis for all human activities, containing immeasurable ecosystem services and strategic importance to the development of countries. However, in recent years, especially in developing countries like Brazil, soil conservation has been neglected in favor of expanding agribusiness, causing irreversible impacts on this ecosystem. In this context, this study aimed to apply multicriteria analysis through geoprocessing to assess the current vulnerability of soil ecosystem services. We take into account soil parameters, relief, geology, land use, topography, hydrography, and rainfall systematized by fuzzy inference. The study was applied in an area of the Brazilian cerrado, one of the most fragile ecosystems to soil degradation and one of the most changed over the years. The results indicated that the high degree of anthropization of the territory combined with the natural characteristics of the landscape produce a scenario where 40% of the study area represents areas of high or very high vulnerability. The integrated analysis of this study allowed to propose measures of territorial ordering that contribute directly to the efficient planning of the landscapes, not only for the studied municipality, but also for other areas where it is desired to support the conservation of ecosystem services provided by the soils.

Keywords: Environmental Planning; Soil Ecosystem Services; Conservation; Sustainable Development

6.1 Introduction

In the last 50 years, human actions have caused impacts never before seen on terrestrial ecosystem services (ES), searching for natural resources, food, and economic growth (MEA, 2005). The ecosystem services are the characteristics, functions, or ecological processes that contribute directly or indirectly to the maintenance of the well-being of human beings (COSTANZA *et al.*, 2014, 2017), that is, any benefit that humans can obtain from the ecosystems they live in (GROOT, WILSON and BOUMANS, 2002).

Although the concept of ecosystem services was first reported between the 60s and 70s, it was in the last twenty years that it gained notoriety in research, policies, and applications, mainly due to the growing concern about the degradation of ecosystems and the vital services that lend (COSTANZA *et al.*, 2017).

Brazil stands out especially in the historical process of environmental degradation since its development based on agribusiness and industrialization has caused deforestation processes, unbridled exploitation of natural resources, and use of agrochemicals (NUNES *et al.*, 2020; SCHIELEIN and BÖRNER, 2018; VERÍSSIMO and XAVIER, 2014)

This situation, combined with the lack of sustainable planning, resulted in considerable losses in services provided by ecosystems, mainly in rural landscapes (PARRON *et al.*, 2015), which make up most of the Brazilian territory (MAPBIOMAS, 2019).

Even with several studies that emphasize the importance of maintaining ecosystem services for the quality of life of human beings (JÓNSSON and DAVÍSDÓTTIR, 2016; NÓBREGA *et al.*, 2020), Brazil is not yet able to establish non-conflictual relations between development strategies and the conservation of natural resources, aggravating the loss of ecosystem services provided.

The special interest in soil quality occurs because this resource is the physical basis for all activities essential to humans (BLUM, 2005), such as agricultural crops, mining, extraction of natural resources, and implementation of urban infrastructure (BAVEYE, BAVEYE and GOWDY, 2016).

The decrease in ecosystem services provided by soils in Brazil generates several socio-environmental concerns since it is in these environments that the main processes of the natural environment occur, such as ecological processes of the flow of energy and matter (VEZZANI, 2015) and all ecological functions (BLUM, 2005).

When it comes to biodiversity, the Brazilian Cerrado stands out as one of the great global conservation hotspots, as it has the richest flora among the world's savannas, a varied diversity of fauna (with several endemic specimens), and unique landscape features (KLINK and MACHADO, 2005; SANO *et al.*, 2019).

Even with the provision of essential ecosystem services (NÓBREGA *et al.*, 2020), this ecosystem is notably sensitive to human changes, as it contains naturally fragile soils and is a place where most of the natural vegetation has been replaced by exotic crops and pastures (COHN *et al.*, 2016). This conversion of native vegetation to human activities has a direct and negative effect on ecosystem services, mainly because they cause intense environmental degradation. (BACCARO, 2012; JAMES *et al.*, 2019; MACEDO *et al.*, 2020; PEREIRA *et al.*, 2019).

In addition to anthropic interventions, the geoenvironmental and climatic conditions of the Cerrado suggest that the natural processes related to morphogenesis (erosion, transport, and deposition) are elements that frequently occur due to the geological history of the biome (BACCARO, 2012), demonstrating its natural fragility.

It is then up to geoscientists to identify and analyze the places where such natural processes are caused or aggravated by the conflicting relationship with human activities, which cause vulnerabilities and put at risk the availability and quality of ecosystem services provided by the soil.

Currently, there is an effort in the production of studies that contemplate the importance of soil ecosystem services for the well-being of both biodiversity and humans, as in studies of Baveye, Baveye and Gowdy (2016), Jónsson and Davídsdóttir (2016), Olson *et al.* (2017), Su, Liu and Wang (2018).

Bearing in mind that the concept of vulnerability refers, in this case, to the propensity or predisposition of an ecosystem service to be adversely affected (IPCC 2014), assessing the vulnerabilities of soil ecosystem services is a fundamental element to operationalize sustainable development on a regional scale, considering the potential and restrictions of the studied sites.

Thus, as important as assessing, it is to insert vulnerability assessments in the planning processes of the territory, in the form of instruments guiding the decision-making process by the managers (GROOT *et al.*, 2010).

Territorial planning strategies and decision-making assistance become even more important according to what you propose (BIRGÉ *et al.*, 2016), which demonstrate that poor territorial management directly contributes to the loss of soil ecosystem services.

As an important compatibility tool between vulnerability assessment and action planning, Groot *et al.* (2010) proposes the use of geographic information systems (GIS) and digital cartography as drivers of sustainable territorial planning.

Geographic Information Systems (GIS's) has been often used as a protagonist in planning processes related to ecosystem services around the world (BAUDE, MEYER and SCHINDEWOLF, 2019; CALZOLARI *et al.*, 2020; KUANG, PENG and SANG, 2020), with efficient contributions to improving the quality of ecosystems.

In Brazil, its continental size and the problems caused by the poorly planned appropriation of its ecosystems (especially the Cerrado) indicates the need for studies on a local scale to contribute punctually to the planning and management of landscapes. However, the lack of reliable data at the municipal level and the disinterested conduct of many governments cause a gap in environmental planning actions.

Considering this scenario, this article aimed to analyze and spatially identify the vulnerability of soil ecosystem services (maintaining quality, retaining, and preventing erosion), seeking to contribute to the decision-making process at a municipal scale in areas of the Brazilian Cerrado.

The method consisted of proposing a model based on multicriteria analysis that takes into account the genesis and characteristics of the natural processes that act in the provision and degradation of soil ES's and their relationship with the current dynamics of local anthropic occupation. The final map generated zones of vulnerability that can contribute as a spatial direction of sustainable landscape planning and management strategies.

The study was applied in Brotas, a Brazilian municipality 100% inserted in the Cerrado biome that strongly depends on ecosystem services provided by local soils but shows conflicts between natural vulnerabilities and land grabbing.

6.2 Materials and Method

6.2.1 Study Area

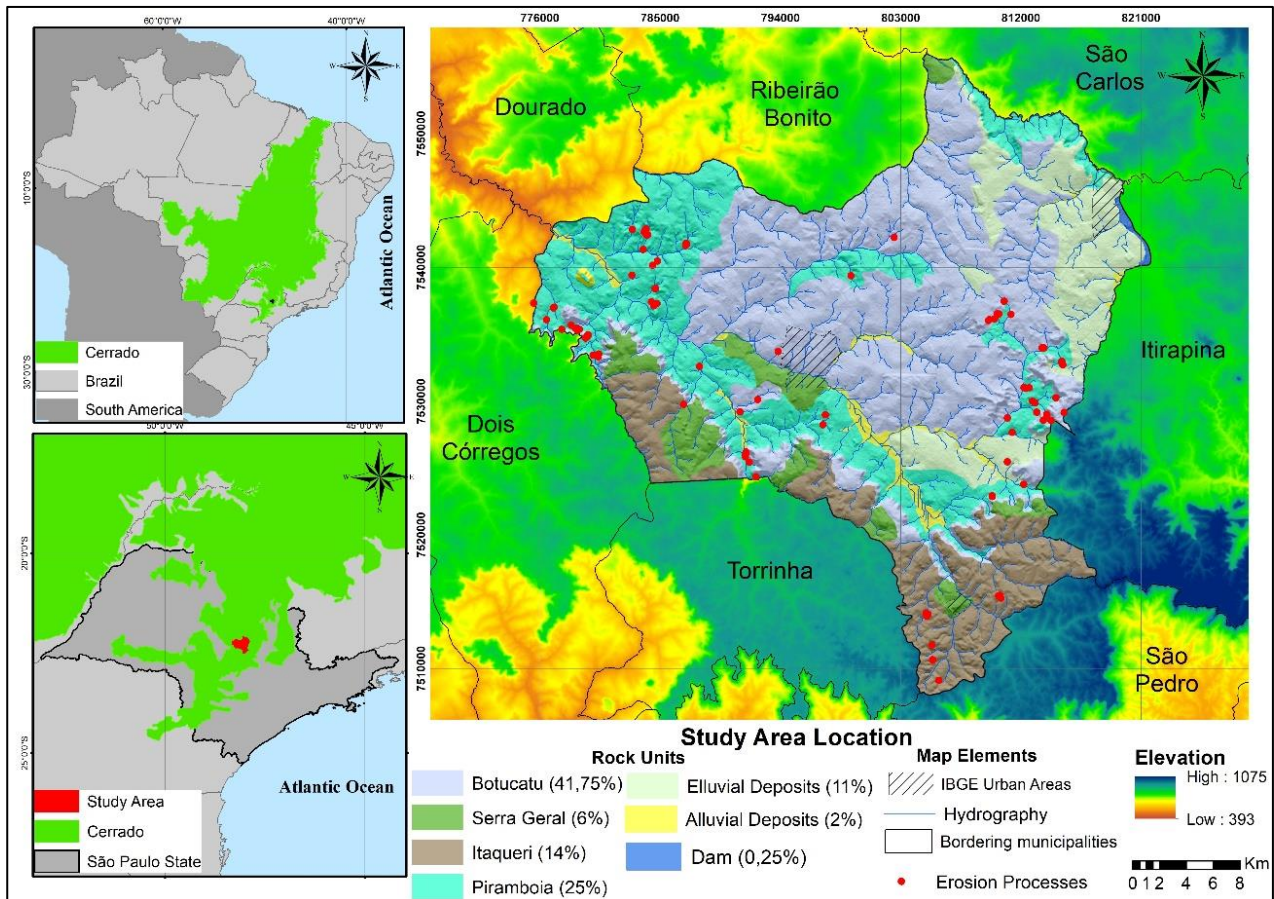
The Cerrado is a Brazilian biome that occupies 21% of the Brazilian territory (Figure 6-1 a), being the second largest biome in extension, behind only the Amazon. It is considered the set of biomes composed of ecosystems in central Brazil, such as savannas, forests, fields, and gallery forests.

In São Paulo State (Figure 6-1. b), the Cerrado biome originally occupied 14% of the territory, however currently, given the extensive process of degradation and deforestation in favor of agricultural and industrial development, it is estimated that there is only 1% of typical conserved vegetation (SÃO PAULO, 2009).

Due to the high degree of the anthropization of the landscapes in São Paulo state, the natural vegetation of the Cerrado has been practically completely replaced by agricultural activities, with only a few preserved natural remnants remaining.

The study object of this article is the municipality of Brotas, SP, which is about 250km away from São Paulo city and has an estimated population of 24,403 inhabitants in a total area of 1,102km².

Figure 6-1 Study area location - Soils



6.2.2 Definition of the ecosystem services analyzed: The importance of site diagnosis.

There is a wide range of ecosystem services provided by soils, which can be considered relevant for a landscape depending on the physical, economic, and social characteristics of each location. Restricting the ecosystem services essential to the study is a primary task, given that working with everyone who occurs in a study area is complex and often unfeasible

Therefore, one must evaluate the socioeconomic context, the land use by humans, and the geoenvironmental conditions that shape the local landscape to identify which services are essential to that landscape. Thus, it is possible to promote greater attention to the natural and manufacturing processes that produce the potential and restrictions to the territory, making the analysis more efficient from the structural point of view.

As analyzed in the characterization of the study area, the municipality of Brotas has unique attributes regarding its geological, geomorphological, and soil evolution, which gives the site largely sandy structures and potentially susceptible to erosion and soil losses.

On the other hand, the history of appropriation of local landscapes is directed almost exclusively to the conversion of natural vegetation to intensive farming of grains, sugar cane, coffee, and orange, which promotes land-use conflicts in the area.

Finally, the analysis of local ecosystem services, based on Groot et al. (2010) and Groot, Wilson, and Boumans (2002b), it was possible to state that the 3 most relevant soil services to the study area: Maintenance of quality (related to the productive capacity of the soils), retention and prevention of erosion (which reflect the capacity to promote ecosystem services that regulate the coping of soils to loss of material).

Thus, these three services, diagnosed as essential became the focus of this study.

6.2.3 Data used

The first operational procedure to analyze the vulnerability of soil SE's is to identify the factors that shape the geoenvironmental system and those that cause/catalyze degradation on a regional scale, taking into account the particularities of the studied territory.

It was established for the production of the geoenvironmental model that, just as it proposes Ab'saber (2012) and Pereira et al. (2018), that the physiographic characteristics of the landscape directly influence the local characteristics of the soils, which in turn, condition the ecosystem functions and services provided.

We also considered the availability of data for the Brazilian territory to produce a replicable model that can contribute to the planning of other areas.

The GIS-MCDA model proposed in this study requires several spatial data sets related to the geoenvironmental attributes of the landscape and land use. The raw data obtained are shown in Table 6-1.

Table 6-1 Materials used on Soil ES's Vulnerability Model

Data	Source	Year	Format
Geology	IG-SP	2014	Polygon Shapefile
Soil Types	IAC	1981	PDF
DEM ALOS	JAX	2011	Tiff
Terrain Forms	TOPODATA	2008	Tiff
Relief	CPRM	2020	Polygon Shapefile
Rainfall	CEMADEN	2017	Tiff
Erosion Process	CPRM	2020	Point Shapefile
Land Use	MapBiomias	2018	Tiff
Hydrography	IBGE	1970	Polyline Shapefile

Geological, relief and soil types maps are essential factors for understanding the structural conjuncture of local morphogenesis/pedogenesis, allowing the analysis of areas with greater

vulnerability regarding the relationships between the internal and external structure of the model and places where there is greater natural capacity maintaining soil quality.

The data of topographic origin (DEM and Terrain Forms) have a close spatial association with gravitational transport processes along the slopes, such as erosion, transport, and deposition, constituting essential factors for territorial planning. (TOPODATA, 2008).

The analysis of the occurrence of rainfall distribution occurs because the kinetic energy from precipitation is one of the main factors that contribute to the instability of the slopes, especially in hot and humid regions such as Brazil.

As well as topographic data, the hydrography of a site must be analyzed for its direct contribution to gravitational processes, especially when we consider that the higher the drainage density of a site, the greater the amount of water available to produce the drag of particles from the top to the bottom of the slopes.

The insertion of erosive processes (features associated with gravitational movements and related processes) in the model refers to the concept of spatial proximity between elements in geographic space, considering that the broader the density of these processes, the greater the vulnerability that this area presents to the loss of soil ecosystem services.

Finally, data related to land use offer the model the possibility of analyzing the degree of human interference in the landscape, identifying the places where there is greater protection of the soil and where there is greater pressure.

6.2.4 Method

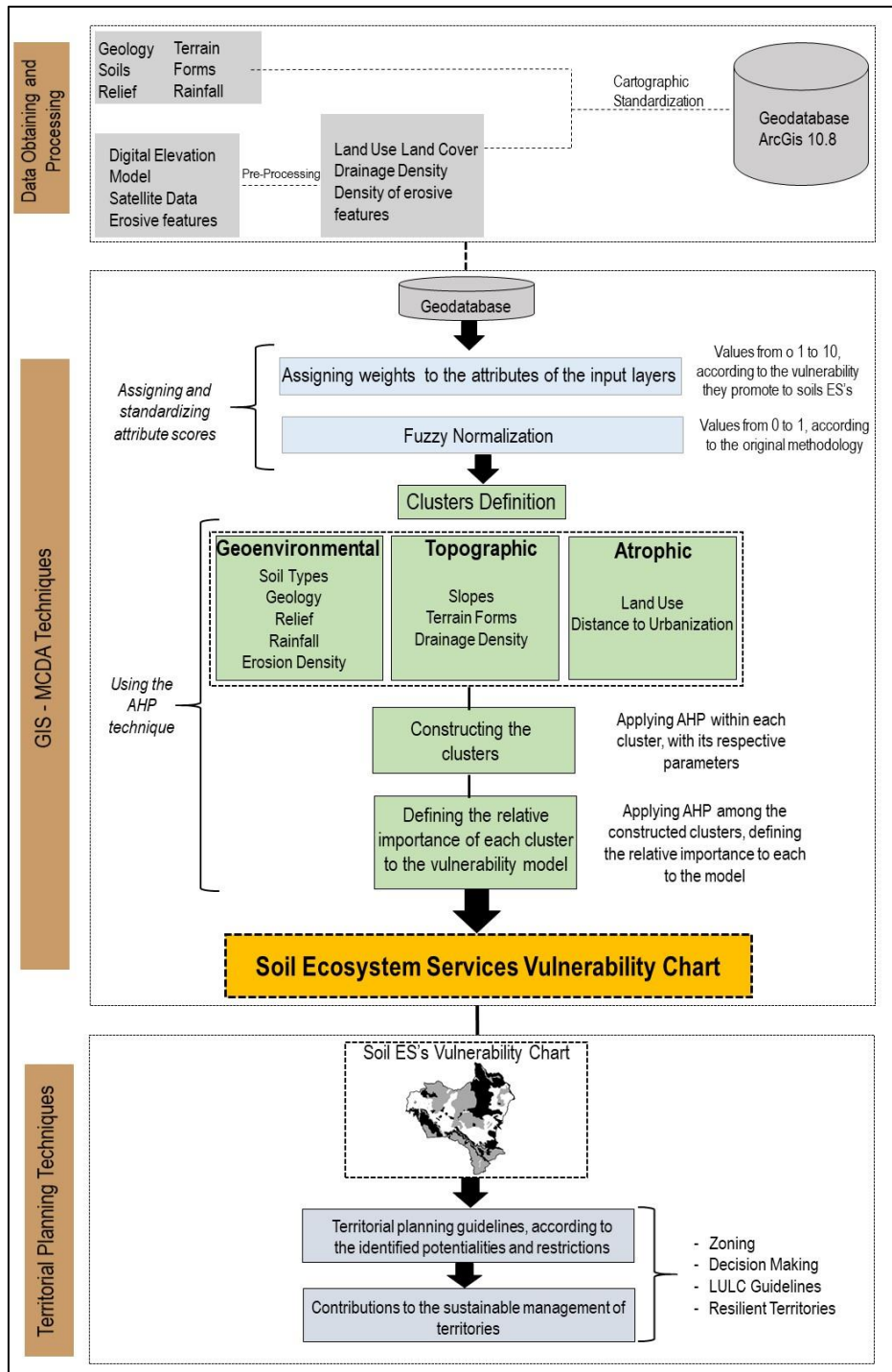
Analyzing soil ecosystem services vulnerability is a complex task that directly involves several environmental and anthropic attributes. Thus, it is necessary to apply decision support methods that contemplate this complexity of interactions, resulting in significant contributions to land use planning.

To face this problem, we used multi-criteria decision analysis (MCDA) methods combined with geographic information systems (GIS) techniques. MCDA consists of systematic procedures to analyze complex problems from various analysis parameters (MALCZEWSKI, 2006).

Thus, the structure of the model is based on the following methodological procedures: Definition of the analysis factors and data collection, standardize the aspects in scores, determine the weight of each element for the model, overlay the factors on a single map, Analysis of the history of vulnerability and construction of future scenarios and provide territorial planning guidelines.

Figure 6-2 is a workflow that illustrates the methodological procedures proposed for this study and that serves as a guide for the method to be replicated in other areas of the Brazilian Cerrado:

Figure 6-2: Workflow of Soil ES's Vulnerability model



It is noted that the execution of the study develops in three main phases: The preparation of the basic data, application of the techniques of Multicriteria Decision in Geographic Information Systems and the analysis of the vulnerability of the ecosystem services of soil and guidelines of sustainable territorial organization.

6.2.4.1 Data preparation

Preparing the data previously acquired for insertion in the MCDA model consists of processing the raw data to obtain secondary data according to the diagnosed needs.

The data of Geology, Soils, Relief, Forms of Terrain, Rainfall, Land Use, and hydrography were obtained in the standards necessary for use in the geoenvironmental model, that is, it was not required to apply any kind of previous processing.

We processed the Alos-Palsar DEM data with the "fill" tool to fill possible voids that occurred during the acquisition of the images by the satellite. Subsequently, we used the spatial analysis tool "slope" to obtain the slope classes in percentage. Finally, this data was reclassified to the desired classes' ranges in the study.

Erosive processes are point data that required the application of the "Kernel Density" function, to obtain their occurrence density. This function calculates an area of magnitude per unit from the entry points, using a core function to fit a smoothly conical surface to each point (ESRI, 2018).

The extraction of the drainage channels occurred from topographic maps of the IBGE (1971), for its correction and updating, we used Landsat 8 images.

Finally, tabular data from wells (CPRM, 2018) were the basis for the production of groundwater depth data. For this, we converted the attributes of the table (which correspond to the physical characteristics and location of the wells) into feature points, which allow interpolation using the kernel density tool explained above.

Infrastructures without planning and poorly executed urban works have been causing several problems of soil degradation in Brazil. For this reason, we use the concept of distance from anthropic infrastructures as a parameter of analysis, that is, the further away a site is from an infrastructure project, the less its vulnerability to this precedent. This data comes from the kernel distance between the polygons of interest extracted from the land use map.

6.2.4.2 GIS-MCDA Techniques

The implementation structure of the GIS-MCDA techniques of this work was: to assign scores to the attributes of the analyzed parameters, according to a pre-established criterion; Standardize values by Fuzzy inference; Determine the weight of each parameter, and aggregate / overlays the geographic layers.

Assigning and standardizing attribute scores

Typically, spatial decision problems involve several parameters of analysis, which are formed by 1 or more attributes (such as soil types for the pedological parameter. The attribution of weights or scores to these attributes, which denote changes in the value ranges within the parameters, it is a central step for building GIS decision-making models (MALCZEWSKI, 2000).

Each of the model's 10 input parameters has several associated attributes, such as the six geological formations contained in the geological map. The attribution of scores for these attributes to a standard scale is essential to allow comparisons and, consequently, to establish a systematization in geographic information systems.

The scale chosen for this assignment was numeric from 1 to 10, according to the degree of vulnerability that the attribute has on ecosystem services for maintaining quality, retaining, and preventing soil erosion, that is, the higher the value, the greater the vulnerability exercised. Table 6-2 shows the values for each analyzed attribute:

Table 6-2 Values of each analyzed attribute

Parameter	Attribute	Value
Geology	Alluvium	10
	Colluvium	
	Botucatu	9
	Piramboia	7
	Itaqueri	4
Soil Types	Serra Geral	1
	Lithic Entisols	
	Quartzipsamments Entisols	10
	Gleysols	9
	Sandy Ultisols	7
	Medium-Sandy Entisols	5
	Red-Yellow Oxisols	4
	Red Oxisols	2
	Red Nitisols	1
	Relief	Water Bodies
Hills		
Plateaus		2
Low Dissected Plateaus		4
Lithostructural Levels		5
Colluvium/Alluvium Ramps		6
Colluvium Ramps / Talus Depot		7
Inselbergs		7
Degraded Cliffs,		
Structural Steps, Erosive Edges		9
Valleys		9
Flood Plains		10
Rainfall		Unequal distribution situation throughout the year: With dry periods in winter and rainy summer (December - March), with volumes from 1300 to 1600 mm/year
Erosion Density	<0.04	1
	0.04 – 0.13	2
	0.13 – 0.033	5
	0,033 – 0,1	7
	0,1 – 0,2	8
Terrain Forms	>0,2	10
	Convex-Divergent	1
	Rectilinear-Divergent	2
	Concave-Divergent	3

	Concave-Planar	4
	Rectilinear-Planar	6
	Convex-Planar	7
	Convex-Convergent	8
	Rectilinear-Convergent	9
	Concave-Convergent	10
Slopes (%)	0 - 2	1
	2 - 4	2
	4 - 6	3
	6 - 8	4
	8 - 10	5
	10 - 12	6
	12-15	7
	15-20	8
	20-30	9
	>30	10
Drainage Density	0 – 0.33	1
	0.33 – 0.44	2
	0.44 - 53	4
	0.62 = 0.63	6
	0.63 – 0.76	8
	>0.76	10
Land Use	Forest Formation	
	Water Bodies	1
	Grassland	
	Cerrado	2
	Forestry	4
	Pasture	6
	Perennial Crops	7
	Semi-Perennial Crops	8
	Bare Soil	10
Urbanization Distance	Urban	10
	<370m	10
	370 – 840m	9
	840 – 1400m	7
	1400 – 2000m	4
	2000 – 2600m	3
2600 – 3500 m	2	
	>3500 m	1

Both in human thinking and in the interactions of nature, relationships have degrees of uncertainty. Most spatial phenomena demonstrate degrees of vagueness and uncertainty, expressed by the lack of clearly defined boundaries between spatial characteristics, such as the transitional bands between soil types not showing abrupt disruptions (KAINZ, 2007).

The data used in this work are no different: they do not have defined limits, which directly reflects variations in judgments and classifications, which prevents analyzes from being made on binary scales, such as black and white, 0 and 1.

Seeking to face this problem Zadeh (1965) introduced the theoretical basis of fuzzy sets, which are classes of objects with continuous degrees of association, characterized by a function of affiliation that assigns to each element a degree of affiliation that varies between 0 and 1.

In this case, the degrees of affiliation corresponds to the variation in the vulnerability of soil ecosystem services and, as the scores attributed to the elements of each parameter vary from 1

to 10. The application of the fuzzy inference normalizes and standardizes them on a scale of 0 to 1, from the linear operator, where values closer to 0 refer to lower vulnerabilities and those that target 1 demonstrate the greatest local vulnerabilities.

The normalization/standardization procedure by fuzzy aims to model the input data with greater proximity to the one performed, seeking to improve one of the main functions (and challenges) of the geographic information systems: The digital representation of the elements present in the landscapes.

Constructing the analysis clusters and Generating the vulnerability chart

After standardization (fuzzy), the characteristics of each parameter were defined, three analysis clusters, being Geoenvironmental, Topographic, and Anthropic, as shown in Table 6-3. The structuring in clusters gathered the data with correlated themes and aims to better determine the contribution of the parameters to the model by avoiding overvaluing or devaluing some input data as can occur when they are integrated one by one, thus contributing to a more efficient MCDA.

Since the multicriteria analysis works with several input parameters, it is required a hierarchical structure that aims to assist in defining the contribution of each parameter analyzed to the model, both for the construction of clusters, as well as to provide the basis for the final aggregation that generates the vulnerability map of the ecosystem services of soil.

One of the most recognized importance determination techniques in academia is Priority Hierarchical Analysis (AHP). Proposed by Saaty (1980), AHP consists of a mathematical model that allows organizing the input data and determining the relative importance between criteria, evaluating the consistency of the judgments (MOREIRA *et al.*, 2001).

The application of AHP requires the construction of a pair comparison matrix where the elements considered relevant to the decision process are compared with each other, assigning numerical values that express judgments of preferences of one factor against the other. As suggested by Vargas and Saaty (1991), the numerical scale of comparative values should vary from 1 to 9, demonstrating the intensity of importance. Table 6-3 presents the Vargas and Saaty numerical scale:

Table 6-3 AHP Numerical scale

Intensity of Importance	Description
1	Equal Importance
3	Moderate importance of one factor over another
5	Strong or essential importance
7	Very strong importance
9	Extreme importance
2,4,6,8	Intermediate Values

The result of the application of the AHP is the demonstration of the relative importance (in percentage) of each element introduced to the model, indicating values for the weighted overlay of layers, an essential function of geospatial analysis that produces new maps from the overlay of pre-existing (FERREIRA, 2014).

In this study, the map overlay technique known as Weighted Linear Combination (WLP) was used. This is a decision rule for deriving composite maps using geographic information systems and is widely accepted and used in academia (MALCZEWSKI, 2000).

For the construction of the layers related to the 3 analysis clusters, AHP was applied between the parameters that compose them, thus defining the relative importance of each to their respective cluster, using the extAhp 2.0 application (MARINONI, 2015), within ArcGis 10.8. After this definition, we applied the WLP to overlay the layers, thus generating the layers of interest to the model, according to the following equation:

$$\text{Cluster } (x) = (\text{Parameter } x * \text{relative importance}) + \dots (\text{Parâmeter } n * \text{relative importance})$$

The generation of the final vulnerability map of the ecosystem services provided by the soil occurred in two stages: the WLP between the previously defined clusters and the defuzzification of the result.

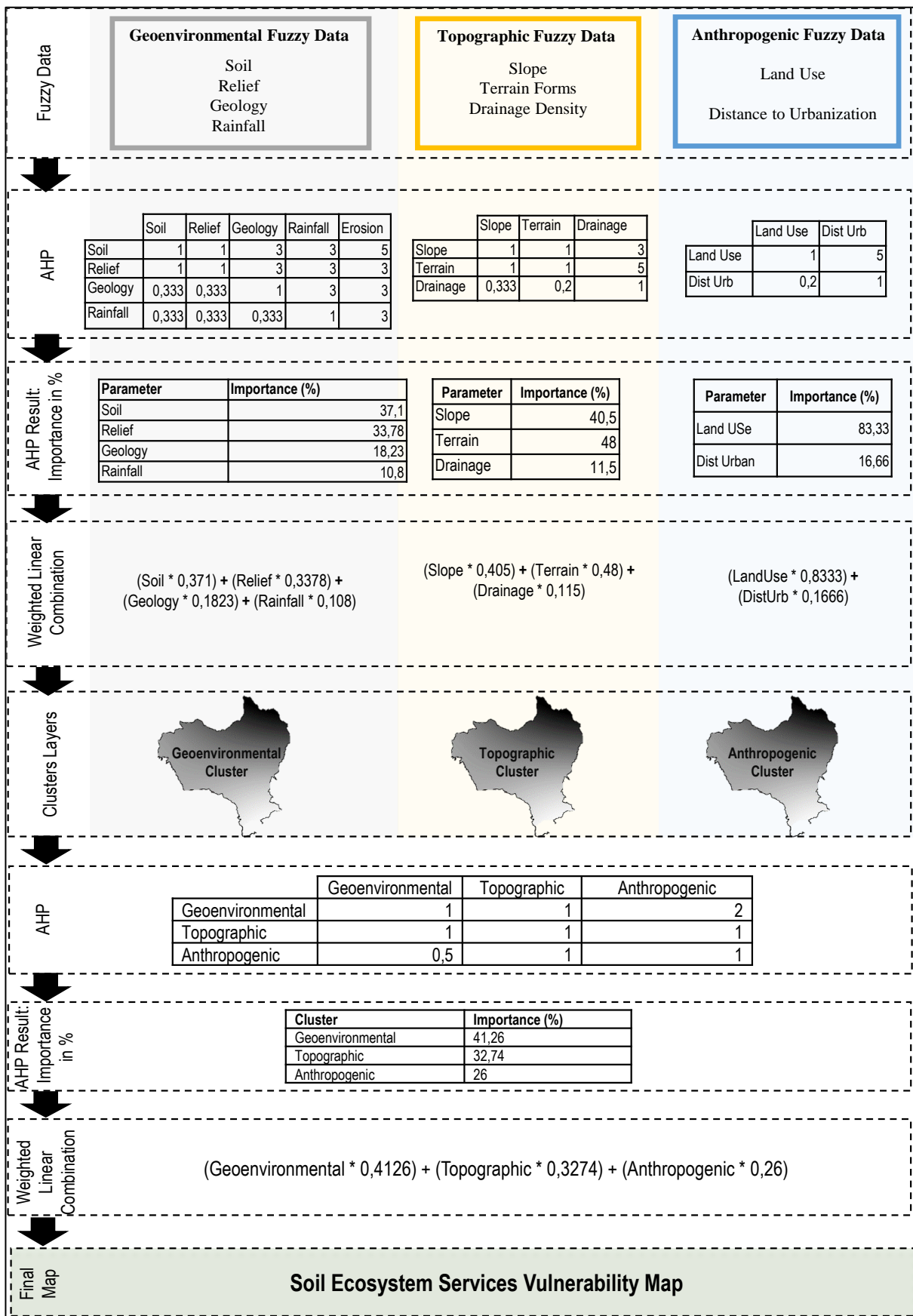
Thus, an AHP was applied between the clusters seeking to define the relative importance of each one, thus promoting the bases to the WLP that performed the overlay of the maps, according to equation 1:

$$FM = (\text{Cluster } g * ri) + (\text{Cluster } t * ri) + (\text{Cluster } a * ri)$$

Where: FM = Final Map, Cluster g = Geoenvironmental Cluster, Cluster t = Topographic Cluster, Cluster A = Anthropogenic Cluster and ri = Relative Importance from the AHP analysis.

Figure 6-3 illustrates the application and results of AHP both for the construction of the clusters and for the generation of the final map.

Figure 6-3: Application and Results of AHP both for the construction of the clusters and for the generation of the final map



Finally, to make the results obtained by the final map compatible in zones of the vulnerability of soil ecosystem services, the cells of the final product were defuzzified (reclassified) according to their degree of vulnerability, as shown in Table 6-4, applying another fuzzy membership function:

Table 6-4 Defuzzification values to the model

Soil ES'S Vulnerability	Range of Values (Fuzzy)
Low	0.00 – 0.25
Moderate	0.25 – 0.50
High	0.50 – 0.75
Very High	0.75 – 1.00

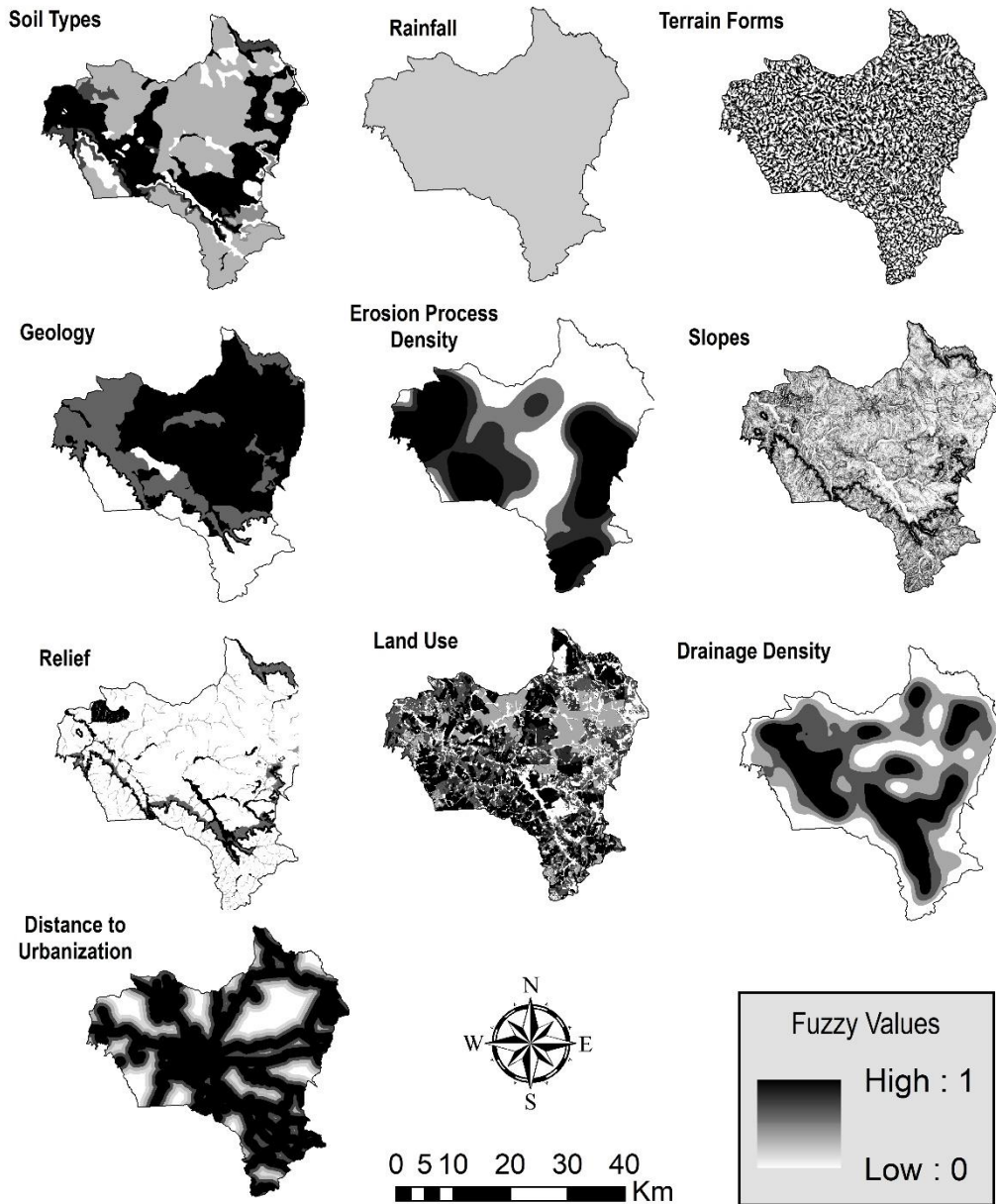
6.3 Results and Discussion

6.3.1 GIS parameters used in the model

The multicriteria analysis in GIS required the generation/adaptation of several parameters from geolocalized data. Such parameters were previously treated and standardized for a fuzzy scale, according to the vulnerability that their attributes promote to the landscape.

The overlay of these generated layers produced the final vulnerability map of the soil ecosystem services. Figure 6-4 shows the cartography of the parameters used in the model.

Figure 6-4 Model Parameters



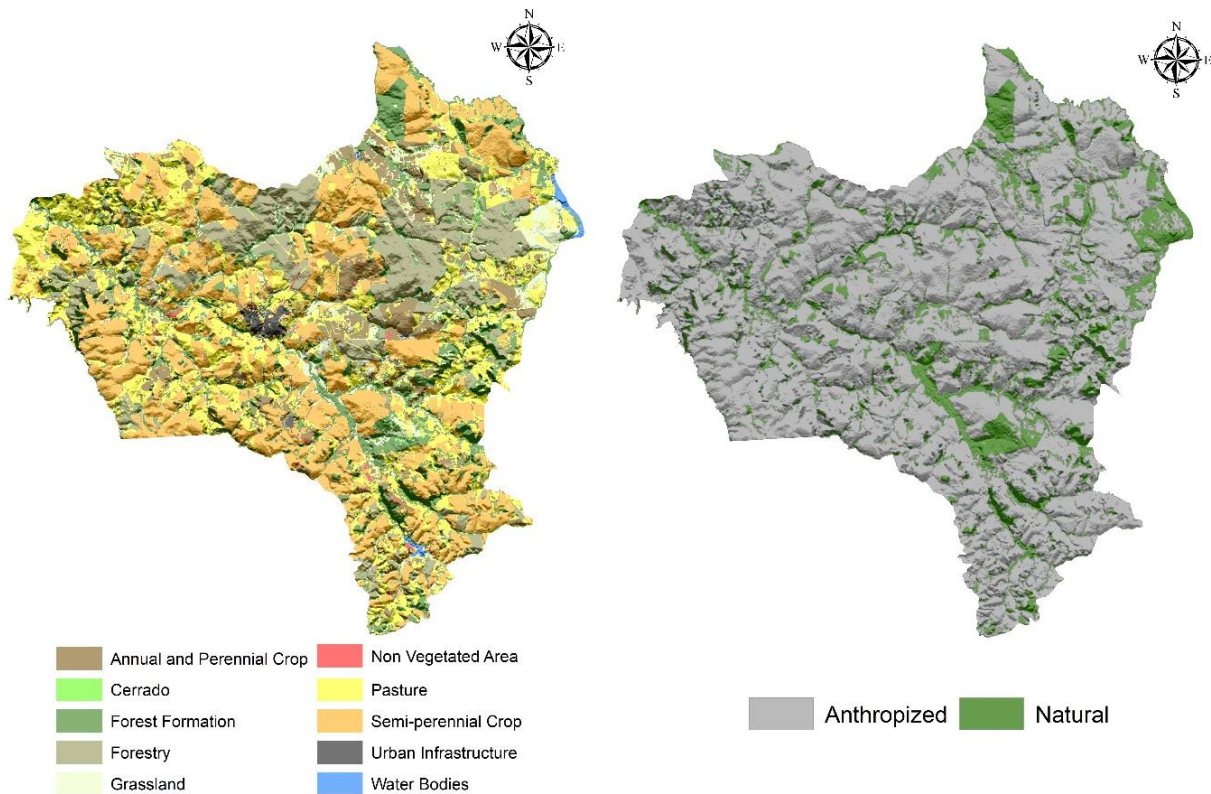
6.3.2 Land Use and Soil Ecosystem Services Vulnerability Chart

Ab'saber (2012) proposes that landscapes are heritages. Heritages of the physiographic, biological, and collective heritage of peoples, where all spheres of society have responsibility for the use of these unique heritages, do not occur in a predatory way. Thus, it is worth emphasizing the importance of knowing the potentialities and limitations of the landscape to propose reasonable indications of preservation and dynamic balance of the ecosystems inherited by us.

Soils, as a basic element for human and ecological interactions (BLUM, 2005), are a heritage of special interest for the municipality of Brotas, given that local economic activities and social relations depend directly on this resource, through the provision of ecosystem services.

Analyzing the land use map (Figure 6-5), it is noted that the appropriation of this landscape by humans expressive, since 78% of the territory is currently used for human activities, such as sugarcane monocultures, coffee, eucalyptus cultivation, and pastures, maintaining only 22% of natural formations.

Figure 6-5 Land Use map and Natural vs Anthropized areas map



The relatively low occurrence of forests, fields, and savannahs in the municipality of Brotas raises the concern that such cover plays a key role in protecting and improving soil ecosystem services, especially in developing countries (such as Brazil) that are highly dependent on natural resources (PEREIRA et al., 2018).

Even though the amount of natural vegetation cover is incipient to produce favorable environmental sustainability, the areas diagnosed in Brotas are still higher than those mapped by the Forestry Institute in the Tietê Jacaré River Basin (to which Brotas belongs), in the order of 14.5%.

The human activities that occur in Brotas are directly linked to ecosystem services of the productivity provided by soils, a factor demonstrated by Manzatto et al. (2009), where the authors state that the Cerrado areas have a high aptitude for crops such as sugarcane. This factor is

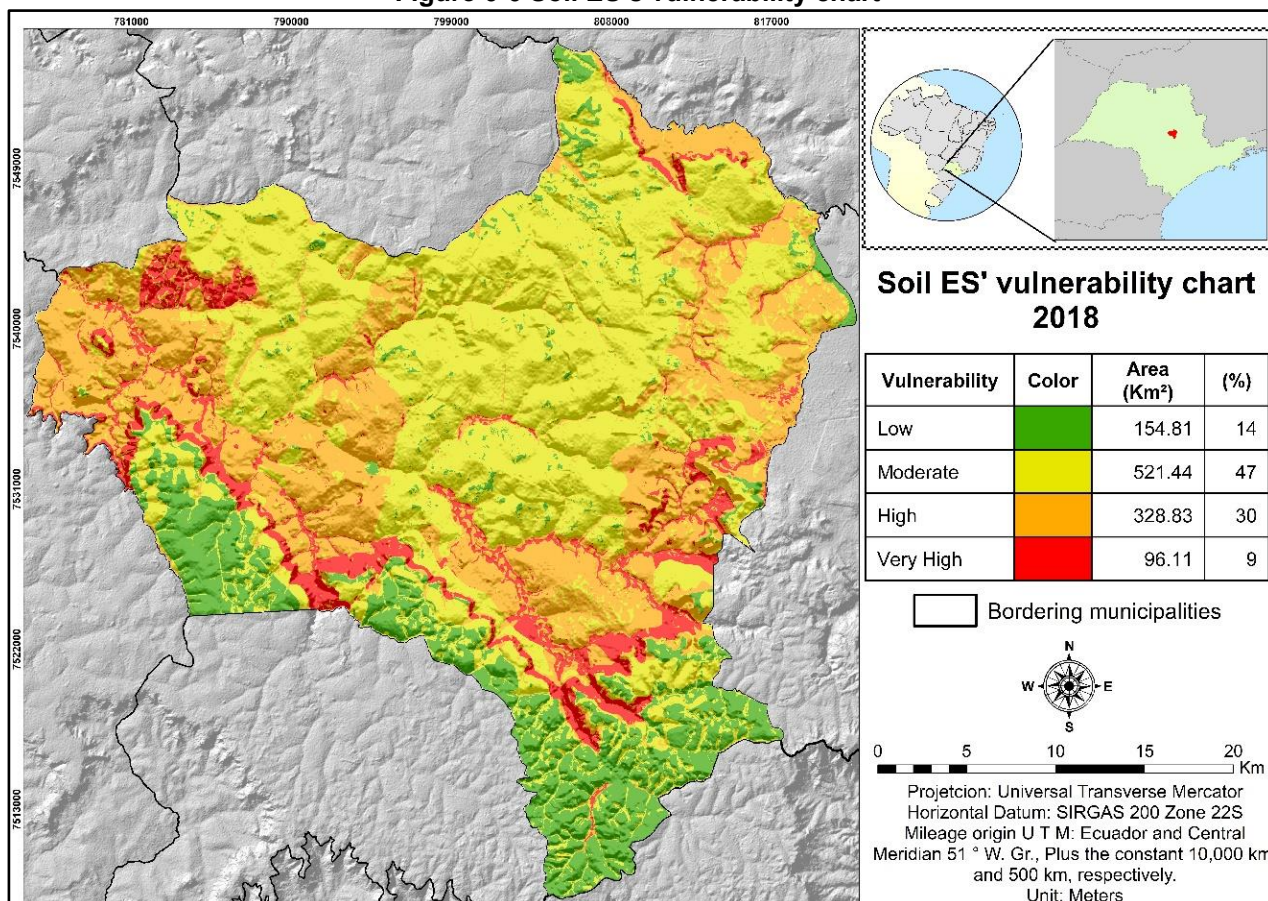
substantiated by the fact that the region close to Brotas has one of the highest concentrations of occurrence of sugar and alcohol plants in operation today.

These ecosystem services that depict fitness for agricultural productivity are described and cited with different nomenclatures by authors as Olson et al. (2017) e Pereira et al. (2018). However, it is important to take into consideration what also proposes Olson et al. (2017), which indicates that such services also encourage the conversion of natural systems into agricultural areas, creating a paradox between the development of traditional agriculture and the attempt to achieve a more sustainable model that promotes food security for local inhabitants.

The applied model, based on a structure in GIS / Multicriteria analysis, produced the vulnerability map, which indicates the areas where ecosystem services for quality maintenance, retention, and erosion prevention, provided by soils, are most vulnerable to loss of quality or extinction. The model took into account the interaction between the local physiographic characteristics with the interventions performed by humans, determining a cartographic product consistent with the 1: 50,000 scale.

The vulnerability map of soil ecosystem services (Figure 6-6) shows a substantial predominance of the "Moderate" class, with 47% of territorial occurrence, followed by "High" (30%), "Low" (14%), and "Very High (9%).

Figure 6-6 Soil ES's vulnerability chart



6.3.2.1 Low Vulnerability Areas

The low vulnerability of soil ecosystem services areas represents 14% of the territory of Brotas (154.81km²), mainly concentrated in the southern region of the municipality. Figure 6-7 presents a spatial panorama for this class, showing all the parameters used in the model.

These are areas with an average slope of 7% that make up a relief essentially of hills (84%) and low plateaus (12%), also containing mostly divergent terrain forms, Oxisols (red and red-yellow) and geology of the Itaqueri and Serra Geral formations.

This composition of geoenvironmental attributes reflects, according to studies like Moraes et al. (2020), in structurally stable areas, where both the action of pedogenesis and anthropic activities have less influence on the local dynamic stability and, consequently, on the ecosystem services analyzed.

Considering land user land cover, the diagnosis is that 23% of the total represents natural formations (higher than the average for the entire territory - 22% - and higher than in all other classes of vulnerability mapped).

Even so, the flatlands and the fertile Oxisols are conducive to potentially degrading activities that take place on the site, such as sugarcane monocultures, which are still one of the main economic activities in the region (GUERRERO *et al.*, 2018; IBGE, 2018; MANZATTO *et al.*, 2009).

From the results described above, it can be affirmed that the areas of low vulnerability are territorial portions where there is a greater probability of efficient provision of ecosystem services without disturbances, both anthropic and natural fragilities of the local landscape.

Then, they configure places where there is a positive influence on ecosystem services for resistance to erosion processes and soil retention, with greater resilience in terms of maintaining quality for various purposes.

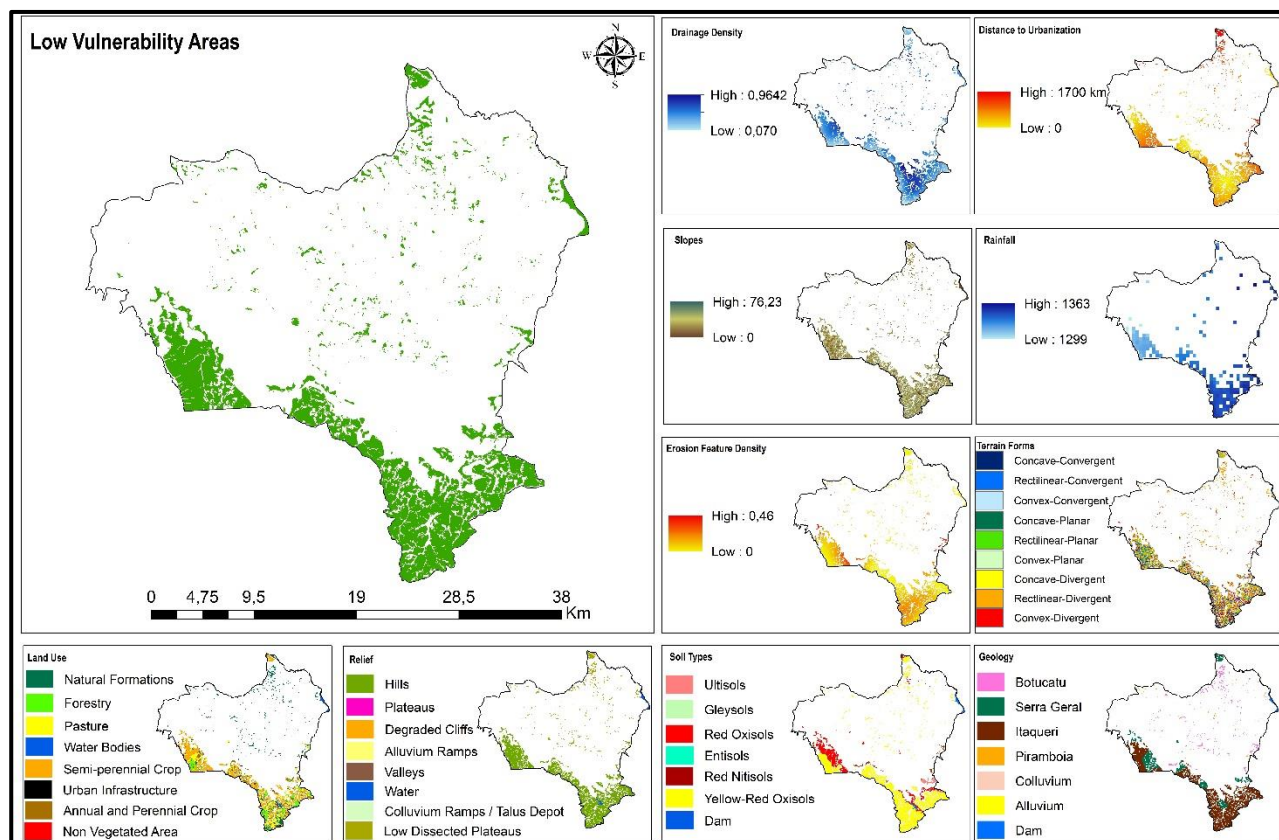
Thus, they are more appropriate places for the insertion of activities with a greater potential impact on the territory (industries, monocultures), but it is worth mentioning that environmental impact control measures must be taken so that this class does not evolve to moderate or high vulnerabilities.

It is also recommended to make the remaining forest composition compatible with the current environmental legislation, both for the areas of permanent protection (along the banks of the rivers and hilltops), as well as the percentage of maintenance of forest formations that farmers have to promote in its properties, considering that the occupation by natural formations is relatively low.

The need to promote conservation practices in the environmental management process in this region is reinforced by the 11 erosive processes diagnosed in the study area by Moraes *et al.* (2020), located in transition areas with the “moderate” class, in sugarcane crops and in drainage headwaters.

The presence of erosive processes proves that even in areas of low vulnerability, incorrect practices of land use (such as intense mechanization, crops without proper management, and appropriation of conservation areas) can cause serious impacts to local ecosystem services.

Figure 6-7 Low vulnerability areas characterization



6.3.2.2 Moderate Vulnerability Areas

As the class with the greatest territorial representation, the areas of moderate vulnerability occupy 47% of the study area, with distribution throughout the entire municipality, but with greater concentrations in the northern and central portions (Figure 6-8).

These are already areas where the relationship between local geoenvironmental attributes and land use results in greater conflict over the provision of ecosystem services in relation to the class of low vulnerability.

Its territorial composition consists of reliefs of low dissected plateaus and hills, yellow and red-yellow Latosols, geologies of the Botucatu, Pirambóia, and Itaqueri formations, containing a low density of mapped erosive processes.

The characteristics that stand out are the low slopes, forms of terrain essentially divergent or planar and the low drainage density, factors that influence lower flow energy on the slopes, contributing directly to a lower particle drag rate and maintaining soil quality.

As for use, it is noted that there is 16% of natural coverage (forests, water, fields, and savannah) mainly around rivers and some mandatory preservations (parcels that farmers are obliged to preserve).

The most spatially significant land uses in the area are sugarcane monocultures (32%), forestry (20%), pastures (16%), and annual crops (10%), demonstrating their degree of anthropization resulting from the facilities that flat areas constitute.

Although the relief contributes to lower energy rates on the slopes, the moderate areas have a significant presence of rocks from the Botucatu and Pirambóia formations, which, due to their sandy characteristics, are highly susceptible to the loss of ecosystem services caused by erosion (PEIXOTO, 2010b).

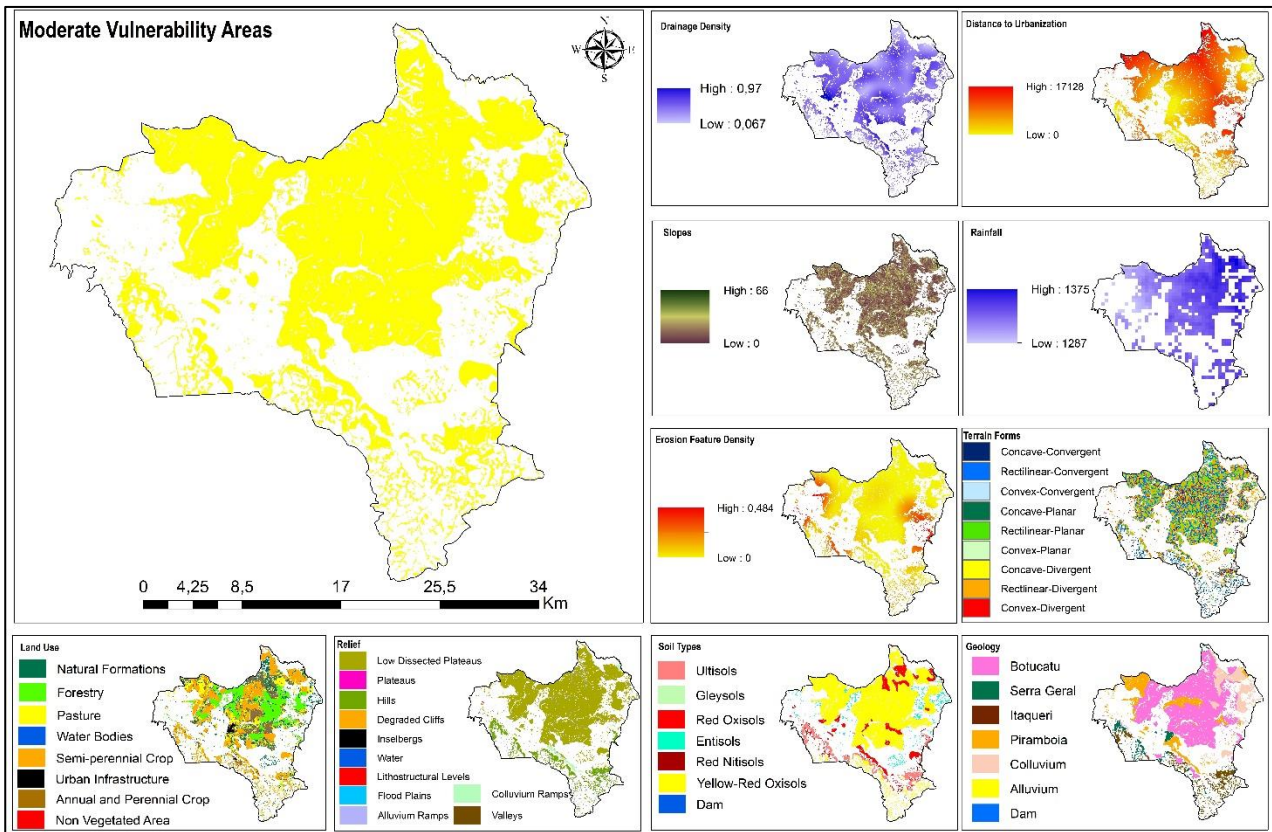
In addition, the lack of proper management and practically unrestricted use of pesticides in sugarcane monocultures (ANDRADE *et al.*, 2011; RONQUIM, 2010), combined with mostly flat terrain and sandy geology, sets up a scenario that refers to contamination and the consequent loss of related ecosystem services (CRUZ *et al.*, 2008; SILVA BARBALHO and BORGES DE CAMPOS, 2010).

The arguments presented in the two previous paragraphs expose a difficulty that occurs in several areas (not only the Cerrado) in Brazil: the compatibility between potentially productive areas and the conservation of ecosystem services. Authors like Klink and Machado (2005) indicates that one of the main challenges is to demonstrate the importance of biodiversity for ecosystems and human activities.

Following this line of analysis, it is advisable for this zone to refer to the inspection of the full compliance with what the current environmental legal instruments delegate, such as APP's and legal reserves (RL), aiming to reduce the conflict between agricultural practices and provided ecosystem services.

These instruments aim to protect environmentally sensitive areas (APP'S) and maintain a part of rural properties with native vegetation (RL), having positive impacts on several ecosystem services, such as biodiversity protection, climate regulation, water security, biological control, human health, economic gains, in addition to those analyzed in this study - maintaining quality, retaining and preventing soil erosion (METZGER *et al.*, 2019).

Figure 6-8 Moderate vulnerability areas characterization



6.3.2.3 High Vulnerability Areas

The 328.83 km² (30%) of the municipality was diagnosed as “High Vulnerability” (Figure 6-9). The most prominent geoenvironmental constraints are highly dissected reliefs, colluvium ramps, escarpments and flood plains, the geology of the Botucatu, Pirambóia formations, and colluvium deposits, entisols, high density of erosion processes, and high drainage density.

Such environmental configuration, combined with high slopes (>20%) and converging terrain shapes, accentuate the dynamics of surface and subsurface flows, causing instability in soils and their ecosystem services. Another factor that aggravates the situation is the influence of the kinetic energy of the rains in hot and humid environments like Brazil (GUERRA, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2018), illustrated by high rainfall levels, especially in the summer.

As for land use, 24% of this area is covered by areas of natural vegetation, a good number that is explained by the fact that the majority of these forests are in areas of high declivity or in regions where the conjuncture of physical aspects prevents or makes it difficult anthropic intervention.

On the other hand, pastures and agriculture correspond to 53% of the territory, which in environmental conditions such as those diagnosed in these areas, corroborates extensively with the degradation of ecosystem services.

Proving the relationship between use and degradation exposed above, the study of Moraes *et al.* (2020), identified 51 erosive processes (scars from landslides, ravines, and gullies) in this area, which occur mainly due to poorly managed pastures and agricultural production under unfavorable geoenvironmental conditions.

Knowing that erosive processes have a direct impact on the quality of local ecosystem services (FU *et al.*, 2011), it is imperative to carry out measures to recover degraded areas and prevent the occurrence of new processes.

With regard to planning/prevention actions, the concept of land use planning emerges as a real possibility of facing environmental conflicts. In this study, land use planning consists of analyzing local potentials and restrictions and taking actions that respect the productive capacity of soil ecosystem services, which means rationally using landscapes in order to resolve conflicts caused by competition for natural resources, in particular, soils (MAFRA, 2012).

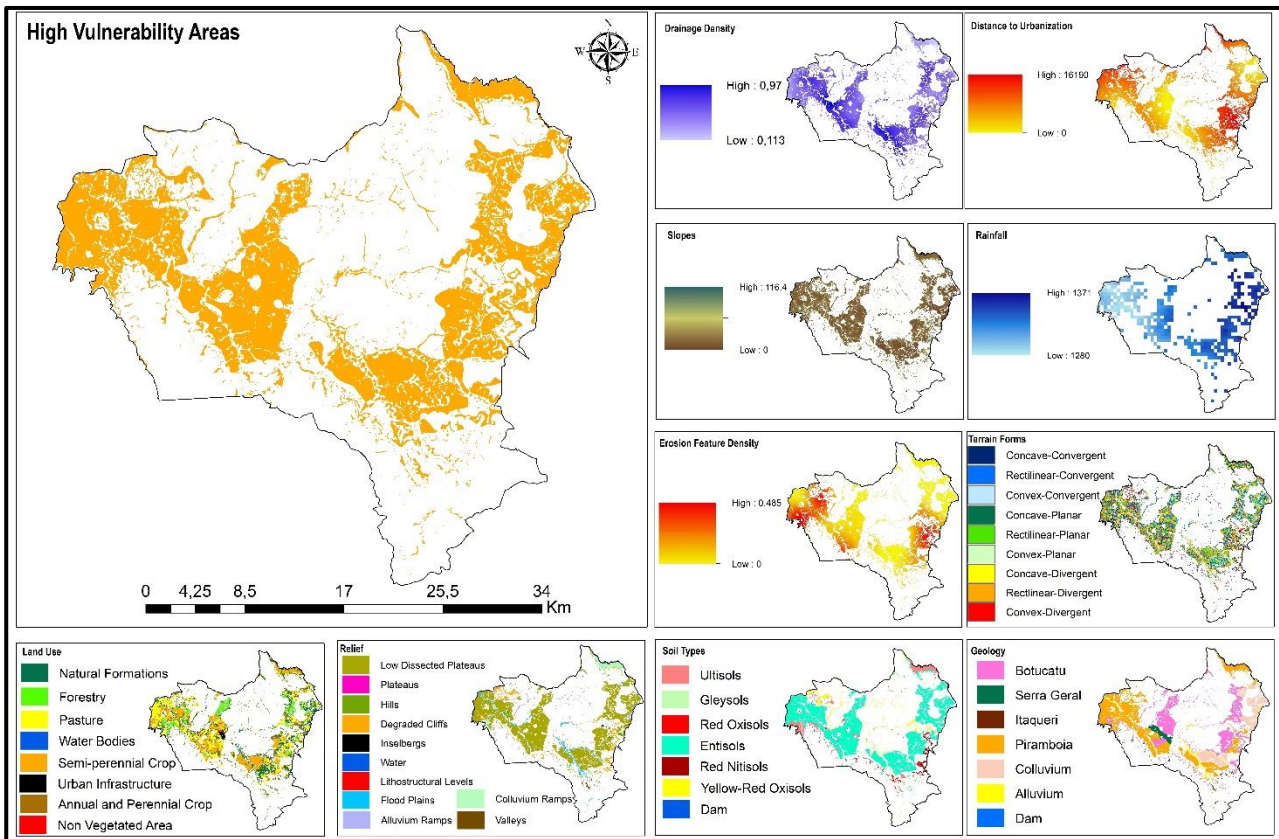
Under conditions such as Brotas' area, Zonta *et al.* (2012) proposes the implementation of recovery practices related to reforestation, green manure, rotating pastures with periodic reseeding, cultivation in contour lines (reducing the influence of crops on the energy flow of the slopes) and the implementation of no-tillage (since plowing removes the superficial layers of the soil, leaving it susceptible to dragging).

Among the methods mentioned above, Falcão *et al.* (2020) proposes that, for areas of the Brazilian Cerrado, reforestation is one of the most effective in combating the loss of soil ecosystem services, stating that the conversion of degraded areas to Cerrado vegetation increases the rate of natural infiltration reducing the surface flow and increasing soil retention.

In this scenario of land-use conflicts and degradation of the landscape, it is recommended to legally equip and inspect territorial management tools that contribute to a more sustainable territorial ordering, thus conserving as much of the ecosystem services as possible.

Instruments that have already been used with relative success in Brazil can be applied, such as payment for services (MATAVELI *et al.*, 2018), creation of private reserves of natural heritage (RPPN's) (BRAZIL, 2006; SÃO PAULO, 2006), and inspection of legal reserve areas (METZGER *et al.*, 2019). These instruments can financially and/or legally encourage small, medium, and large rural producers to establish conservation practices for natural vegetation in favor of maintaining essential ecosystem services.

Figure 6-9 High vulnerability areas characterization



6.3.2.4 Very High Vulnerability Areas

Representing 96.11 km² (9% of the total), these are the areas with the greatest vulnerability of soil ecosystem services in the study area, that is, they are places where the dynamic balance of ecosystems is easily deteriorated due to the interaction of local natural characteristics with anthropic uses.

According to the results obtained in this study, we can divide the areas of very high vulnerability diagnosed into 2 portions: 1- areas with very high slopes, where there is a low presence of anthropic activities due to the extreme constructive difficulty, and 2 - conflict areas between an expressive vulnerability and degrading uses.

The first portion, as shown in Figure 6-10, forms a “belt” in the east-west direction of the municipality with representation also in the extreme northeast, and is structurally bounded by largely degraded escarpments, highly embedded valleys, colluvium ramps, and flood plains.

With geology essentially from the Pirambóia formation, covered by Entisols and with converging terrain forms, this region is highly propitious for mass movements and soil erosion losses (MORAES *et al.*, 2020).

The second portion, which has its edges directed to the interior of the municipality, presents, as a difference from the previous portion, only milder slopes (between 16 and 30%) in a lesser degree of notching and dissection.

Both portions have a high drainage density, with several drainage headwaters on high slopes that directly contribute to the dissection of the relief, making hydrological processes much more active in local pedogenesis, thus hindering the promotion of soil ecosystem services.

As already mentioned, the difficulty of implementing anthropic activities means that approximately 40% of these areas are currently covered by natural formations. However, the land-use chart identified that 30% of the site has pastures and 10% agricultural crops, a factor that raises concern in the face of the geoenvironmental scenario.

From the analysis of the local land structure and human occupation, it is possible to state that in these areas, the main ecosystem services affected are those related to soil retention, due to the low maintenance capacity that the model offers.

In these areas, highly restrictive use is recommended, that is, given the risks to ecosystem services and socio-environmental risks, it is essential to avoid any anthropic use in the area.

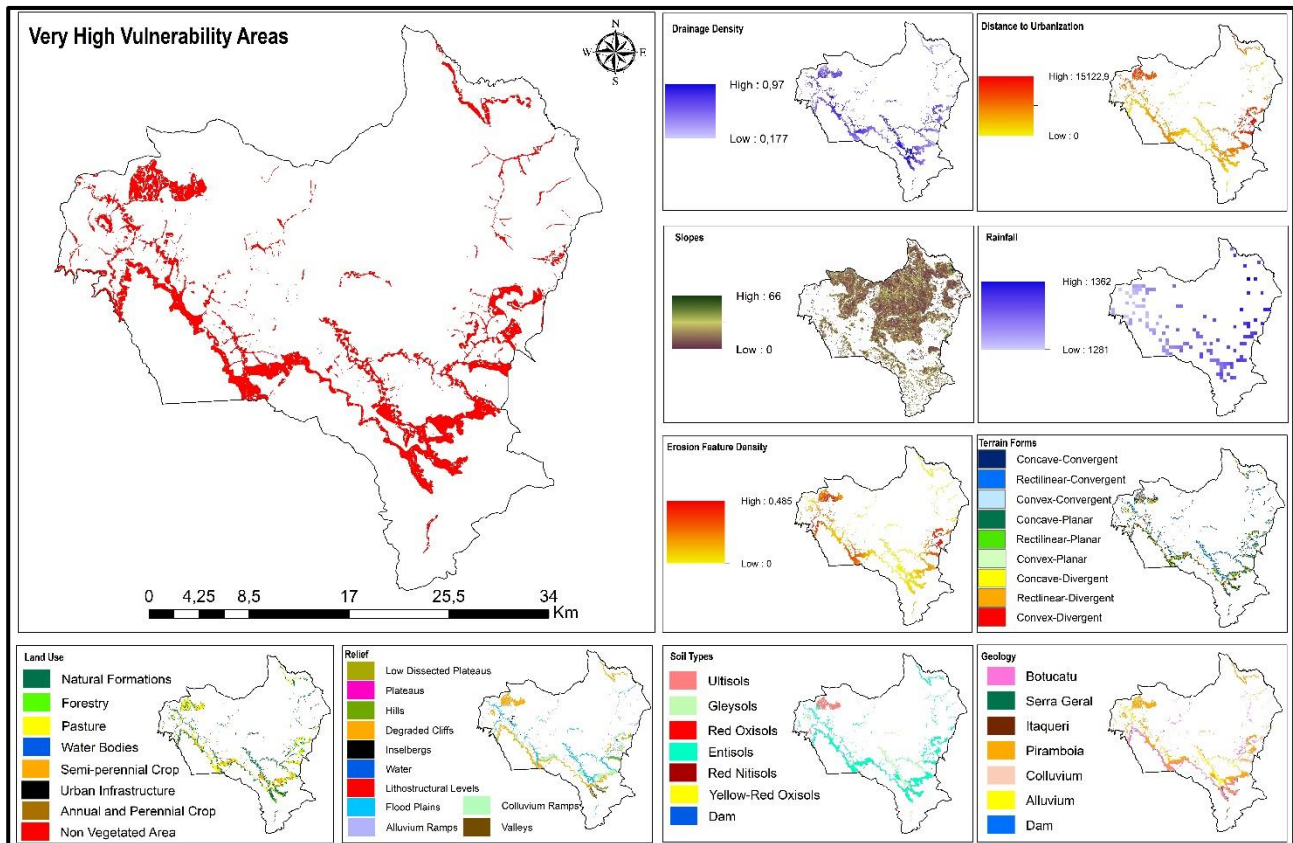
Currently, Law No. 12,651 / 2012(BRAZIL 2012), which provides for permanent preservation areas, legally covers a large part of these areas, precisely because they fit into the banks of preserved rivers, springs, and hilltops. However, the scope of the Law is not sufficient for this region, as it does not contain 100% of its territory in view of the risks it offers.

Thus, it is important that governmental spheres act strictly in restricting the use of these sites and, as a recommendation, assign them the character of a Conservation Unit.

The Conservation Units represent a legal provision established by Law No. 9.985 / 2000 and which are defined as a territorial portion with relevant natural characteristics, legally instituted by the government, which apply adequate guarantees of full protection (BRAZIL, 2000).

This definition fully meets the needs diagnosed in this study, demonstrating that there are currently territorial management instruments capable of mitigating the degradation of essential ecosystem services, leaving only the gap in the real efforts of managers in the implementation of conservationist policies in favor of the sustainability of Brazilian landscapes.

Figure 6-10 Very High vulnerability areas characterization



6.4 Conclusions

The understanding that geographic analysis belongs simultaneously to geosciences and human sciences reflects their ability and responsibility to participate in the interactive process between society and nature, thus producing a complex system of socio-spatial arrangements, expressed in identifiable landscape units. (CONTI, 2001).

From this reflection, it is possible to note the works related to landscape cartography have social and environmental responsibilities, aiming to make the maintenance of the quality of life of the inhabitants compatible with the conservation of essential ecosystem services that maintain ecological balance.

Thus, in the context of this study, the diagnosed vulnerability areas acted as guiding elements in proposing territorial planning strategies since they spatially identify the potential and restrictions of the territory.

When it is taken into account that it is not feasible to replace all potentially degrading uses with natural formations, environmental cartography is a tool that contributes to the reconciliation of land-

use conflicts in Brazilian ecosystems by allowing more efficient planning of landscapes from the identification of its potentialities and restrictions.

The vulnerability mapping of soil ecosystem services on a planning scale (1: 50,000) aimed to diagnose the potential and restrictions of the local landscape, allowing to support the soil planning process, that is, to use the territory according to the productive capacity ecosystem services.

Thus, we diagnose areas (zones) according to their vulnerabilities. Such a diagnosis showed that 39% of the territory of Brotas has High or Very High vulnerabilities, indicating areas that need recovery, conservation, or use restrictions in order for their ecosystem services to be preserved.

Even areas considered to be of Moderate or Low vulnerabilities require planning and management processes, mainly for the full compliance with the current environmental legislation, considering that these areas are potentially sensitive to class changes towards greater restrictions.

The implementation of a model based on environmental cartography based on the diagnosis of natural and anthropic conditions of the landscape proved to be an essential tool in the planning process, mainly due to its ability to diagnose, analyze and propose planning guidelines with efficiency, low relative cost and replicable character.

Finally, we hope that the model demonstrated in this work will act as a methodological inspiration for other planning processes in the Brazilian Cerrado, aiming at the conservation of natural resources and the solution of land-use conflicts.

CAPÍTULO 7 ZONEAMENTO GEOAMBIENTAL

ZONEAMENTO GEOAMBIENTAL VOLTADO AO DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL SUSTENTÁVEL DO MUNICÍPIO DE BROTAS, SP.

Resumo: Esse estudo visou integrar o conceito de serviços ecossistêmicos na perspectiva do planejamento territorial municipal por meio da proposição de um zoneamento geoambiental voltado a garantir a capacidade produtiva dos serviços ecossistêmicos essenciais e contribuir para o desenvolvimento sustentável do município de Brotas, SP. Para tal, foi proposto um modelo baseado em sistemas de informações geográficas que contemplasse as potencialidades e restrições territoriais bem como os conflitos de uso do solo visando propor zonas homogêneas que reflitam a realidade ecossistêmica da paisagem. Como resultados, foram propostas seis zonas geoambientais, sendo elas consolidação, expansão, recuperação, restrição, restrições legais e zonas urbanas homogêneas que indicaram a atual situação da capacidade produtiva dos serviços ecossistêmicos e que subsidiaram a proposição de diretrizes de ordenamento direcionadas ao desenvolvimento sustentável do município.

Palavras Chave: Serviços Ecossistêmicos; SIG, Planejamento Ambiental; Ordenamento Territorial

7.1 Introdução

Como um padrão global nas últimas décadas, ações antropogênicas como os crescimentos populacionais e econômicos vêm sendo considerados como vetores diretos dos impactos ambientais, superando a resiliência das paisagens e criando diversos fatores de pressão sobre os ecossistemas (MEA, 2005). Ao levarmos em consideração que o bem-estar das comunidades humanas depende totalmente da qualidade da natureza (RANGANATHAN *et al.*, 2008) os impactos atuais sobre os recursos naturais globais, tais como solos (FAO/ONU, 2015), florestas

(FAO/ONU, 2018) e água (UN-WATER, 2019) trazem à tona uma elevada preocupação acerca do futuro das populações ao redor do planeta.

O Brasil, como um histórico produtor de commodities (VERÍSSIMO e XAVIER, 2014), apresenta como principais fatores de degradação ambiental as transições das formações vegetais naturais para cultivos agrícolas (GARRETT *et al.*, 2018; SCHIELEIN e BÖRNER, 2018), pastagens (COHN *et al.*, 2016), mineração (SANTOS SILVA, dos *et al.*, 2008; SONTER *et al.*, 2014), dentre outros, porém sempre acompanhando o padrão de devastação ambiental e falta de planejamento.

As transições de uso do solo além de remodelarem a superfície da terra, acarretam em impactos negativos sobre os serviços ecossistêmicos (HASAN *et al.*, 2020). Em casos de transformações abruptas (como as ocorridas em território brasileiro) os impactos sobre os serviços ecossistêmicos podem ser irreversíveis (WU, LIANG e LIU, 2019).

Os serviços ecossistêmicos (SE's) têm grande relevância nos estudos ambientais pois são caracterizados como os benefícios que os ecossistemas promovem aos seres humanos (MEA, 2005), introduzindo a conexão entre o desenvolvimento do bem-estar humano com a valorização dos processos naturais (FISHER, TURNER e MORLING, 2009).

É possível afirmar, então, que os serviços ecossistêmicos constituem uma poderosa ferramenta para o planejamento territorial sustentável, principalmente por sua capacidade de auxiliar os agentes tomadores de decisão a entender melhor as dicotomias entre os diferentes cenários de desenvolvimento (RANGANATHAN *et al.*, 2008).

Para o Brasil, como um grande detentor de recursos naturais, a valorização dos serviços ecossistêmicos na perspectiva de planejamento do território é de essencial interesse ao enfrentamento da degradação e ao suporte para o desenvolvimento sustentável. Entretanto, diante da escala continental do país, nota-se que as políticas ambientais locais são as que mais apresentam sucesso.

Nesse sentido, a efetividade de ações de proteção ambiental só ocorre em escala municipal, pois é nos municípios que, na prática, a população exerce suas funções sociais e políticas e ambientais. Corroboram com essa prerrogativa os artigos 1º e 18º da Constituição Federal Brasileira, que promove a autonomia dos municípios inclusive para a proteção do ambiente e de seus recursos naturais (SOUZA, 2012).

Com isso, os municípios brasileiros apresentam competências constitucionais que os tornam atores decisivos no processo de planejamento e gestão ambiental. Ainda assim, nota-se que o estado atual de implementação de políticas ambientais não é suficiente para atingir as metas de sustentabilidade, gerando o desafio de integrar a legislação vigente, os instrumentos de

desenvolvimento urbano e o uso sustentável dos recursos naturais em uma só narrativa (MMA, 2018a).

No momento atual, o principal instrumento de planejamento urbano da política urbana brasileira é o plano diretor (PD) municipal (BRASIL, 2001), uma ferramenta que visa impor regras de ordenamento que proporcionem uma melhor qualidade de vida às populações dos municípios brasileiros (ARAÚJO e LEISMANN, 2020). Indo além das propostas de ordenamento urbano da cidade, o PD também instrumentaliza as principais propostas para a conservação do meio ambiente municipal, principalmente com o auxílio de documentos técnicos como o zoneamento ambiental.

O zoneamento ambiental foi primeiramente proposto pela Política Nacional de Meio Ambiente (Lei Nº6.938/1981) e regulamentado pelo Decreto nº4.297/2002 que o definiu como um instrumento de organização territorial que deve estabelecer regras de proteção do meio ambiente afim de se assegurar a qualidade ambiental, dos solos, recursos hídricos, a conservação da biodiversidade e o desenvolvimento sustentável para melhoria das condições de vida das populações (BRASIL, 2002).

Diante dos argumentos acima apresentados, nota-se que a inserção dos serviços ecossistêmicos dentro dos planos de zoneamento/planejamento ambiental de vem sendo amplamente difundida a nível mundial, como pode ser visto nos trabalhos de (BENDOR *et al.*, 2018; CHAN *et al.*, 2006; CORTINOVIS e GENELETTI, 2018; GROOT, R. S. de *et al.*, 2010; HUANG *et al.*, 2018; RONCHI, 2018; WOODRUFF e BENDOR, 2016). Entretanto, ainda é um desafio ao Brasil dar o devido valor aos serviços ecossistêmicos nas tomadas de decisões do município, com pesquisas e aplicações que retratem essa temática ainda sendo uma lacuna.

Afim de contribuir com o preenchimento dessa lacuna, esse trabalho teve como objetivo a realização de um zoneamento (geo) ambiental voltado a instrumentalizar um documento de planejamento estratégico que contribua à tomada de decisões em escala municipal. Definiu-se, portanto, que o foco principal é a ampliação da capacidade produtiva dos serviços ecossistêmicos locais a partir de um desenvolvimento sustentável.

A estrutura metodológica consistiu em um modelo geoambiental baseado em sistema de informações geográficas que visou primeiramente diagnosticar os serviços ecossistêmicos que estão mais ligados ao atual plano de desenvolvimento municipal. Os SE's essenciais então foram analisados e integrados com auxílio de ferramentas de análise espacial que configuraram as zonas homogêneas que retratam as potencialidades e restrições territoriais do arcabouço ecossistêmico.

Como área de estudo, foi definido o município de Brotas, SP, uma estância turística que apresenta elevados potenciais de prestação de SE's, porém que convive com conflitos de uso do solo que colocam em risco o desenvolvimento sustentável local e o bem-estar tanto dos moradores quanto dos milhares de visitantes que frequentam anualmente.

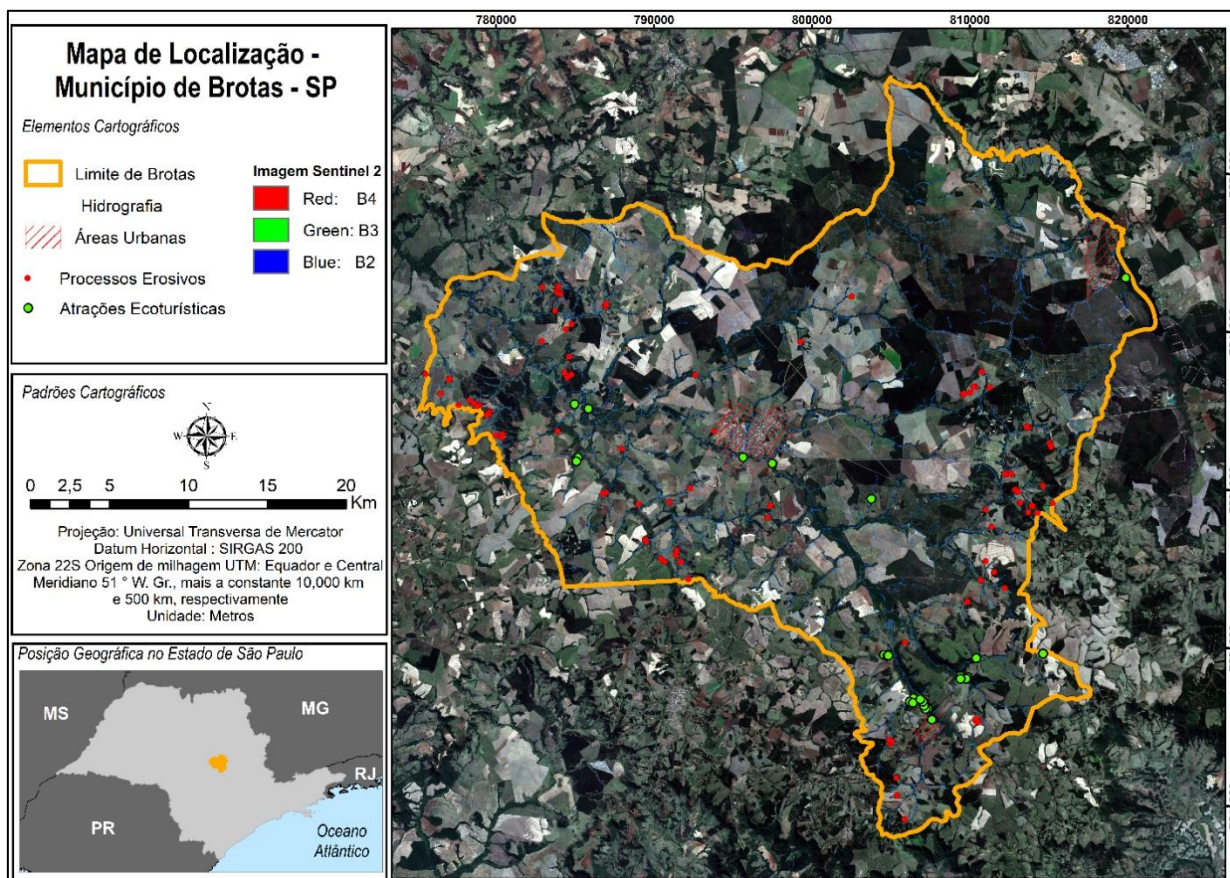
7.2 Materiais e Método

7.2.1 Área de Estudo

A Estância Turística de Brotas é um município que está geograficamente localizado na região central do Estado de São Paulo (Figura 7-1), a uma distância de 235 km até a capital paulista. Sua área total é de 1101.5km², sendo o 28º maior município paulista em extensão (IBGE, 2018).

Sua economia é baseada principalmente na exploração do território para os cultivos tradicionais de cana-de-açúcar e laranja. Entretanto, nos últimos anos, a cidade desenvolveu a capacidade de explorar o turismo de natureza como importante fonte de renda, sendo reconhecida como um dos principais destinos para o ecoturismo de aventura (MARTINS e MADUREIRA, 2019).

Figura 7-1: Localização da área de estudo – Zoneamento



7.2.2 Materiais

Para a realização desse trabalho, primeiramente foi necessária a obtenção dos dados geolocalizados básicos, que consistem em dados topográficos, ambientais e os que representam os serviços ecossistêmicos de interesse. Todos os dados utilizados são demonstrados na Tabela 7-1, bem como suas escalas aproximadas, fontes de obtenção e datas de produção.

Tabela 7-1 Materiais utilizados no Zoneamento Geoambiental

Material	Escala Aproximada	Fonte	Data
Modelo Digital de Elevação	30 m / pixel	JAX	
Carta Topográfica Brotas	1:50.000	IBGE	1970
Áreas Urbanas Consolidadas	1:50.000	IBGE	2010
Unidades de Conservação	1:50.000	SMSP	
Dados geográficos Cadastro Ambiental Rural	~1:50.000	SFB	2018
Mapa de RPPN	1:50.000	SMSP	2014
Carta de Vulnerabilidade dos SE's de Solo	1:50.000	Guerrero et al.	2020
Carta de Vulnerabilidade dos SE's de Ecoturismo	1:50.000	Guerrero et al.	2020
Carta de Vulnerabilidade dos SE's de Águas Subterrâneas	1:50.000	Guerrero et al.	2020
Carta de Uso do Solo	1:50.000	MapBiomias	2018

7.2.3 Método

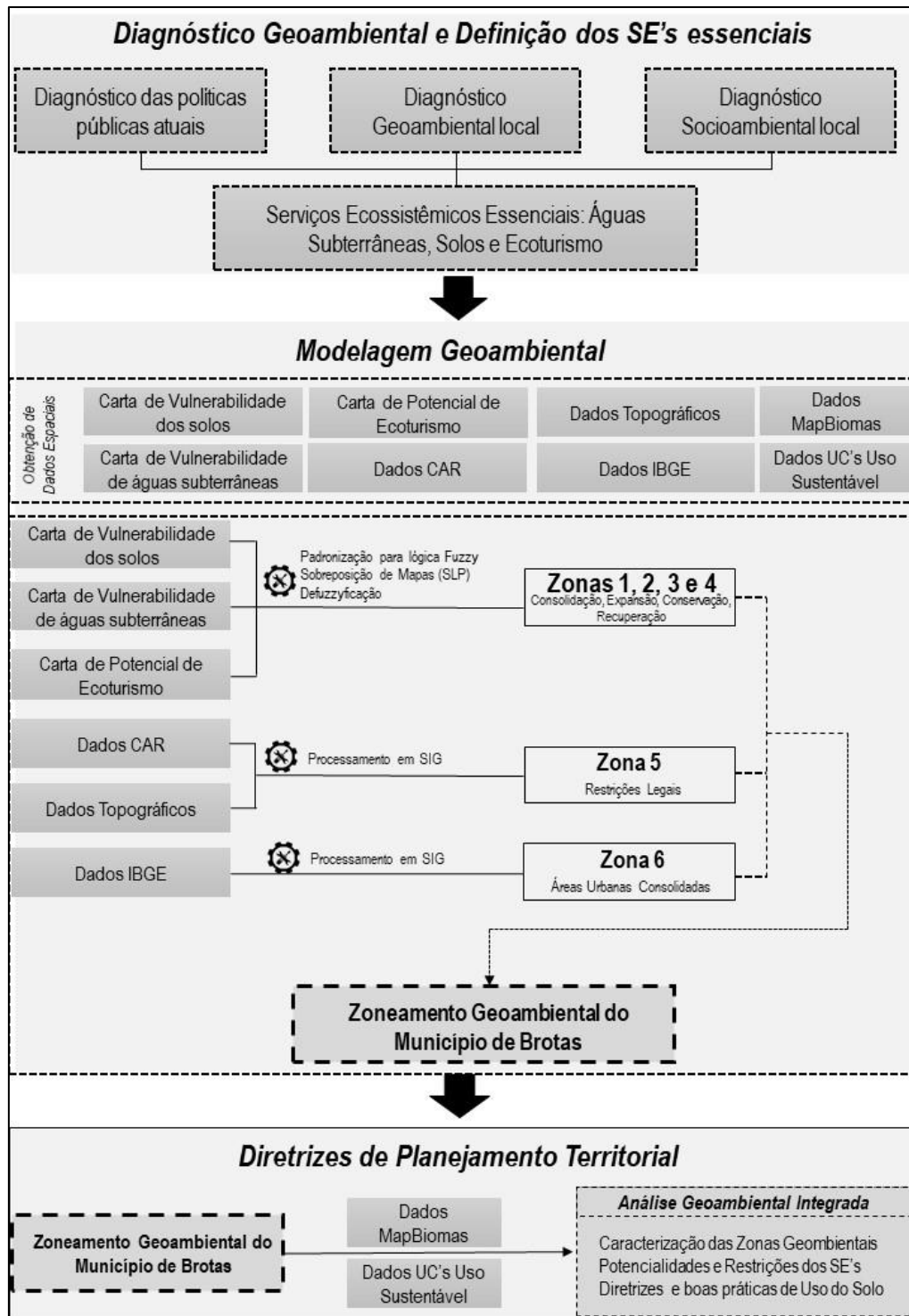
O Zoneamento Geoambiental do município de Brotas foi baseado em técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto com o objetivo de integrar e analisar informações geográficas relacionadas aos serviços ecossistêmicos essenciais locais, à dinâmica da paisagem, e as restrições legais, gerando como resultados zonas homogêneas que refletem as potencialidades, restrições e vulnerabilidades territoriais.

Levou-se em consideração, como precedente teórico, a abordagem ecodinâmica das paisagens proposta por (TRICART, 1977), que entende que os fluxos de energia e matéria se processam em equilíbrio dinâmico, e que tal equilíbrio é diretamente afetado pelas atividades humanas degradadoras. A partir desse pressuposto, o autor propõe que a gestão dos recursos ecológicos deve ter como objetivos avaliar os impactos das atividades antrópicas no ecossistema, determinando taxas aceitáveis de extração de recursos ou mesmo medidas mitigadoras.

A estrutura das zonas homogêneas foi baseada no trabalho de (BECKER e EGLER, 1996), que trata do Zoneamento Ecológico-Econômico como estratégia de planejamento sustentável e indica zonas de ação a partir de potencialidades e restrições do território local.

A Figura 7-2, ilustra os procedimentos metodológicos adotados para a produção do Zoneamento Geoambiental do município de Brotas, que são descritos posteriormente:

Figura 7-2 Procedimentos metodológicos para o Zoneamento Geoambiental



7.2.3.1 Diagnóstico Geoambiental, Definição e obtenção de dados dos SE's essenciais

O diagnóstico geoambiental é a fase primária de qualquer zoneamento territorial e consiste em levantar, organizar e analisar as características da área de estudo, resultando em uma criteriosa combinação de informações específicas e dados espaciais que servem de base aos modelos preditivos e tendenciais (MMA, 2018b).

Para a realização desse diagnóstico geoambiental foi utilizado o método DPSIR, proposto por (KRISTENSEN, 2004) que visa identificar as forças motrizes que alteram a paisagem local, as pressões do território, os impactos causados e as respostas que são aplicadas. Ao final a análise demonstra quais são os serviços ecossistêmicos que estão mais ligados ao plano atual de desenvolvimento do município, assim como propõe (KOSMUS, RENNEN e ULLRICH, 2012).

Levando-se em consideração que o histórico de desenvolvimento econômico e o atual padrão de ocupação do território são voltados essencialmente à agricultura extensiva de cana-de-açúcar, café, eucalipto e laranja e todo o conhecimento prévio de que as monoculturas utilizam extensivamente agroquímicos para aumento de produtividade (SILVA BARBALHO E BORGES DE CAMPOS, 2010), entendeu-se que as principais pressões ao município são provenientes do manejo pouco sustentável de cultivos agrícolas, que geram processos de contaminação de solos e água, erosão, degradação de qualidade de recursos naturais, dentre outros (GOMES E PEREIRA, 2008).

Já a análise do arcabouço geoambiental local, estabelecido pelas inter-relações entre geologia, relevo, solos e clima, identificou as potencialidades e restrições locais que mais afetam a dinâmica territorial local. Nota-se, primariamente, que 85 % do município de Brotas é composto por áreas de recarga do aquífero Guarani, o que contribui diretamente no abastecimento local (BROTAS, 2018) e para o elevado desenvolvimento agrícola local.

Por outro lado, também como causa e reflexo das áreas de recarga do aquífero, o modelado geoambiental local é composto essencialmente por arenitos das formações Botucatu (42%) e Pirambóia (25%) que, apesar de serem a estrutura ambiental que remonta à estrutura de infiltração e armazenamento do aquífero, também promovem fragilidades ao território como processos erosivos e alto potencial de contaminação.

Mais afundo na questão econômica nota-se que, além do histórico de município produtor de commodities agrícolas, Brotas têm se tornado um dos principais destinos ecoturísticos do Brasil, devido principalmente às suas belas paisagens naturais, cachoeiras, mirantes e esportes aquáticos (canoagem, rafting, boia cross), o que confere ao município importante parte de sua renda e destaca a importância dos serviços ecossistêmicos de recreacionais locais (BARROCAS, 2005; GUERRERO *et al.*, 2018; MARTINS e MADUREIRA, 2019; RIBEIRO e AMARAL, 2016).

A partir das análises econômicas e geoambientais locais, é possível determinar que os serviços ecossistêmicos relacionados às **águas subterrâneas** provenientes do aquífero Guarani, dos **solos** como base física para os processos ecodinâmicos e agrícolas, e os recreacionais relacionados ao desenvolvimento do **ecoturismo** local são de fundamental importância ao desenvolvimento socioeconômico e ambiental do município de Brotas. Assim, a partir do diagnóstico geoambiental realizado, são esses os serviços ecossistêmicos norteadores desse zoneamento geoambiental.

Com os serviços ecossistêmicos norteadores definidos, foi iniciada a obtenção dos dados cartográficos necessários para a modelagem geoambiental.

Para os solos foi utilizada a carta de vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos de solo (Capítulo 6), que visou identificar potencialidades e restrições quanto a atual capacidade da paisagem de promover os serviços de retenção de solo, manutenção de qualidade e prevenção à ocorrência de processos erosivos.

Como a atual dinâmica de uso do solo do município de Brotas é direcionada especialmente à agricultura, a análise da água subterrânea se deu a partir da carta de vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos de águas subterrâneas a pesticidas agrícolas (Capítulo 4), gerada a partir do método PESTICID DRASTIC-LU. Esse material cartográfico visa demonstrar os locais onde a relação entre a promoção dos serviços ecossistêmicos de provisão de água potável de origem subterrânea (definida por parâmetros hidrogeológicos) e as atividades antrópicas é conflituosa,

Já para a análise dos serviços de recreação, foi utilizada a carta de potencial ecoturístico (Capítulo 5), que propôs identificar as unidades ecodinâmicas (zonas) locais com maior possibilidade de promoção de serviços ecossistêmicos de ecoturismo, utilizando como parâmetros aspectos geológicos, pedológicos, geomorfológicos, naturais, acessibilidade, dentre outros. Entende-se que as potencialidades ecoturísticas são formas de resiliência no processo de resignificação das paisagens em prol de territórios mais sustentáveis, o que confere especial interesse à essa temática dentro de um zoneamento geoambiental.

7.2.3.2 Mapeamento das áreas de preservação permanente e outras áreas restritivas

Estabelecidas pela lei 12.651/2012, que dispõe sobre o novo código florestal brasileiro, as Áreas de Preservação Permanente (APP's) são áreas juridicamente protegidas que têm a função ambiental de proteger as paisagens, recursos hídricos, a estabilidade geológica, facilitar os fluxos gênicos faunísticos e florísticos, proteger o solo e assegurar o bem-estar das sociedades humanas (BRASIL, 2012).

Como a principal função das APP's é proteger os serviços ecossistêmicos de áreas vulneráveis, considerou-se para esse estudo que tais áreas sejam consideradas como uma zona específica, devido às suas particularidades ecossistêmicas e restrições ao uso. A análise do território de Brotas identificou 6 diferentes tipos de APP's que devem ser respeitadas no município, sendo elas demonstradas na Tabela 7-2.

Tabela 7-2 Estrutura para mapeamento das APPs

Condicionante	Faixa de Proteção
Rios com menos de 10m de largura	30 m
Rios entre 10 e 50 m de largura	50 m
Nascentes	50 m
Declividades	>45°
Bordas de Tabuleiro ou Chapadas	De acordo com o previsto na Lei nº12.651/2012
Topos de Morro	De acordo com o previsto na Lei nº12.651/2012

As APP's de rios e nascentes foram delimitadas com a ferramenta *Buffer* do software ArcGis 10.8 após o mapeamento e caracterização da rede hidrográfica municipal, de acordo com suas respectivas faixas de proteção.

Para as declividades foi pré-processado o modelo digital de elevação (DEM) ALOS-PALSAR com 10m de resolução espacial, sendo utilizada a ferramenta *Slope* para graus decimais. Posteriormente, foram extraídas as declividades locais com valor maior do que 45°.

O DEM ALOS-PALSAR também foi utilizado para o mapeamento das áreas de topo de morro, que respondem às seguintes regras de delimitação (BRASIL, 2012): altura mínima de 100 (cem) metros e inclinação média maior que 25°; as áreas delimitadas a partir da curva de nível correspondente a 2/3 (dois terços) da altura mínima da elevação sempre em relação à base, sendo esta definida pelo plano horizontal determinado por planície ou espelho d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação. Os procedimentos metodológicos desta operação são provenientes de Santos (2013).

Finalmente, as áreas de bordas de tabuleiros ou chapadas são consideradas APP's até a linha de ruptura do relevo, em faixa nunca inferior a 100 (cem) metros em projeções horizontais. Sua delimitação foi proveniente dos dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR), gratuitamente disponibilizados.

Além das APP's, o município de Brotas também contempla unidades de conservação que visam preservar a paisagem e que, neste trabalho, foram divididas em dois grupos: as Unidades de Proteção Integral e Unidades de Uso Sustentável.

As Unidades de Proteção Integral são porções territoriais voltadas à conservação da natureza, onde só é permitido o uso indireto dos seus recursos naturais. Em Brotas essas áreas são

representadas pelas Estações Ecológicas de Itirapina de da Mata do Jacaré e compõe a Zona de Restrições Legais que será descrita mais à frente.

Já as Unidades de Uso sustentável são áreas que têm o objetivo de compatibilizar a conservação natural com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais. Na área de estudo, essas unidades remetem à Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Floresta das Águas Perenes e à Área de Preservação Ambiental (APA) Corumbataí-Botucatu-Tejupá - Perímetro Corumbataí e compõe, nesse estudo, a análise integrada para propor recomendações de usos do solo.

7.2.3.3 Definição das Zonas Geoambientais

O processo de definição das zonas geoambientais homogêneas do município de Brotas consistiu na operacionalização do modelo metodológico com auxílio de ferramentas de geoprocessamento, integrando os dados geográficos básicos (vulnerabilidade de solos, vulnerabilidade de águas subterrâneas, e potencial para ecoturismo).

Os layers com os dados de entrada apresentam quatro classes de análise, indo das mais vulneráveis (menor potencialidade e maior restrição) até às menos vulneráveis (maior potencialidade e menor restrição), de acordo com as particularidades e objetivos de cada um.

Tendo em vista que as múltiplas características da paisagem não apresentam limites bem definidos e nem rupturas abruptas entre classes, a inferência *fuzzy* surge como um procedimento baseado em conhecimento eficiente para se lidar com conceitos inexatos (ZADEH, 1965) e modelar a natureza em ambiente computacional. Os conjuntos *Fuzzy* em SIG são representações matemáticas dos elementos naturais cujas fronteiras são graduais, sendo uma possibilidade que varia entre 0 e 1 que indica um grau de pertinência contínuo de uma função de associação, desde ao não pertencimento até o pertencimento completo (GIGOVIC *et al.*, 2016; KAINZ, 2007; MOREIRA *et al.*, 2001).

A escolha da função apropriada depende da natureza dos dados de entrada e dos e das decisões e experiências dos especialistas na temática, entretanto, de acordo com Eastman (2001), as funções lineares ou sigmoidais geralmente são suficientes.

Assim, aplicação da inferência *fuzzy* implicou que os mapas temáticos de entrada (evidências cartográficas) fossem ponderados em valores entre 0 e 1 pela função linear, onde os valores mais próximos a 0 indicavam as menores vulnerabilidades e maiores potenciais enquanto quanto mais próximos a 1 os valores representaram maiores vulnerabilidades e menor potencial.

Após a ponderação *fuzzy*, foi realizada a integração dos objetos cartográficos de análise por meio da sobreposição de mapas, uma função de análise geoambiental que visa modelar a paisagem

com diversas finalidades utilizando o cruzamento de camadas temáticas geolocalizadas (FERREIRA, 2014).

Por sua vez, a sobreposição de mapas foi realizada com o auxílio da técnica de combinação linear ponderada (CLP), uma das mais utilizadas regras de decisão para derivar mapas compostos utilizando sistemas de informações geográficas (MALCZEWSKI e RINNER, 2015). A CLP é um método onde os parâmetros de entrada são padronizados para uma faixa numérica comum, recebendo pesos de importância e posteriormente sendo combinados por uma média ponderada, aplicando a Equação 1:

$$ZH = \sum PiXi \quad (1)$$

Onde:

ZH = Zona Homogênea

Pi = Peso do fator i

Xi = Pontuação para o critério i

Mas como definir os pesos relativos de cada parâmetro do modelo sem enviesá-lo? A solução dessa questão se deu com a aplicação do método da Análise Hierárquica Prioritária (AHP), proposta por (SAATY, 1980). Esse método infere que os pesos dos elementos podem ser derivados tomando o auto vetor principal de uma matriz quadrada de comparações de pares entre os critérios. As comparações representam a importância relativa dos dois critérios envolvidos na determinação da adequação ao objeto desejado, e estruturam-se em uma escala contínua de importância relativa de 1 a 9, onde 1 equivale à importância igual entre os fatores e 9 equivale à importância absoluta de um fator em relação ao outro (EASTMAN, 2001).

O resultado da comparação pareada na matriz AHP é a determinação das porcentagens de importância de cada parâmetro de entrada, e aplicações mais detalhadas podem ser encontradas nos capítulos 5 e 6.

No presente estudo, considerou-se que os três fatores de entrada (Solos, Águas Subterrâneas e Ecoturismo) têm a mesma importância relativa ao modelo. Assim, tendo em vista evitar uma maior influência de um parâmetro sobre o outro desequilibrando o fator de compensação, propôs-se que fosse atribuído o valor 1 de importância relativa em todas as comparações pareadas.

A partir da aplicação AHP foi definido, portanto, que o peso dos fatores foi de 0,333, estruturando a equação da CLP de acordo com a equação 2:

$$ZH = (0.333 \times \text{Fuzzy Solos}) + (0.333 \times \text{Fuzzy \u00c1guaSubterranea}) + (0.333 \times \text{Fuzzy Ecoturismo}) \quad (2)$$

Onde:

ZH = Zona Homog\u00eanea

Fuzzy n = Dado de entrada com as pontua\u00e7\u00f5es de cada crit\u00e9rio j\u00e1 padronizadas para valores fuzzy

A pr\u00f3xima etapa de trabalho foi o que se chama de Defuzzifica\u00e7\u00e3o, ou seja, reclassificar o resultado da sobreposi\u00e7\u00e3o de mapas para um novo conjunto fuzzy, de acordo com os relacionamentos produzidos no cruzamento e das zonas geradas a partir deles.

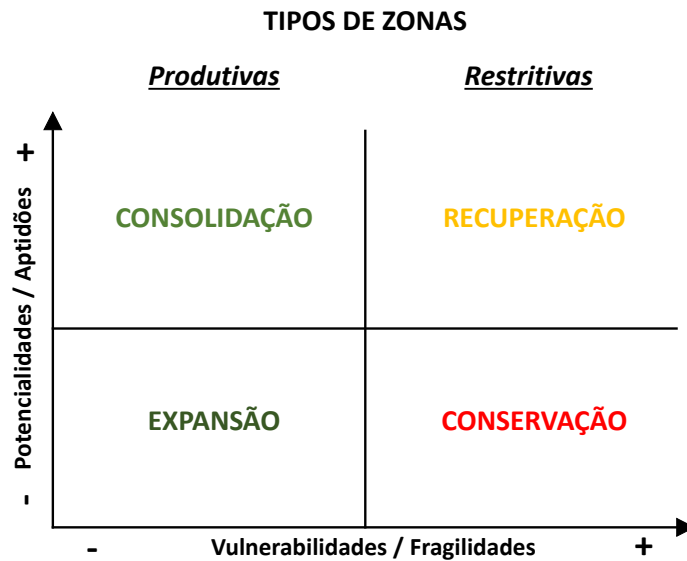
O processo de defuzzifica\u00e7\u00e3o, bem como as rela\u00e7\u00f5es entre vulnerabilidades e potencialidades de cada camada de entrada e as zonas geradas s\u00e3o ilustradas na Tabela 7-3

Tabela 7-3 Resultados da defuzzifica\u00e7\u00e3o que gerou as zonas geoambientais

Solos	\u00c1gua Subterr\u00e2nea	Ecoturismo	Valor Fuzzy final	Zona Gerada
Baixa	Baixa	Muito Alta	0 - 0,25	Consolida\u00e7\u00e3o
Moderada	Moderada	Alta	0,25 - 0,5	Expans\u00e3o
Alta	Alta	Moderada	0,5 - 0,75	Recupera\u00e7\u00e3o
Muito Alta	Muito Alta	Baixa	0,75 - 1	Conserva\u00e7\u00e3o

O \u00faltimo procedimento operacional para a gera\u00e7\u00e3o do zoneamento geoambiental foi a inser\u00e7\u00e3o das \u00e1reas restri\u00e7\u00e3o legais e as \u00e1reas urbanas locais gerando, assim, seis zonas de an\u00e1lise: Consolida\u00e7\u00e3o, Expans\u00e3o, Recupera\u00e7\u00e3o, Conserva\u00e7\u00e3o, Restri\u00e7\u00f5es Legais e \u00c1reas Urbanas Consolidadas, de acordo com as potencialidades e restri\u00e7\u00f5es aos usos dos servi\u00e7os ecossist\u00eamicos essenciais, conforme demonstra a Tabela 7-3.

Figura 7-3 Tipos de Zonas Geoambientais



A caracterização das zonas geoambientais é proveniente da adaptação do método de (BECKER E EGLER, 1996), e podem ser divididas em três grupos principais: Áreas Produtivas, Áreas Críticas e Áreas Institucionais quanto à sua relação com os serviços ecossistêmicos locais.

As áreas produtivas são porções do terreno representadas pelas zonas de Consolidação e Expansão, onde há menor vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos essenciais.

A zona de Consolidação representa altas potencialidades ao desenvolvimento territorial e baixas vulnerabilidades, sendo uma porção do território que pode ser voltada à consolidação e/ou fortalecimento dos serviços ecossistêmicos

Já a zona de Expansão demonstra áreas onde há baixas ou moderadas vulnerabilidades e potencialidades, promovendo assim locais passíveis de expansão dos serviços ecossistêmicos locais mediante práticas adequadas de uso do solo (que serão mais aprofundadas nos resultados).

As áreas Críticas representam as porções do terreno mais vulneráveis quanto à conservação dos serviços ecossistêmicos essenciais, e são representadas pelas zonas de Recuperação e Consolidação.

A zona de Recuperação apresenta alto potencial para a prestação de serviços ecossistêmico essenciais, entretanto, também indica alta fragilidade / vulnerabilidade. Portanto, são áreas onde a recuperação das áreas degradadas é essencial à manutenção da qualidade ecossistêmica local.

A zona de Conservação reúne os terrenos com as menores aptidões territoriais e maiores fragilidades, o que confere um caráter de exceção em relação aos usos antrópicos nesses locais, consolidando-se como uma zona de exclusiva conservação.

Por fim, as áreas Institucionais são locais de caráter de especial interesse na conservação dos recursos naturais e são compostas pela zona de Restrições Legais e pelas Áreas Urbanas Consolidadas.

7.2.3.4 Contribuições ao planejamento territorial sustentável do município de Brotas

Instituído como um documento ordenador que deve ser seguido na implantação de obras, planos e atividades públicas e privadas para que se garanta um desenvolvimento mais sustentável no Brasil, o zoneamento (geo) ambiental impõe que suas análises também contemplem medidas e diretrizes de ordenamento para basear as ações futuras dos gestores territoriais.

Conforme propõe (TRICART, 1977) contribui diretamente para elucidar aos gestores (responsáveis pelas ações que determinam o futuro de um local) sobre as consequências de seus atos no território, permitindo que tais decisões tenham embasamentos técnicos e científicos (ROSS, 2012).

Assim, a análise espacial integrada entre os serviços ecossistêmicos essenciais proposta nesse trabalho tem como resultados finais a indicação de diretrizes de uso do solo com bases técnicas e sustentáveis a partir do diagnóstico das potencialidades e restrições geoambientais para cada zona.

Visando contribuir com as diretrizes e, com o objetivo de analisar a relação entre as zonas geoambientais e a dinâmica atual de apropriação antrópica do território, foi utilizado o mapa de uso do solo produzido pelo projeto MapBiomias (MAPBIOMAS, 2019), verificando quais os tipos de ocupação ocorrem atualmente em cada zona.

Essas análises permitem, também, entender a realidade momentânea das relações entre as atividades antrópicas e os serviços ecossistêmicos locais guiando uma reflexão acerca de um futuro mais sustentável por meio da criação de cenários normativos, ou seja, aqueles em que são definidas estratégias para um futuro desejado.

7.3 Resultados e Discussão

7.3.1 Arcabouço legal e o planejamento ambiental no Plano Diretor de Brotas

A política urbana brasileira, tratada nos artigos 182 e 183 da Constituição Federal e regulamentada pela Lei 10.257/2001, tem como objetivo colocar em prática o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana e garantir o bem-estar de seus habitantes, por meio de diretrizes de ordenamento territorial.

Dentre as principais ferramentas (diretrizes) de planejamento propostas na Lei, destaca-se o Plano Diretor Municipal, o instrumento básico da política de desenvolvimento e expansão urbana, que consiste em um conjunto de regras e disposições que orientam as ações humanas sobre as cidades, promovendo o diálogo entre as questões sociais, ambientais, econômicas e territoriais de uma cidade.

Assim, diante da autonomia de planejamento ambiental / territorial delegada aos municípios por meio do artigo 182 da Constituição Federal, o Plano Diretor municipal torna-se protagonista no processo de desenvolvimento sustentável dos municípios brasileiros, principalmente por sua capacidade e responsabilidade de analisar pontualmente as questões locais, e transformas as restrições e potencialidades municipais em regras de ordenamento.

O Plano Diretor do município de Brotas, instituído pela Lei 0093/2016, dispõe sobre as regras de planejamento urbano dos anos seguintes até sua revisão. Quanto ao aspecto ambiental / territorial, a análise deste plano indicou que o plano atual contempla diretrizes que contemplam a preservação do meio ambiente em seu escopo.

Entretanto, constatou-se que o plano carece de estratégias específicas que oriente ações práticas para o planejamento territorial sustentável. A ação prática mais consistente diagnosticada no plano é a proposta no artigo 6º, que visa tornar as nascentes de todos os cursos d'água do Município como áreas especiais de proteção ambiental, portanto passíveis de controle para sua conservação.

Como exemplo da falta de indicação prática de ações e estratégias, pode ser citado o Artigo 43, o único que trata do zoneamento ambiental como parâmetro para as intervenções relacionadas com o meio ambiente e sua preservação. Entretanto, o Plano não apresenta nenhum zoneamento ambiental e nem apresenta diretrizes para sua produção.

Os fatores acima expostos evidenciaram a necessidade da produção de um zoneamento (geo)Ambiental que contemplasse a relação entre as ações humanas e o meio físico local, a fim de orientar estratégias de desenvolvimento sustentável para o Município de Brotas.

7.3.2 Zoneamento Geoambiental do Município de Brotas

O zoneamento geoambiental proposto nesse estudo, assim como orienta o MMA (2018b), procurou apresentar uma delimitação geográfica de porções territoriais homogêneas com o objetivo de apoiar regimes especiais de uso do solo visando a proteção de serviços ecossistêmicos essenciais às dinâmicas sociais, ambientais e econômicas locais, assim como dar subsídios ao processo de planejamento permanente do município.

A inserção dos serviços ecossistêmicos como foco do planejamento estratégico visou contribuir com o desenvolvimento sustentável do município de Brotas e preencher a lacuna de incorporar o capital natural (BAVEYE, BAVEYE e GOWDY, 2016) nos processos de tomada de decisão, assim como indicam Daily *et al.*, (2009) e Ranganathan *et al.*, (2008).

A carta de Zoneamento Geoambiental de Brotas (Figura 7-4) produziu uma compartimentação territorial do município em seis zonas homogêneas de acordo com as zonas propostas por (BECKER E EGLER, 1996): Consolidação (16%), Expansão (42%), Recuperação (28%), Conservação (4,5%), Restrições Legais (7%) e Áreas Urbanas consolidadas (2,5%).

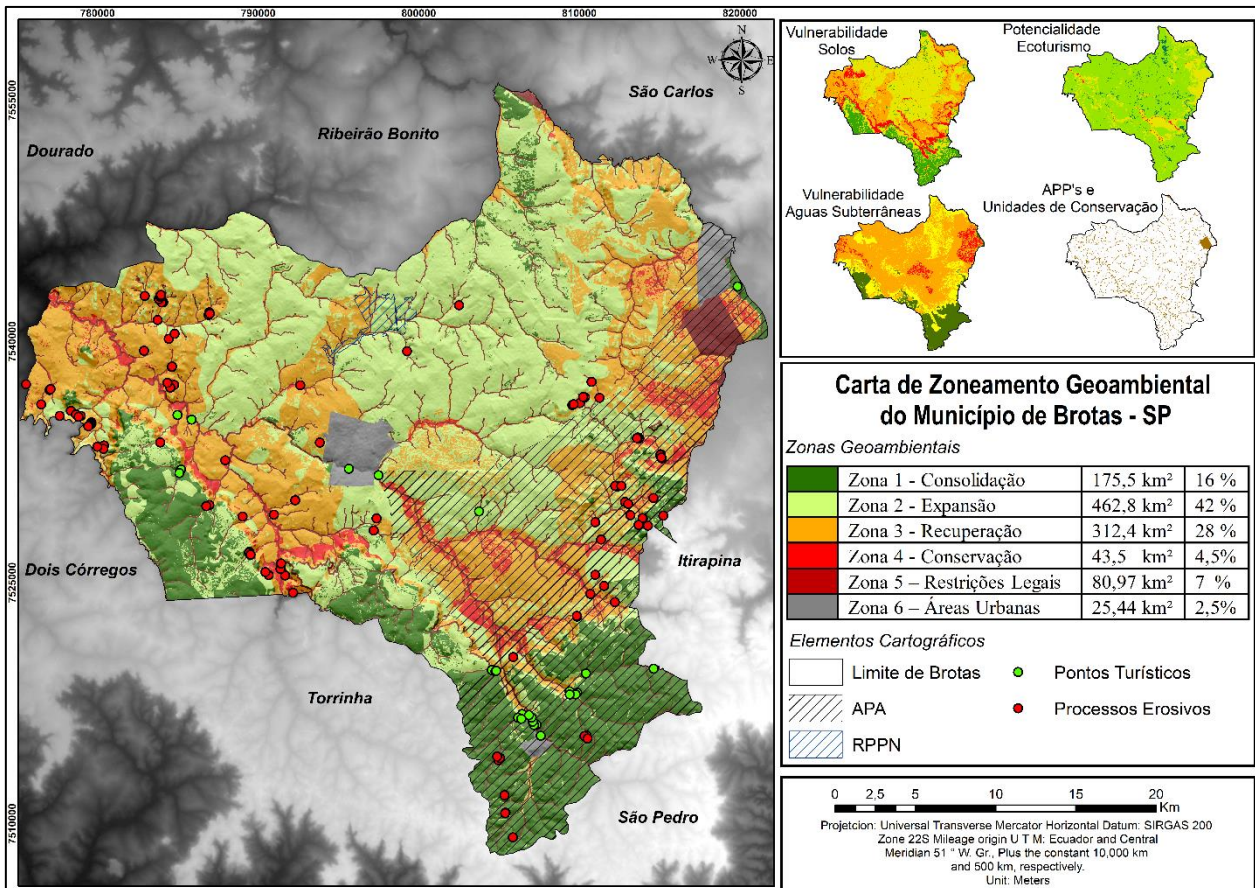
É importante salientar que o diagnóstico geoambiental e as análises do zoneamento gerado identificaram que o município de Brotas apresenta dicotomias territoriais que configuram um desafio aos planejadores e gestores: Terrenos com alto potencial de provisão de serviços ecossistêmico, mas que, ao mesmo tempo, apresentam alta fragilidade à degradação, como por exemplo os conflitos nas relações agricultura intensiva – solos – águas subterrâneas.

Mesmo com essa complexidade de análise, o zoneamento visou ser o mais fiel possível à realidade paisagística local. Ilustrando um dos principais agentes de degradação e buscando demonstrar uma validação do modelo, foi analisado o índice de erosões / km² de área de cada zona obtida. Essa análise indicou que a maior concentração de processos é justamente nas zonas de recuperação (0,18), restrições legais (0,16) e conservação (0,12), indo diretamente de encontro com a caracterização conceitual das zonas geoambientais e comprovando que a aplicação do modelo é eficiente.

Sendo um território especialmente sensível, mas com alto potencial para os serviços ecossistêmicos, entende-se que as políticas ambientais e econômicas devem respeitar as potencialidades e restrições territoriais do local afim de garantir um futuro ambientalmente próspero às futuras gerações.

Assim sendo, a conduta teórico-metodológica desse estudo foi voltada a propor estratégias de ação que priorizem o desenvolvimento regional sustentável da economia, sociedade e meio ambiente do município.

Figura 7-4 Carta de Zoneamento Geoambiental do Município de Brotas, SP



Como forma de incentivar a utilização dos resultados obtidos para utilização parte do poder público, foi elaborado um produto técnico/cartográfico que apresenta um resumo das análises resultantes do zoneamento ambiental em conjunto com o mapa final. Tal produto é apresentado como Anexo 1.

Finalmente, a caracterização das zonas geoambientais identificadas é apresentada a seguir:

Zona 1: Consolidação

A Zona 1 (ilustrada pela Figura 7-5) representa áreas com potencialidades à prestação de serviços ecossistêmicos essenciais, menores limitações para implementação de infraestruturas ecoturísticas e menores vulnerabilidades de contaminação das águas subterrâneas, conduzindo-a à situação de consolidação ou fortalecimento dos serviços ecossistêmicos locais e das atividades antrópicas que se beneficiam deles.

A consolidação remete às condições mais favoráveis para a exploração humana dos produtos fornecidos serviços ecossistêmicos locais, com menor probabilidade de depreciação ou exaurimento dos mesmos.

Os solos dessa zona apresentam boa compactação e capacidade de retenção, enfrentando efetivamente problemas como a erosão, que tem geradas expressivas perdas financeiras, perda

de nutrientes essenciais e degradação das paisagens em toda a América Latina (FAO/ONU, 2015), contribuindo também para a possibilidade de exploração de atividades agropecuárias com baixo impacto ambiental.

O desenvolvimento do Ecoturismo local tem intrínseca relação com essa zona, tendo em vista que 98 % de sua área total corresponde a potencialidades alta ou muito alta, o que contribui para a implementação de diversas infraestruturas ecoturísticas como os ecoparques Cassorova e Jacaré, mirantes de contemplação paisagística, além das atividades relacionadas à parte da represa do Broa inserida em Brotas.

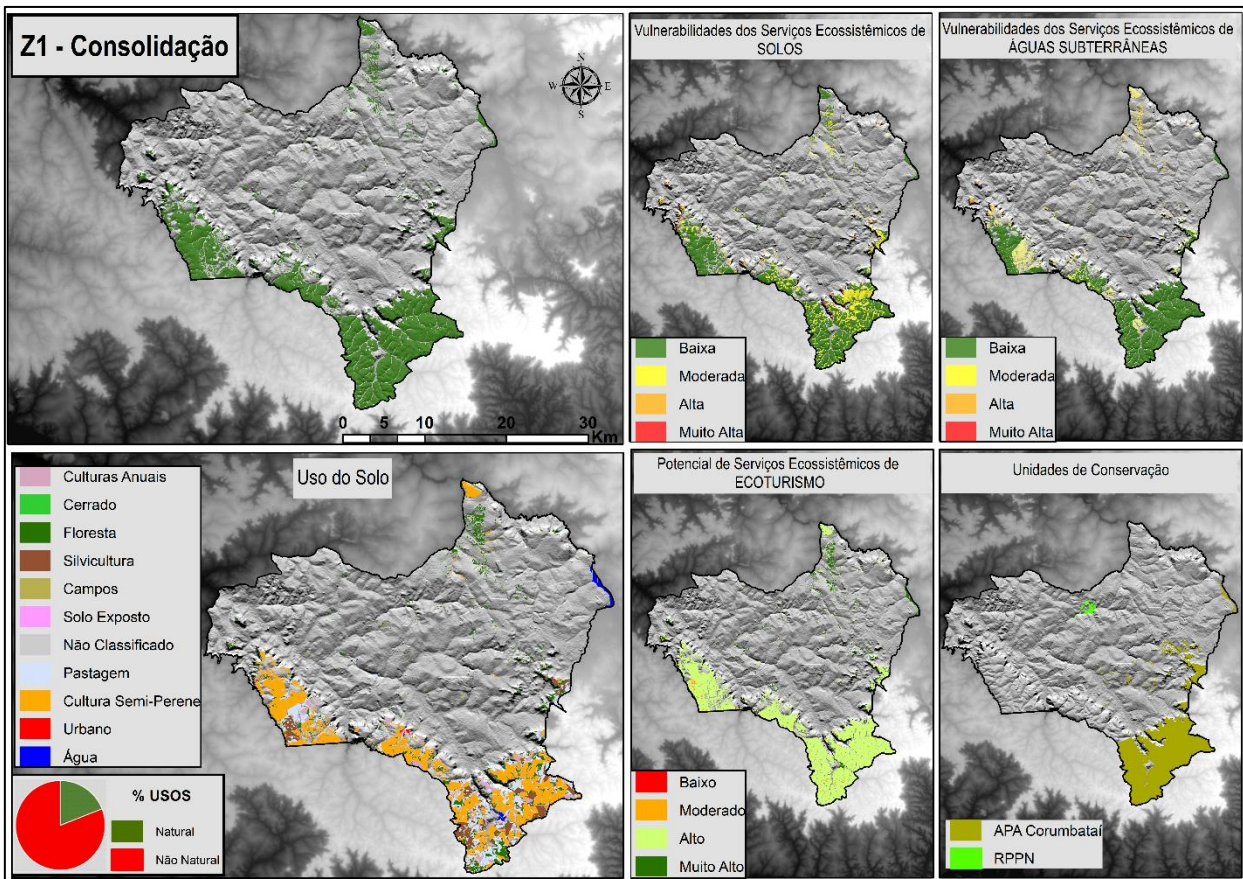
Quanto às águas subterrâneas, a dinâmica geoambiental local indica que, nessas áreas, estão localizadas as menores vulnerabilidades de contaminação por agrotóxicos. Entretanto, o que fornece a maior proteção são fatores topográficos, geológicos e geomorfológicos que também diminuem a disponibilidade superficial e conseqüentemente dificultam a extração de água do aquífero Guarani e, portanto, são locais que tendem a uma maior dificuldade na exploração desses recursos.

Atualmente a ocupação dessa zona consiste principalmente nas plantações de cana-de-açúcar (45%), pastagens (18%), Formações Florestais (14%), cultivos anuais – laranja e café – (9%) e silvicultura de eucalipto (9%). Esses resultados indicam um elevado grau de antropização da Z1, que é facilitado pelas boas condições pedológicas e topográficas.

Ainda conforme demonstrado na Figura 7-5, a Z2 está praticamente 100% inserida na unidade de conservação APA Corumbataí (caracterizada pela presença da cuesta arenito-basáltica), uma unidade de conservação de uso sustentável que visa viabilizar o desenvolvimento econômico com a conservação dos recursos naturais. Entretanto, a excessiva ação antrópica na área demonstra que os objetivos dessa UC não estão sendo atingidos de maneira eficiente.

Por ser uma zona menos vulnerável é a mais apropriada para a expansão das atividades antrópicas no município. Porém, cabe salientar que a consolidação dos serviços ecossistêmicos no local só ocorrerá de forma plena e sem perturbações caso haja uma planificação do uso do solo local, respeitando sua capacidade produtiva e implementando práticas agrícolas de menor impacto ambiental (MAFRA, 2012). Uma alternativa viável é o maior fortalecimento do turismo como estratégia de resiliência da paisagem (GUERRERO, 2020).

Figura 7-5 Caracterização da Zona 1



Zona 2 – Expansão

A modelagem geoambiental de serviços ecossistêmicos, por meio do cruzamento dos layers espaciais, proposta nesse estudo prioriza a inserção de cada área diagnosticada em uma zona de acordo com suas potencialidades e restrições, sendo que a Zona 2 teoricamente representa baixas vulnerabilidades e baixas potencialidades.

No entanto, a complexidade dos modelados geoambientais, cujas interações dos atributos refletem em diferentes dinâmicas para cada serviço ecossistêmico prestado causando inclusive questões conflitivas, tornam necessárias adequações descritivas a essa zona, que remontam à uma área com potencial para expansão dos serviços ecossistêmicos, porém mediante a uma variedade de potencialidades e restrições que não foi contemplada na metodologia original.

Assim, a Zona 2 – Expansão (ilustrada pela Figura 7-6) pode ser considerada a zona com maior complexidade territorial no que diz respeito às dicotomias espaciais mencionadas anteriormente: Por um lado, os serviços ecossistêmicos de solo apresentam relativa baixa vulnerabilidade e os de ecoturismo têm alto potencial paisagístico, enquanto os serviços de água subterrânea estão potencialmente mais vulneráveis devido ao arcabouço geológico / pedológico / topográfico.

Os argumentos acima apresentados demonstram a importância de analisar os serviços ecossistêmicos, suas relações e complexidades de forma holística e a relevância de sua inserção nos processos de planejamento (CHAN *et al.*, 2006; GROOT, *et al.*, 2010).

No caso dos serviços de Solo, nota-se que para essa zona a vulnerabilidade predominante é a moderada, demonstrando a capacidade de promover produtos relacionados à retenção de solo e prevenção à erosão, incluindo, concomitantemente, potencialidades para a exploração agrícola da paisagem com menores perdas financeiras.

Ao analisarmos a composição fisiográfica da Z2 é possível relacioná-la diretamente com um alto potencial ecoturístico, assim como propõe (PEIXOTO, 2010a), que entende que as áreas dos arenitos Botucatu e Pirambóia são bastante frutíferas para o desenvolvimento dessas atividades sustentáveis.

Em virtude das potencialidades territoriais quanto a solos e ecoturismo e fragilidade em relação às águas subterrâneas nessa zona, a recomendação de ordenamento territorial para a expansão consiste na resignificação da paisagem a partir de duas vertentes principais: O incentivo ao direcionamento econômico-territorial local para atividades ecoturísticas de baixo impacto ambiental e a promoção e desenvolvimento de atividades agrícolas de viés sustentável. Diante da estrutura dos serviços ecossistêmicos acima apresentada e das diretrizes metodológicas propostas, foi possível determinar que a Zona 2 é um território propício à **expansão da produção de serviços ecossistêmicos essenciais**, ou seja, uma área de especial interesse ao desenvolvimento territorial sustentável para o município de Brotas.

Considerando o grau baixo-médio de proteção do aquífero promovido pelas camadas superiores de solo e rocha, as áreas dessa zona onde há alta vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos só podem ser consideradas realmente como expansão caso haja diretrizes bem estabelecidas e fiscalizadas de ordenamento do uso do solo local com atividades de baixo impacto ambiental.

Por outro lado, caso o uso do solo não seja ordenado para práticas mais sustentáveis e menos degradadoras, haverá por certeza um comprometimento da provisão de serviços ecossistêmicos essenciais, oprimindo a característica de expansão da Z2.

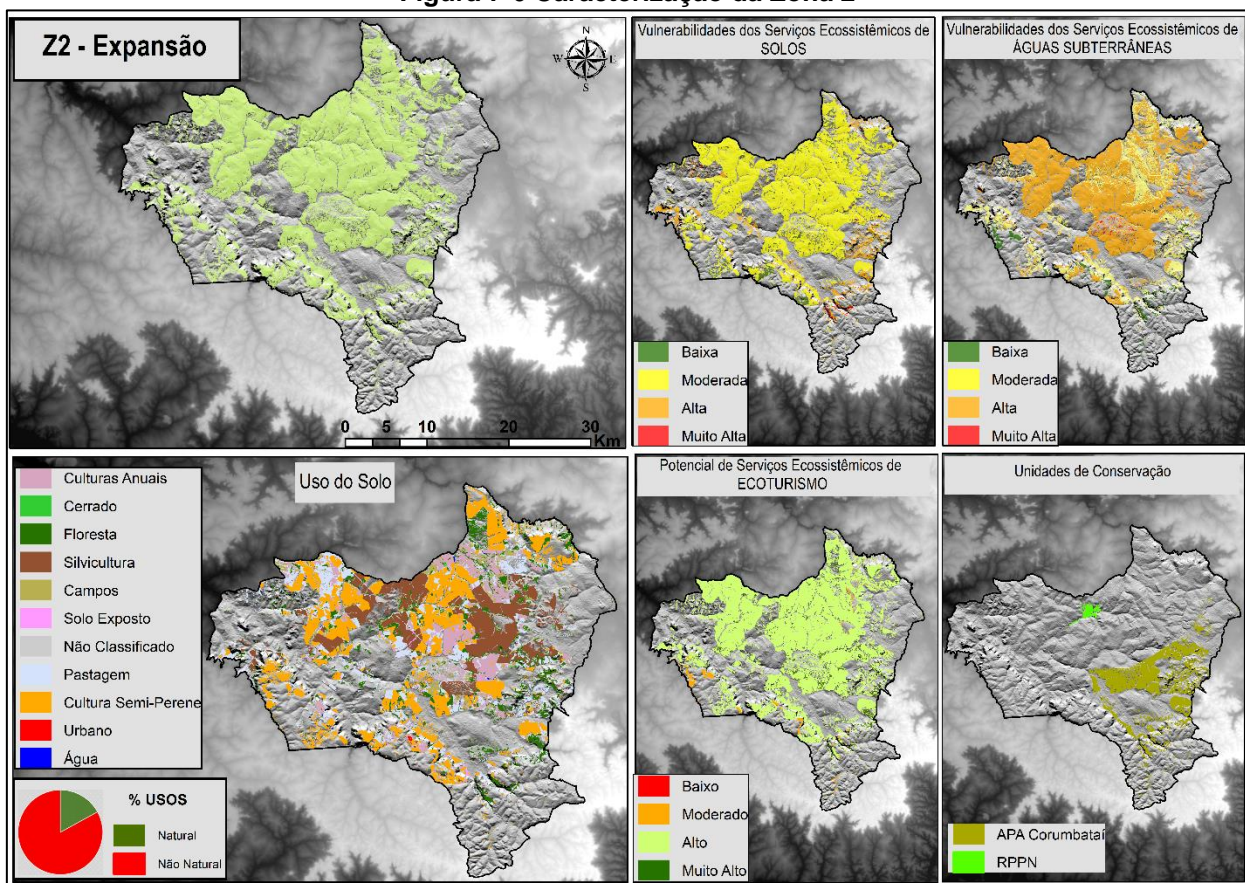
Como principais usos dessa zona, a cana-de-açúcar (32%), silvicultura (19%) e pastagens (17%) causam preocupações acerca da qualidade ambiental local. Pastagens degradadas e silvicultura sem manejo adequado têm sido o motivo de expressivas perdas de solo no campo Brasileiro (Carvalho *et al.*, 2017; Ross, 1994), enquanto as lavouras de cana-de-açúcar quando mal manejadas causam impactos ligados à erosão, assoreamento de corpos hídricos (Regra, 2013), e degradação da qualidade do ar quando da queima da palha (Ronquim, 2010).

Além dos problemas acima citados, as monoculturas de cana-de-açúcar têm íntima relação com a contaminação das águas subsuperficiais, à medida que o excesso de utilização de insumos agrícolas tem sido responsável pela contaminação por nitratos na bacia hidrográfica do Tietê Jacaré (REGRA, 2013)

A questão dos agroquímicos nos cultivos da cana é reforçada pela identificação de 27 diferentes produtos detectados nas águas de Brotas, com destaque para o 2,4D e Tebuconazol, utilizados na produção sucroalcooleira (Repórter Brasil, 2020). Corroborando com essa preocupação, o estudo de (VALADARES, ALVES E GALIZA, 2020) indica que Brotas faz parte do grupo de municípios que registraram aumento no número de estabelecimentos utilizadores de agrotóxicos no período de 2006 a 2017.

Ao identificarmos a ainda importância essencial das práticas agrícolas ao produto interno bruto de Brotas, sugere-se a implementação de atividades que fortaleçam a resiliência da paisagem, tais como o manejo sustentável das pastagens (MELADO, 2016), a aplicação de políticas públicas de zoneamento agroclimático a partir de instrumentos técnicos (MANZATTO ET AL., 2009) e principalmente o incentivo à aplicação de sistemas agroflorestais e sistemas produtivos integrados (EMBRAPA, 2012), que visam conciliar a produção agrícola com o desenvolvimento de serviços ecossistêmicos prestados através da conservação dos recursos naturais locais.

Figura 7-6 Caracterização da Zona 2



Zona 3 – Recuperação

Identificada como uma área crítica e compondo 28% do território, a Zona 3 (Figura 7-7) é caracterizada primordialmente por suas altas vulnerabilidades ecossistêmicas, diante de um cenário consideravelmente favorável ao ecoturismo. Sua localização ocorre principalmente na faixa de contato entre as formações geológicas Itaqueri e Serra Geral com as formações arenosas Botucatu e Pirambóia, o que gera acidentes geográficos como grandes degraus topográficos.

Em geral, devido a características arenosas de solos e geologia, e do relevo acidentado, são locais onde foi identificada alta vulnerabilidade à erosão, com conseqüente baixa capacidade de retenção de material. Essa dinâmica erosiva é comprovada pela comparação territorial dessa zona com os dados produzidos por (MORAES *ET AL.*, 2020), indicando que essa zona contém 51 % do total de processos erosivos mapeados no município (56 de 109).

Já quanto ao serviço ecossistêmico de provisão de água potável de origem subterrânea, nota-se que 85 % da zona é composta por áreas de Alta e Muito Alta vulnerabilidades, com preocupação maior nas áreas mais ao norte do município, devido à presença das formações Botucatu e Pirambóia que, por apresentarem intenso padrão de faturamento e porosidade, estão mais suscetíveis à contaminação pontual e difusa. São áreas essencialmente localizadas afrente dos degraus topográficos de alta declividade, em porções do terreno já mais distantes das zonas de transição entre os contatos geológicos, em locais com menores declividades e maiores taxas de infiltração no modelado.

Por outro lado, as mesmas características que tornam a zona vulnerável, também indicam que é uma área de afloramento e recarga do aquífero Guarani, o que confere à zona um elevado potencial de provisão de águas subterrâneas. Tal argumento é demonstrado cartograficamente no trabalho de (GUERRERO, GOMES, *ET AL.*, 2020), salientando a capacidade das áreas quanto às águas subterrâneas.

A ocupação antrópica atual na zona compõe-se por apenas 21% de formações naturais (15% de formações florestais, 5% campos e 1% cerrado), enquanto há uma predominância dos usos não naturais por pastagens (30%), cana-de-açúcar (25%), e silvicultura.

Diante das análises dos serviços ecossistêmicos essenciais e do uso do solo local, é possível determinar que o foco principal da atuação dos gestores públicos nessa zona deve ser a recuperação das áreas degradadas visando aumentar a capacidade da paisagem de promover serviços ecossistêmicos essenciais.

Como já destacado anteriormente, existem numerosos processos erosivos nessa zona que, além da perda da capacidade produtiva e dos riscos socioeconômicos que promovem, também afetam

direta ou indiretamente os recursos hídricos superficiais e subterrâneos e degradam paisagens que poderiam ser aproveitadas para o ecoturismo. Além, há a indicação técnica de mesmo as áreas que não estão atualmente degradadas apresentam alta vulnerabilidade. Por esses fatores, o enfrentamento dos problemas locais exige tanto técnicas de recuperação quanto de prevenção.

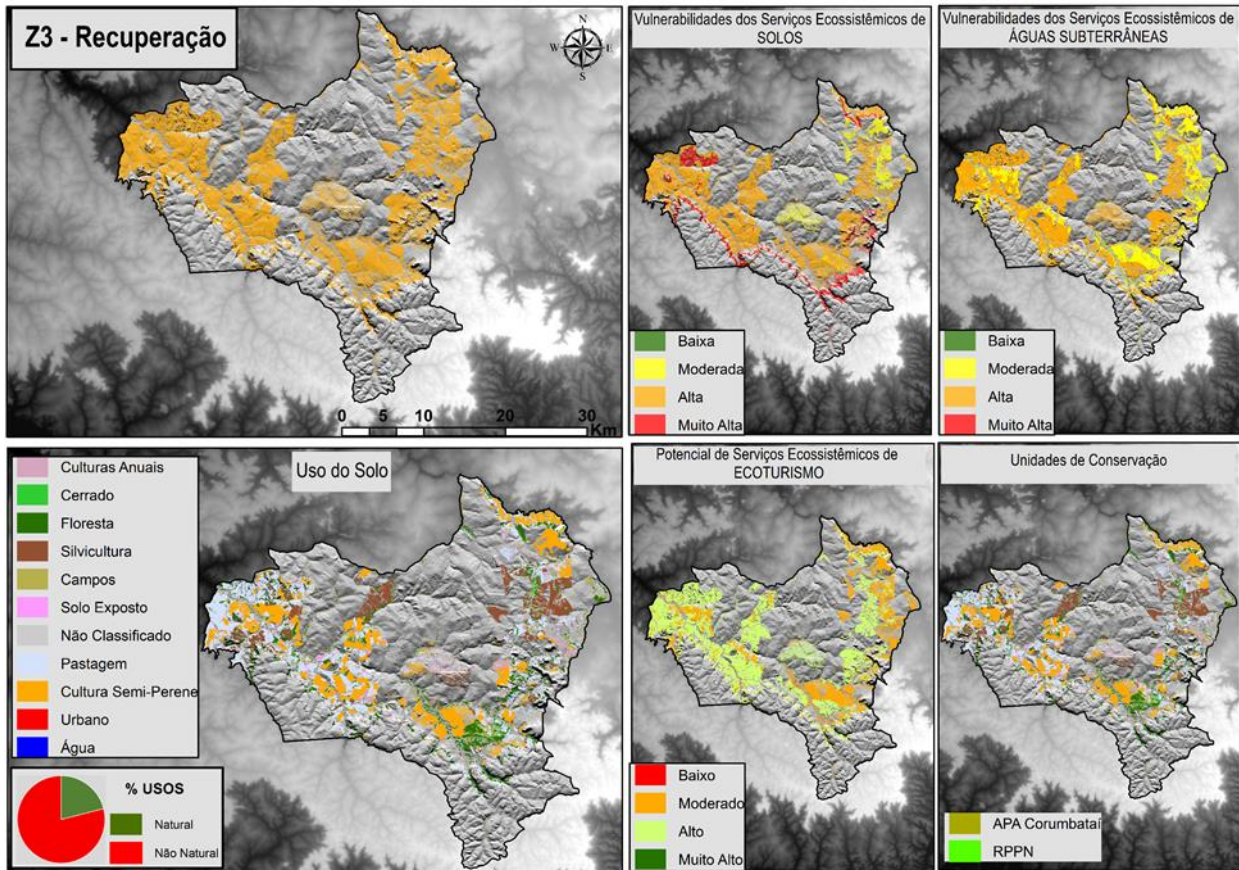
Como técnicas de recuperação das áreas já degradadas, (CHAVES *ET AL.*, 2012) indicam a seguinte sequência de ações: Diagnóstico do grau de degradação, isolamento das áreas degradadas, ordenamento e dissipação das águas superficiais (por meio de terraços em desnível, bacias de captação e retenção de água com terraços e plantios), reconformação de barrancos / taludes com práticas mecânicas, aplicação de cobertura inicial com materiais fibrosos (que protegem o solo por mais tempo e permitem o crescimento de vegetação) e, por fim, a revegetação da área.

Diversos estudos demonstram a efetividade desse tipo de abordagem para a recuperação de áreas degradadas, tais como (FLAVIANO *ET AL.*, 2019; SEVERIANO *ET AL.*, 2017; VALENTIN, 2018).

As estratégias de prevenção implicam na proteção ambiental direcionada a evitar o impacto degradante das gotas de chuva no solo, à estabilização dos agregados e a proteção contra a contaminação das águas subterrâneas (GUERRA, 2008).

Tendo em vista que 100% da Z3 representa áreas rurais, faz-se necessário a aplicação de práticas agrícolas voltadas à conservação, tais como as de caráter vegetativo, edáfico e mecânico (SALOMÃO, 2012), a análise e respeito da capacidade produtiva do solo (MAFRA, 2012), a rotação de culturas e o cultivo agrícola sustentável em áreas menos vulneráveis (ZONTA *ET AL.*, 2012), e a proteção integral às áreas suscetíveis à contaminação de aquíferos (com a eliminação das áreas de solo exposto, práticas de revegetação e incentivo à diminuição de agroquímicos).

Figura 7-7 Caracterização da Zona 3



Zona 4 – Conservação

Considerada também uma área crítica, a Zona 4 (Figura 7-8) tem como principal característica uma paisagem com altas vulnerabilidades naturais e pouca potencialidade de prestação dos serviços ecossistêmicos, recobrendo 43,5 km² (4,5 % do total da área de estudo).

O contexto geoambiental a qual está inserida, confere à Z4 baixas possibilidades de retenção de solos e alta suscetibilidade à erosão, principalmente devido ao relevo acidentado e com altas declividades. Apesar da sua pequena representatividade territorial na área de estudo, (MORAES ET AL., 2020) identificaram 5 grandes processos erosivos nessa zona, relacionados principalmente a movimentos de massa, ravinas, voçorocas e processos laminares, sendo a maioria com diagnóstico de ocorrência por causas naturais.

O relevo acidentado também dificulta a implementação de atividades ecoturísticas e acarreta determinados riscos aos visitantes, o que é comprovado por não haver nenhum atrativo turístico cadastrado nessa zona no inventário turístico de Brotas (Brotas, 2018).

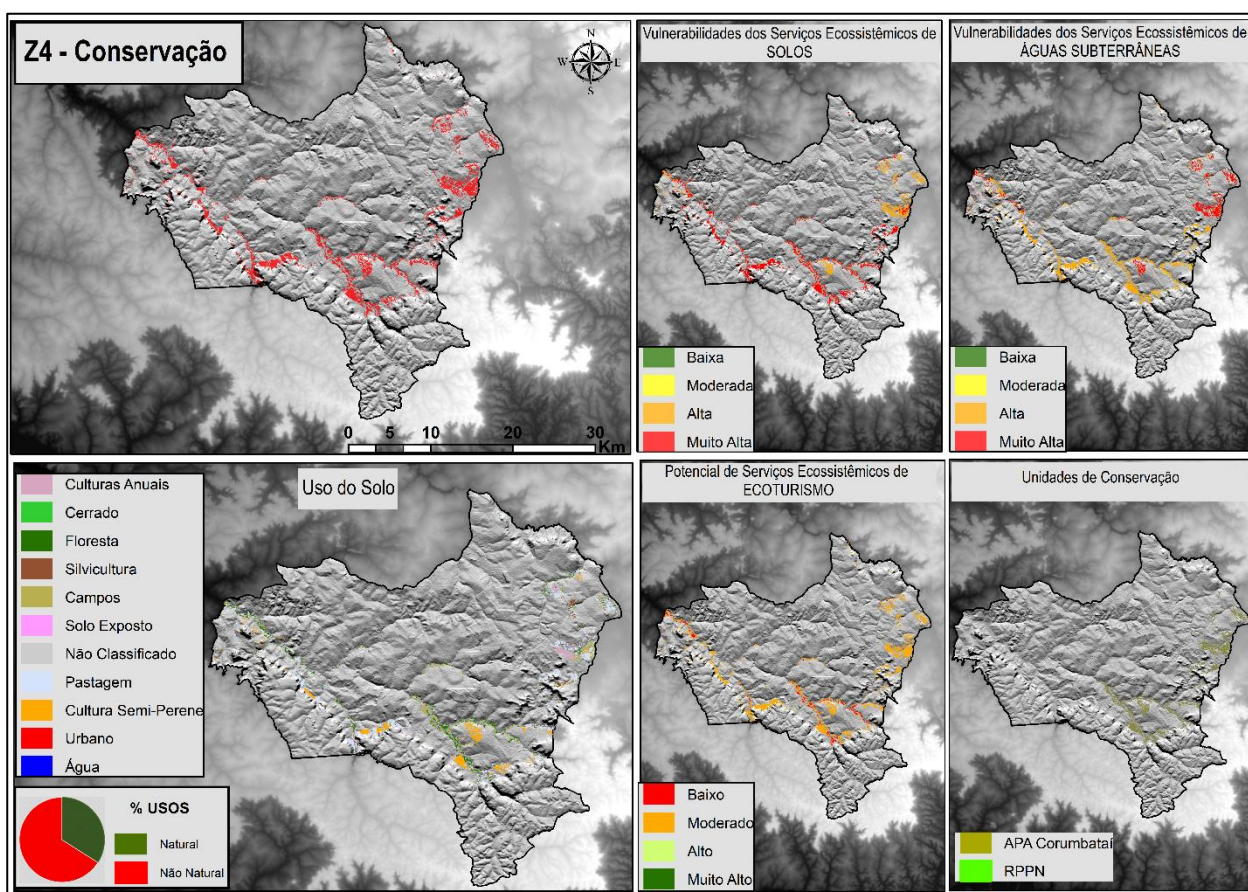
Nas regiões menos declivosas (como na região central e nordeste do município e nos fundos de grandes vales), os condicionantes estruturais e os usos promovem de alta a muito alta

vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, principalmente na área a leste, que compõe parte da unidade de conservação APA Corumbataí.

As dificuldades de implementação de atividades antrópicas na Z4 são reforçadas pela cobertura de apenas 29% de cana-de-açúcar e culturas anuais, destoando das demais zonas. Os principais usos são Pastagens (34%), Formações Florestais (19%), campos (15%) e Silvicultura (3%).

Considerando as altas vulnerabilidades, potencialidades baixas e principalmente os riscos socioeconômicos de implementação de atividades antrópicas, a Z4 deve ser voltada totalmente à conservação. São necessárias, portanto, políticas públicas municipais que determinem a não utilização dessa área por nenhuma atividade humana, resguardando não só a conservação ambiental, mas também a segurança dos munícipes e visitantes.

Figura 7-8 Caracterização da Zona 4



Zona 5 – Restrições Legais

Essa zona integra todas as áreas de uso restrito de acordo com legislações federais e estaduais vigentes: As áreas de preservação permanente estabelecidas pela lei 12.651/2012 (BRASIL, 2012)

e as Unidades de Conservação de Proteção Integral, representadas pelas Estações Ecológicas Mata do Jacaré e de Itirapina.

Ocupando 7% do território de Brotas (Figura 7-9), a zona 5 apresenta importância direta para os processos ecodinâmicos locais tendo em vista que é voltada estritamente para a manutenção dos serviços ecossistêmicos por meio da manutenção da vegetação nativa e exploração sustentável do território em áreas potencialmente vulneráveis.

O cruzamento da delimitação dessa zona com a carta de vulnerabilidade de serviços ecossistêmicos das águas subterrâneas (capítulo 4) indicou que 58% da zona 5 apresenta vulnerabilidades altas ou muito altas, representadas pela relação entre as águas superficiais e subterrâneas no Aquífero Guarani (BATISTA *ET AL.*, 2010), e das características geoambientais locais (Guerrero *et al.*, 2020).

A vulnerabilidade natural dessas áreas é corroborada pela análise de que 68 % da zona apresenta alta / muito alta vulnerabilidade dos SE's de solo, indicando probabilidade de ocorrência de processos erosivos e incapacidade natural de prevenir perdas de solo.

Quanto ao uso atual dessa zona, o mapeamento promovido pelo MapBiomias indica que 55% é composto por fisionomias naturais (Florestas, Cerrado, Corpos d'água e Campos) e, conseqüentemente, 45% do uso é voltado a atividades antrópicas.

Ao avaliarmos que a principal função ambiental das Áreas de Preservação Permanente é preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 2012; SCHÄFFER *ET AL.*, 2011) e que a legislação define que nessas áreas não é permitido o manuseio (com exceção apenas para fins de preservação, reflorestamento e estudos biológicos), nota-se que grande parte da zona 5 em Brotas está em desacordo com as exigências legais.

Quanto nas Unidades de Conservação de Proteção Integral (estabelecidas pelo Sistema Nacional de Unidades de conservação da Natureza), é determinado que o uso dessas áreas seja restritivo, permitindo-se apenas usos indiretos e sustentáveis. Para essas áreas em específico, o mapa de uso do solo indicou que as restrições estão sendo respeitadas, principalmente pelo caráter educacional das estações ecológicas.

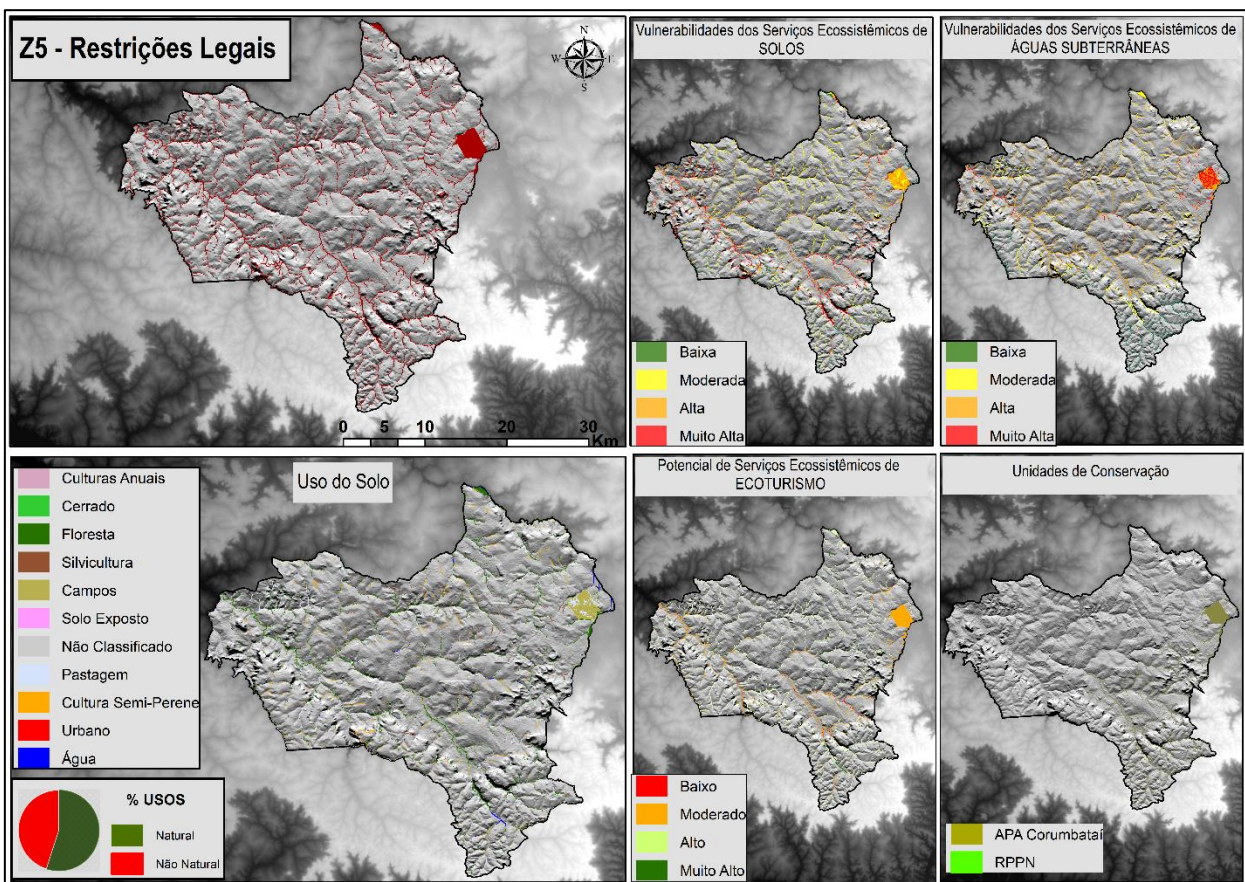
Diante da crucial importância que essas restrições legais promovem aos ecossistemas brasileiros (METZGER *ET AL.*, 2019) e visando respeitar a legislação vigente, instrui-se que a Zona 5 como um todo seja recuperada com projetos de reflorestamento de espécies nativas da região. Os benefícios ecossistêmicos dessa recuperação em territórios brasileiros são extensamente

consolidados na literatura, tais como discutem os trabalhos de (ALMEIDA, LARA E ANGELO, 2019; MATAVELI ET AL., 2018; NARDINI ET AL., 2012; REIS ET AL., 2012; SILVA, 2014).

No município de Brotas já existem alguns estudos e ações que visam solucionar esse problema, tais como os discutidos em (RONQUIM ET AL., 2018; SILVA, TONELLO E MINGOTI, 2016). Mais especificamente recomenda-se, também o cumprimento da legislação municipal determinada pelo artigo 52, capítulo XI da Lei nº 0039/2016 (que institui o plano diretor de Brotas), onde exige-se que as áreas de preservação permanente além de respeitar o que é exigido na Lei nº 12.651/2012 devem ainda cercar as áreas, garantindo sua integridade ambiental. É importante ressaltar aqui que essa é a única menção a estratégias de conservação de APP's mencionadas no plano.

Como estratégias de recuperação de Áreas de Preservação Permanente e de Unidades de Conservação (e conseqüentemente para respeitar a legislação), a (EMBRAPA, 2012) propõe que sejam aplicadas técnicas de regeneração natural com manejo, a partir de enriquecimento do solo, controle de plantas competidoras, introdução de indivíduos de espécies do estágio inicial de sucessão e criação de núcleos de vegetação com espécies com capacidade ecológica de melhorar significativamente o ambiente.

Figura 7-9 Caracterização da Zona 5



Zona 6 – Áreas Urbanas Consolidadas

A zona 6 (Figura 7-10) representa as áreas urbanas consolidadas do município de Brotas. Ressalta-se que o caráter urbano dessas áreas é relativo à sua delimitação territorial no plano diretor municipal, e não necessariamente demonstra altos graus de urbanização. Essa Zona pode ser dividida entre o núcleo principal de urbanização (na região central do município), o distrito de Santa Maria da Serra (na região Sul) e o bairro do Broa (na região nordeste).

O núcleo principal de urbanização de Brotas apresenta vulnerabilidades naturais moderadas e altas quanto aos solos e águas subterrâneas. No entanto, o índice de 100% de esgoto tratado (BROTAS, 2017) diminui consideravelmente o risco de degradação das águas subterrâneas, enquanto o elevado grau de impermeabilização dificulta a execução da dinâmica natural do solo.

Ainda assim, em relação aos aquíferos em áreas urbanas, há o risco de contaminação por fontes pontuais ou difusas, tais como postos de gasolina, vazamentos industriais e vazamentos de esgoto, que devem ser fiscalizados rigorosamente.

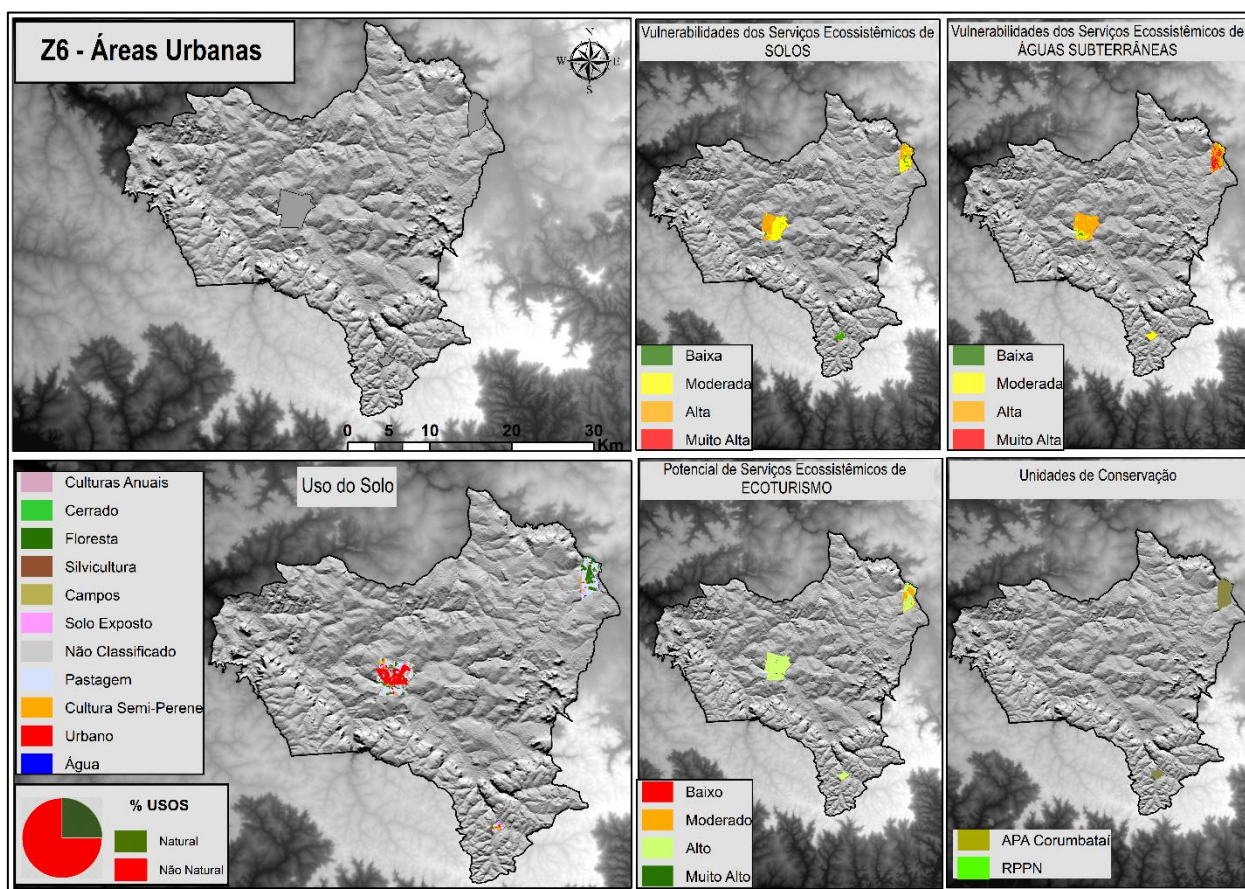
A análise do Plano Diretor municipal (BROTAS, 2015) identificou que o principal vetor de expansão do município é voltado ao sul do núcleo principal, em direção à Z2 – expansão. Esse fator indica que essa expansão urbana (dedicada à residências e zonas industriais) deve ser seguida de rígidas regras de planejamento urbano e ambiental para não colocar em risco a zona de expansão dos serviços ecossistêmicos essenciais.

Interessantemente, no bairro do Broa a maior parte do uso do solo é de vegetação nativa, o que pode ser explicado por sua característica de veraneio, ou seja, são chácaras e ranchos destinados ao descanso e com visitação per iodica, que não apresentam elevado grau de urbaniza o.

Dentro das áreas urbanas são prestados diversos serviços ecossistêmicos (BOLUND e HUNHAMMAR, 1999; LAM e CONWAY, 2018; URBES, 2013), podendo esse ambiente ser tratado como um ecossistema urbano (RANGANATHAN *ET AL.*, 2008). A partir dessas premissas   possível afirmar que as diretrizes urbanas devem ser ponderadas de acordo com instrumentos de planejamento ambiental e urbano que levem em considera o os diversos serviços prestados, por menores que sejam.

A denomina o da cidade de Brotas como uma capital de turismo (PEIXOTO, 2010a) torna a conserva o das áreas urbanas ainda mais necessárias, em vista de promover o Green Marketing (MORAVCIKOVA *et al.*, 2017; PAPADAS, AVLONITIS e CARRIGAN, 2017) baseado em resiliência e sustentabilidade (MARCHESE *et al.*, 2018) para tornar o município mais competitivo na atra o de turistas e elevando sua renda.

Figura 7-10 Caracterização da Zona 6



7.4 Conclusão

Apesar da notável importância do comportamento ecossistêmico para as populações globais ainda se nota um descaso com o capital natural em relação aos planos de ordenamento territorial, principalmente em escala municipal que é onde efetivamente ocorrem as relações entre sociedade, ambiente e economia (BAVEYE, BAVEYE e GOWDY, 2016). Assim, o presente trabalho teve o objetivo de preencher essa lacuna para o cenário dos municípios brasileiros vislumbrando, inclusive, a possibilidade de incentivar demais estudos que valorizem os serviços ecossistêmicos em escala municipal.

A partir das análises produzidas nesse estudo, foi possível compreender a dinâmica dos serviços ecossistêmicos que estão mais envolvidos com o atual plano de desenvolvimento municipal, ou seja, aqueles que são efetivamente responsáveis pelo desenvolvimento econômico, social e ambiental (KOSMUS, RENNER e ULLRICH, 2012), além de diagnosticar suas vulnerabilidades e potencialidades.

O diagnóstico de que Brotas é um território com alta capacidade produtiva de serviços ecossistêmicos de solo, água e ecoturismo ainda é conflitante com o padrão de uso do solo local, que é direcionado primordialmente ao cultivo de cana-de-açúcar. Assim, as zonas propostas procuraram levar em consideração trade-offs, ou seja, um equilíbrio entre as características conflitantes (KOSMUS, RENNER e ULLRICH, 2012) que existe entre o desenvolvimento econômico tradicional (que dificilmente pode ser totalmente substituído) e a capacidade local de produzir benefícios oriundos dos seus recursos naturais.

Nesse sentido, o modelo geoambiental aplicado em ambiente SIG se revelou como uma ferramenta muito eficiente ao planejamento sustentável, por apresentar a capacidade de demonstrar cartograficamente os diversos agentes que atuam no local além de permitir análises comparativas e indicações de cenários futuros que reflitam determinados comportamentos dos gestores municipais

A aplicação do estudo em escala 1:50.000 apresenta relevância por seu enfoque tático e operacional, contribuindo diretamente para o subsídio de políticas públicas em escalas municipais e locais. Entende-se assim que, o documento de planejamento estratégico proposto pode subsidiar o plano diretor municipal de Brotas, que já prevê no Artigo 43 que o zoneamento ambiental deve ser parâmetro para as intervenções relacionadas ao meio ambiente e sua preservação (BROTAS, 2015).

Conclui-se que o desenvolvimento territorial sustentável de Brotas só ocorrerá a partir de paisagens resilientes e com políticas públicas eficientes que priorizem a conservação dos recursos naturais e de seus produtos. A ressignificação da paisagem em direção ao “verde” não é um esforço simples e nem é possível que ocorra de forma abrupta, entretanto os expressivos resultados econômicos e ambientais promovidos pelo ecoturismo local comprovam que o município é totalmente capaz de tornar-se cada vez menos dependente de atividades potencialmente degradadoras.

Em um ambiente com tamanha disponibilidade ecossistêmica, valorizar os serviços prestados pela natureza significa contribuir para o bem-estar das futuras gerações. Assim, sugere-se também, estudos de valoração financeira dos serviços ecossistêmicos essenciais locais afim de contribuir com o planejamento financeiro do município na relação das tomadas de decisão, reduzindo custos estratégicos e melhorando a qualidade de vida dos cidadãos.

CAPÍTULO 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Frente a um cenário de degradação ambiental e de políticas públicas que negligenciam os ecossistemas nos processos de planejamento territorial nos municípios, esta tese teve o objetivo de propor um zoneamento geoambiental na perspectiva dos serviços ecossistêmicos essenciais, como direcionadores das intervenções humanas no território de Brotas, São Paulo.

Como procedimento norteador, foi realizado um diagnóstico geoambiental do município, considerando aspectos do meio físico, social e ambiental. A partir da análise do atual padrão de desenvolvimento municipal foram diagnosticados como serviços ecossistêmicos essenciais àqueles prestados pelas águas subterrâneas (pela presença e importância do Sistema Aquífero Guarani), pelos solos (base estrutural para as principais atividades humanas no local) e o ecoturismo (atividade que vem se destacando economicamente).

Na sequência, os três serviços ecossistêmicos essenciais foram investigados individualmente, visando analisar suas potencialidades e vulnerabilidades naturais em relação às ações humanas. Para cada um deles, foi proposto um mapa com unidades territoriais que agruparam suas características homogêneas de situação dos serviços, buscando dar suporte a intervenções específicas relacionadas a cada tema.

A análise dos serviços ecossistêmicos de águas subterrâneas teve como foco a provisão de água de qualidade para atividades humanas com a utilização do modelo DRASTIC-LU e PESTICIDE DRASTIC-LU (que analisa os contaminantes como pesticidas), levando em consideração parâmetros hidrogeológicos e de uso do solo. Assim, os modelos DRASTIC-LU e PESTICIDE DRASTIC-LU indicaram alta vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos locais, principalmente na porção central do território que apresenta solos e geologia arenosos e baixas declividades que facilitam a infiltração de contaminantes, sendo áreas coincidentes com a região de recarga do Aquífero Guarani.

Este estudo indicou também a importância estratégica do aquífero Guarani para o município, tanto para o abastecimento quanto para a irrigação das lavouras, e demonstrou que as áreas de maior vulnerabilidade ocorrem justamente em suas áreas de recarga. Tais indicações visaram produzir um documento técnico que promova orientações básicas antes de qualquer tipo de exploração do território, que ameace a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos subterrâneos disponíveis.

As principais recomendações remetem à necessidade de fiscalização das retiradas de água subterrânea (a fim de evitar a superexploração) e ao incentivo à diminuição de uso de defensivos agrícolas, principalmente nas áreas mapeadas como de maior vulnerabilidade, a fim de se

proteger o aquífero como um todo, já que as zonas de recarga acarretam em consequências para todo o sistema.

Um modelo geoambiental sistematizado por inferência geográfica foi aplicado a fim de identificar cartograficamente as áreas mais propensas à promoção de serviços ecossistêmicos recreacionais ligados ao ecoturismo. No modelo foram considerados parâmetros relacionados a acessibilidade, potencial para belezas cênicas e elementos estruturais da paisagem.

Os resultados dessa análise indicaram que 81,5 % da área apresenta alta aptidão para o ecoturismo local, fato esse que permite vislumbrar uma resignificação da paisagem em prol de estratégias sustentáveis de apropriação do terreno. Ainda assim, o ecoturismo como ferramenta de resiliência da paisagem natural depende diretamente de políticas integradas com os demais setores da economia local, tendo em vista que a exploração cênica da natureza conflita com atividades de alto impacto degradador, tais como uso intensivo de agroquímicos, falta de manejo adequado, contaminação por atividades industriais, etc.. Dessa forma, o produto cartográfico resultante permite orientar

Nesse sentido, as recomendações para esse tema partem da utilização do zoneamento ecoturístico gerado como instrumento técnico de orientação das ações do poder público para investimentos em infraestruturas. Diante da cada vez maior relevância do conceito de *Green Marketing* (PAPADAS, AVLONITIS E CARRIGAN, 2017), um documento técnico-científico que demonstra tal alta capacidade da paisagem, pode incentivar a captação de recursos para o desenvolvimento do ecoturismo também na iniciativa privada.

Em relação aos solos, foi produzido um modelo geoambiental baseado em inferência Fuzzy e análise multicritério, buscando avaliar a atual vulnerabilidade de serviços relacionados à capacidade da paisagem em reter solo, prevenir erosão e manter solos aráveis com qualidade. Os resultados obtidos demonstraram que a interação entre o arcabouço geoambiental e o uso do solo atual do município de Brotas produz, majoritariamente, vulnerabilidades à provisão de serviços ecossistêmicos de solo, fato que coloca em risco diretamente a economia local.

É importante ressaltar a necessidade de aplicar medidas de manejo sustentável e de recuperação das áreas já degradadas para evitar a ocorrência de um cenário de elevadas quantidades de perda de solo por erosão e diminuição da capacidade produtiva da agricultura local. O documento cartográfico gerado pode contribuir com essas ações, já que é capaz de demonstrar as regiões do município onde há maiores vulnerabilidades, promovendo assim uma gestão mais eficiente do território.

Por fim, e como forma de atingir o objetivo geral da tese, foi produzido o zoneamento geoambiental voltado a compatibilizar a conservação ambiental com o desenvolvimento econômico local de forma sustentável. A estrutura metodológica partiu de uma adaptação do método de Becker e

Egler (1996) e visou identificar zonas que representassem cartograficamente características homogêneas do território quanto a relação entre potencialidade x vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos. Assim, foram geradas seis zonas de análise: Consolidação, Expansão, Recuperação, Conservação, Restrições Legais e Áreas Urbanizadas.

A zona de Consolidação indica a maior permissividade de intervenções humanas, por conter altas potencialidades ao desenvolvimento territorial e baixas vulnerabilidades. Já a de Expansão, por ter vulnerabilidades e potencialidades baixas, é indicada para que sejam elaboradas ações de expansão dos serviços ecossistêmicos essenciais. Quanto a zona Recuperação, nota-se que ocorrem altas potencialidades ao mesmo tempo em que a vulnerabilidade é alta. A zona de Conservação agrega as porções do território com menores aptidões e maiores vulnerabilidades, sendo a área mais crítica e degradada do município. Já a zona de restrições legais representa os locais protegidos perante a legislação ambiental brasileira, com uso restrito. Por fim, a Zona de áreas urbanas homogêneas reúne os ecossistemas urbanos de Brotas.

A distribuição espacial dessas zonas mostrou-se eficiente na representação computacional da paisagem de Brotas, especialmente por agregar diversos elementos específicos do meio físico local nas vertetes de solos, ecoturismo e águas subterrâneas, fatores essenciais ao desenvolvimento.

Apesar de constar no plano diretor de Brotas que o zoneamento ambiental deve ser adotado como parâmetro para as intervenções ambientais e sua conservação, atualmente não há nenhuma atualização deste documento que oriente as ações ambientais. Assim, sugere-se que o documento técnico produzido nesse estudo seja inserido no plano diretor, visando contribuir com as ações dos gestores municipais e cumprir com o previsto na legislação municipal.

Na atual perspectiva de degradação dos ecossistemas, cabe ao Estado promover o equilíbrio ambiental e a qualidade dos recursos naturais locais. Nesse contexto, o zoneamento geoambiental comprovou-se como uma ferramenta de extrema importância para os municípios ao demonstrar as complexidades da estrutura paisagística local, bem como identificar vulnerabilidades e aptidões de forma integrada, contribuindo para o planejamento estratégico.

Além, o zoneamento em escala municipal também é um importante agente na descentralização das ações previstas na política ambiental brasileira. Ao ser aplicado em escala local, este documento trata diretamente com o território onde efetivamente ocorrem as interações entre sociedade – economia – ambiente.

Como já apresentado anteriormente, a representação cartográfica das unidades geoambientais proposta nesse estudo é capaz de orientar políticas públicas locais a partir de um viés conservacionista, porém sem deixar de lado a necessidade do desenvolvimento econômico para

o bem-estar da população local. Indo mais além, essa abordagem pode contribuir com a maioria dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela ONU.

Como limitações do estudo, pode-se indicar a escassez de dados oficiais que colaborassem para análise mais profunda e diversificada dos elementos da paisagem e que também impossibilitaram elaborar validações mais complexas do modelo. Além, é possível citar que a replicabilidade total desse estudo depende de locais com características paisagísticas e econômicas semelhantes, porém, as bases conceituais e as ideias metodológicas podem ser facilmente replicadas em outros municípios que desejem inserir a perspectiva ecossistêmica em seus planejamentos.

Recomenda-se, portanto, que para os futuros trabalhos relacionados à essa temática, ocorram estudos em maior escala cartográfica (1:10.000 ou maiores), visando estabelecer parâmetros e estratégias de ação pontuais nos municípios. Outra recomendação é a utilização das zonas mapeadas como base técnica para a implementação de pagamento por serviços ambientais, promovendo assim o incentivo financeiro para empresas e sociedade em prol da conservação dos serviços ecossistêmicos essenciais.

O desenvolvimento sustentável em escala municipal depende da existência de documentos técnicos de orientação das atividades, de propostas integradoras com a sociedade e, principalmente, de vontade política para transformar o planejamento em estratégias de gestão por meio de políticas públicas. Cabe a nós cobrar nossos representantes .

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. **Os Domínios de Natureza no Brasil**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2012.
- ALAM, F.; UMAR, R.; AHMED, S.; DAR, F. A. A new model (DRASTIC-LU) for evaluating groundwater vulnerability in parts of central Ganga Plain, India. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, n. 3, p. 927–937, 2014.
- ALIANI, H.; BABAIEKAFKY, S.; SAFFARI, A.; MONAVARI, S. M. Land evaluation for ecotourism development — an integrated approach based on FUZZY , WLC , and ANP methods. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2017.
- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J.; HACKETT, G. **DRASTIC : A Standardized Method for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings**NWWA/Epa-600/2-87-035. [s.l: s.n.].
- ALMEIDA, A. N. DE; LARA, C. L. DE; ANGELO, H. Avaliação do custo para recuperar uma área degradada: estudo de caso em uma área de preservação permanente do Rio Bisnau (Formosa, Estado de Goiás, Brasil). **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 6, n. 13, p. 349–364, 2019.
- ANDRADE, N. S. F. DE; FILHO, M. V. M.; TORRES, J. L. R.; PEREIRA, G. T.; JÚNIOR, J. M. IMPACTO TÉCNICO E ECONÔMICO DAS PERDAS DE SOLO E NUTRIENTES POR EROSÃO NO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 32, p. 539–550, 2011.
- ARAÚJO, E. S. DA S.; LEISMANN, E. L. PLANO DIRETOR MUNICIPAL: PERCEPÇÃO DE GESTORES PÚBLICOS NO PROCESSO DE ELABORAÇÃO E REVISÃO. **Revista Competitividade e Sustentabilidade – ComSus**, v. 7, n. 2, p. 547–557, 2020.
- AUGUSTSSON, A.; UDDH SÖDERBERG, T.; FRÖBERG, M.; BERGGREN KLEJA, D. B.; ÅSTRÖM, M.; SVENSSON, P. A.; JARSJÖ, J. Failure of generic risk assessment model framework to predict groundwater pollution risk at hundreds of metal contaminated sites: Implications for research needs. **Environmental Research**, v. 185, n. November 2019, p. 109252, 2020.
- AZEVEDO, R. M. M. DE; LOPES, R. M. R.; GONÇALVES, S. Resignificação do rural e

sua relação com o urbano: o turismo como expressão de novas possibilidades. **Revista Brasileira de Ecoturismo (RBEcotur)**, v. 6, n. 5, p. 824–835, 2013.

BAALOUSHA, H. M. Mapping groundwater contamination risk using gis and groundwater modelling. A case study from the gaza strip, palestine. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 4, n. 3–4, p. 483–494, 2011.

BACCARO, C. A. D. Processos erosivos no domínio do Cerrado. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. DA; BOTELHO, R. G. M. (Eds.). . **Erosão e Conservação dos Solos**. Rio de Janeiro: Berttrand Brasil, 2012. p. 337.

BARAL, N. Evaluation and resilience of ecotourism in the Annapurna Conservation Area, Nepal. **Environmental Conservation**, v. 41, n. 1, p. 84–92, 2014.

BARROCAS, R. **A (Trans)formação do Turismo no Município de Brotas, SP: a relação entre o morador e o turista**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2005.

BATISTA, L. V.; SANTAROSA, L. V.; SANTOS, V.; GASTMANS, D. Influência Das Águas Subterrâneas Na Manutenção Da Vazão Do Rio Em Área De Recarga Do Sistema Aquífero Guarani (Sag). **Águas Subterrâneas**, v. 13, n. Figura 1, p. 3–6, 2010.

BAUDE, M.; MEYER, B. C.; SCHINDEWOLF, M. Science of the Total Environment Land use change in an agricultural landscape causing degradation of soil based ecosystem services. **Science of the Total Environment**, v. 659, p. 1526–1536, 2019.

BAVEYE, P. C.; BAVEYE, J.; GOWDY, J. Soil “ecosystem” services and natural capital: Critical appraisal of research on uncertain ground. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, n. JUN, p. 1–49, 2016.

BECKER, B. K.; EGLER, C. A . G. **Detalhamento da metodologia para execução do Zoneamento Ecológico-Econômico pelos Estados da Amazônia Legal**. [s.l: s.n.].

BENDOR, T. K.; SHANDAS, V.; MILES, B.; BELT, K.; OLANDER, L. Ecosystem services and U.S. stormwater planning: An approach for improving urban stormwater decisions. **Environmental Science and Policy**, v. 88, n. July, p. 92–103, 2018.

BIRGÉ, H. E.; BEVANS, R. A.; ALLEN, C. R.; ANGELER, D. G.; BAER, S. G.; WALL, D. H. Adaptive management for soil ecosystem services. **Journal of Environmental Management**, v. 183, p. 371–378, 2016.

BLUM, W. E. H. Functions of soil for society and the environment. **Reviews in**

Environmental Science and Bio/Technology, v. 4, n. 4, p. 75–79, 2005.

BOCCO, G.; MENDOZA, M.; VELAZQUEZ, A. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping — a tool for land use planning in developing countries. p. 211–219, 2001.

BOLUND, P.; HUNHAMMAR, S. Ecosystem services in urban areas Per. **Ecological Economics**, v. 29, n. 1, p. 293–301, 1999.

BOUABID, A.; LOUIS, G. E. Capacity factor analysis for evaluating water and sanitation infrastructure choices for developing communities. **Journal of Environmental Management**, v. 161, p. 335–343, 2015.

BOUCHET, L.; THOMS, M. C.; PARSONS, M. Groundwater as a social-ecological system: A framework for managing groundwater in Pacific Small Island Developing States. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 8, n. February, p. 579–589, 2019.

BRASIL. **LEI Nº 10.257, DE 10 DE JULHO DE 2001.**, 2001.

____. **DECRETO Nº 4.297, DE 10 DE JULHO DE 2002.**, 2002.

____. **Ecoturismo: Orientações Básicas**. Brasília: Ministério do Turismo, 2010.

____. **Lei 12.651 / 2012 - Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>

BRAZIL. **DECRETO Nº 89.817 DE 20 DE JUNHO DE 1984: Normas técnicas da cartografia nacional** Brazil, 1984.

____. **Law 9.985 / 2000 - Institutes the National System of Nature Conservation Units**, 2000.

____. **Decreto 5.746 /2006 - Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza.**, 2006.

BROTAS. **PLANO DIRETOR DO MUNICÍPIO DA ESTÂNCIA TURÍSTICA DE BROTAS LEI COMPLEMENTAR MUNICIPAL Nº 0093/2016 De 28 de novembro de 2016. Projeto**, 2015.

____. **PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO MUNICÍPIO DE BROTAS - SP RELATÓRIO DE ATIVIDADES – FINAL**. Brotas: [s.n.].

____. **Informações Municipais**. Disponível em: <<https://brotas.sp.gov.br/>>. Acesso em: 22

abr. 2018.

BROTAS, P. M. DE. **Inventário Turístico Municipal de Brotas**. Brotas: [s.n.].

BUDEANU, A.; MILLER, G.; MOSCARDO, G.; OOI, C. S. Sustainable tourism, progress, challenges and opportunities: An introduction. **Journal of Cleaner Production**, v. 111, p. 285–294, 2016.

BUENO, C. R. DE P.; STEIN, D. P. Potencial Natural e antrópico de erosão na região de Brotas, Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 1, p. 1–5, 2004.

BUNRUAMKAEW, K.; MURAYAMA, Y. Site Suitability Evaluation for Ecotourism Using GIS & AHP : A Case Study of Surat Thani Province , Thailand. v. 21, p. 269–278, 2011.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998.

BUTCHART, S. H. M.; COLLEN, B.; STRIEN, A. VAN; NAT, C.; BRUNO, J.; CHANSON, J.; GALLOWAY, J. N.; GENOVESI, P. Global Biodiversity: Indicators of. **Science**, v. 328, n. May, p. 1164–1168, 2010.

CALZOLARI, C.; TAROCCO, P.; LOMBARDO, N.; MARCHI, N.; UNGARO, F. Land Use Policy Assessing soil ecosystem services in urban and peri-urban areas : From urban soils survey to providing support tool for urban planning. **Land Use Policy**, v. 99, n. December 2019, p. 105037, 2020.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. 1. ed. São Paulo: [s.n.].

CAVALCANTI, L. C. DE S. **Cartografia de Paisagens**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CBH/TIETÊ-JACARÉ. **RELATÓRIO DE SITUAÇÃO DOS HÍDRICOS 2018**. Araraquara: [s.n.].

CENDRERO, A. Environmental Geology of the Santander Bay Area, northern Spain. **Environmental Geology**, v. 1, n. 2, p. 97–114, 1975.

____. Environmental survey along the Santander - Unquera coastal strip, northern Spain, and assessment of its capacity for development. **Landscape Planning**, v. 7, n. 1, p. 23–56, 1980.

CEREDA JUNIOR, A. **Análise De Fragilidade Ambiental Com Métodos Multicritério - Críticas E Proposta Metodológica**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2011.

CEREDA JUNIOR, A.; RÖHM, S. Proposal and Analysis of Environmental Fragility Model Using Multicriteria Analysis and Fuzzy Logic for Integrated Landscape Mapping. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 8, n. 1, p. 28–37, 2014.

CETESB. **Aquífero Guarani**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/programa-de-monitoramento/consulta-por-aquiferos-monitorados/aquifero-guarani/>>. Acesso em: 4 mar. 2020.

ÇETINKAYA, C.; KABAK, M.; ERBAS, M.; ÖZCEYLAN, E. Evaluation of ecotourism sites : a GIS-based multi-criteria decision analysis. **Kybernetes**, 2018.

CHAN, K. M. A.; SHAW, M. R.; CAMERON, D. R.; UNDERWOOD, E. C.; DAILY, G. C. Conservation planning for ecosystem services. **PLoS Biology**, v. 4, n. 11, p. 2138–2152, 2006.

CHANDOUL, I. R.; BOUAZIZ, S.; DHIA, H. BEN. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC models in shallow aquifer of Gabes North (South East Tunisia). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 9, p. 7619–7629, 2015.

CHAVES, T. DE A.; ANDRADE, A. G. DE; LIMA, J. A. DE S.; PORTOCARRERO, H. **Recuperação de áreas degradadas por erosão no meio rural**. Rio de Janeiro: [s.n.].

CHEER, J. M.; LEW, A. Understanding tourism resilience: Adapting to social, political, and economic change. *In*: CHEER, J. M.; LEW, A. (Eds.). . **Tourism, Resilience, and Sustainability: Adapting to Social, Political and Economic Change**. [s.l.] Routledge, 2017. p. 309.

CHOI, Y. E.; SONG, K.; KIM, M.; LEE, J. Transformation planning for resilient wildlife habitats in ecotourism systems. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 4, 2017.

COHN, A. S.; GIL, J.; BERGER, T.; PELLEGRINA, H.; TOLEDO, C. Patterns and processes of pasture to crop conversion in Brazil: Evidence from Mato Grosso State. **Land Use Policy**, v. 55, p. 108–120, 2016.

CONTI, J. B. Resgatando a "fisiologia da paisagem" **Revista do Departamento de Geografia**, v. 14, p. 59–68, 2001.

CORRÊA, E. A.; MORAES, I. C.; LUPINACCI, C. M. Revista Brasileira de Geomorfologia INFLUÊNCIA DO CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR NAS PERDAS DE SOLO INFLUENCE OF SUGARCANE CULTIVATION ON SOIL LOSSES BY. v. 2, 2018.

CORTINOVIS, C.; GENELETTI, D. Ecosystem services in urban plans: What is there, and what is still needed for better decisions. **Land Use Policy**, v. 70, n. March 2017, p. 298–312, 2018.

COSTA, A. L. C. DA. **Estudo da vulnerabilidade à erosão com a aplicação da Equação Universal de Perda de Solo na alta bacia hidrográfica do rio Jacaré Pepira, utilizando SIG/SPRING**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2005.

COSTA, C. W.; PIGA, F. G.; CRISTINA, M.; MORAES, P. DE; DORICI, M.; SANGUINETTO, E. D. C.; LOLLO, J. A. DE; MOSCHINI, L. E. Fragilidade ambiental e escassez hídrica em bacias hidrográficas: Manancial do Rio das Araras – Araras, SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, p. 946–958, 2015.

COSTANZA, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, n. May, p. 253–260, 1997.

COSTANZA, R.; GROOT, R. DE; BRAAT, L.; KUBISZEWSKI, I.; FIORAMONTI, L.; SUTTON, P.; FARBER, S.; GRASSO, M. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? **Ecosystem Services**, v. 28, p. 1–16, 2017.

COSTANZA, R.; GROOT, R. DE; SUTTON, P.; PLOEG, S. VAN DER; ANDERSON, S. J.; KUBISZEWSKI, I.; FARBER, S.; TURNER, R. K. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, n. 1, p. 152–158, 2014.

CPRM. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas SIAGAS**. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em: 22 maio. 2019.

CRUZ, J. I. DA; PORTUGAL, R. DE S.; LUCENDO, C. H.; ELIS, V. R.; FACHIN, S. J. DA S.; USTRA, A.; BORGES, W. R. Detecção de contaminação de solo por vinhaça através de análise de dados de eletroresistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, p. 481–492, 2008.

CRUZ, R. DE C. A. DA. Políticas públicas de turismo no Brasil: território usado, território negligenciado. **Geosul**, v. 20, n. 40, p. 27–43, 2005.

CUMMING, G. S.; OLSSON, P.; HOLLING, F. S. C. I. I. C. S. Resilience, experimentation, and scale mismatches in social-ecological landscapes. p. 1139–1150, 2013.

CUNHA, A. M. Turismo rural de base comunitária em Santo Antônio da Patrulha (RS). **Revista Brasileira de Ecoturismo (RBEcotur)**, v. 7, n. 4, p. 750–761, 2014.

DAILY, G. C.; POLASKY, S.; GOLDSTEIN, J.; KAREIVA, P. M.; MOONEY, H. A.; PEJCHAR, L.; RICKETTS, T. H.; SALZMAN, J.; SHALLENBERGER, R. Ecosystem services in decision making: Time to deliver. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 7, n. 1, p. 21–28, 2009.

EASTMAN, J. IDRISI Guide to GIS and Image Processing Volume 1. **Clark Labs**, v. 1, n. May, p. 87–131, 2001.

EMBRAPA. **Estratégias de Recuperação**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/codigo-florestal/estrategias-e-tecnicas-de-recuperacao>>. Acesso em: 5 maio. 2020.

____. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Livraria, 2013.

____. **Classificação Climática de Koppen**. Disponível em: <<https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>>. Acesso em: 22 jul. 2017.

ENGLUND, O.; BERNDES, G.; CEDERBERG, C. How to analyse ecosystem services in landscapes—A systematic review. **Ecological Indicators**, v. 73, p. 492–504, 2017.

FALCÃO, K. DOS S.; PANACHUKI, E.; MONTEIRO, F. DAS N.; SILVA MENEZES, R. DA; RODRIGUES, D. B. B.; SONE, J. S.; OLIVEIRA, P. T. S. Surface runoff and soil erosion in a natural regeneration area of the Brazilian Cerrado. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 8, n. 2, p. 124–130, 2020.

FALEIROS, C. DE Á. R. J. **Zoneamento Geoambiental do Rio Fartura: Abrangendo os municípios de São José do Rio Pardo-SP, São Sebastião da Gramma -SP, Vargem Grande do Sul - SP, e Águas da Prata-SP, na escala 1:50.000**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2012.

FAO/ONU. **Status of the world's soil resources**. Rome: [s.n.].

____. The State of the World's Forests. p. 139, 2018.

FERRARI, R. S.; SOUZA, A. O. DE; ANNUNCIACÃO, D. L. R.; SODRÉ, F. F.; DORTA, D. J. Assessing surface sediment contamination by PBDE in a recharge point of Guarani Aquifer in Ribeirão Preto, Brazil. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 8, 2019.

FERREIRA, M. C. **Iniciação à análise geoespacial: Teoria, técnicas e exemplos para**

geoprocessamento. São Paulo: EDITORA UNESP, 2014.

FISHER, B.; TURNER, R. K.; MORLING, P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. **Ecological Economics**, v. 68, n. 3, p. 643–653, 2009.

FLAVIANO, W.; GONÇALVES, M.; UCKER, F. E.; ALONSO, R. P.; LUZ, A. C. USO DE TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE ÁREA DEGRADADA POR PROCESSO EROSIVO EM ÁREA URBANA NO JARDIM MONT SERRAT NO MUNICÍPIO DE APARECIDA DE GOIÂNIA-GO. **RENEFARA (Online)**, v. 14, n. 1, p. 130–145, 2019.

FONSECA, J. M. A. A.; MELO, S. M. C. DE; CARVALHO, W. G. DE. O Ecoturismo como alternativa sustentável para gestão da RPPN Catedral do Jalapão (TO). **Revista Brasileira de Ecoturismo (RBEcotur)**, v. 11, n. 1, p. 9–31, 2018.

FRANCISCA, F.; ROVANI, M.; CASSOL, R. CARTOGRAFIA TEMÁTICA: uma contribuição na análise geográfica do município de Barão de Cotegipe / RS THEMATIC MAPPING: a contribution to the geographical analysis of the municipality of Barão de Cotegipe / RS CARTOGRAFÍA TEMÁTICA: una contribución al an. p. 33–54, [s.d.].

FREITAS, L.; CHAMINÉ, H. I.; PEREIRA, A. J. S. C. Coupling groundwater GIS mapping and geovisualisation techniques in urban hydrogeomorphology: focus on methodology. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 5, p. 1–18, 2019.

FU, B.; LIU, Y.; LÜ, Y.; HE, C.; ZENG, Y.; WU, B. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. **Ecological Complexity**, v. 8, n. 4, p. 284–293, 2011.

GARRETT, R. D.; KOH, I.; LAMBIN, E. F.; POLAIN DE WAROUX, Y. LE; KASTENS, J. H.; BROWN, J. C. Intensification in agriculture-forest frontiers: Land use responses to development and conservation policies in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 53, n. October 2017, p. 233–243, 2018.

GHARAIBEH, A. A.; GHRAIR, A. M.; MERKEL, B. Groundwater risk assessment investigations for oil shale exploitation in El-Lajjun area of central Jordan. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 16, 2019.

GIGOVIĆ, L.; PAMUČAR, D.; LUKIĆ, D.; MARKOVIĆ, S. GIS-Fuzzy DEMATEL MCDA model for the evaluation of the sites for ecotourism development: A case study of “Dunavski ključ” region, Serbia. **Land Use Policy**, v. 58, p. 348–365, 2016.

GOMES, M. A. F.; PEREIRA, L. C. Ordenamento Agroambiental Das Áreas De Afloramento Do Aquífero Guarani: Estudo De Caso Nos Estados De Mato Grosso. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 18, p. 59–72, 2008.

GRIZZETTI, B.; LANZANOVA, D.; LIQUETE, C.; REYNAUD, A.; CARDOSO, A. C. Assessing water ecosystem services for water resource management. **Environmental Science & Policy**, v. 61, p. 194–203, 2016.

GROOT, R. S. DE; ALKEMADE, R.; BRAAT, L.; HEIN, L.; WILLEMEN, L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. **Ecological Complexity**, v. 7, n. 3, p. 260–272, 2010.

GROOT, R.S. DE; ALKEMADE, R.; BRAAT, L.; HEIN, L.; WILLEMEN, L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. **Ecological Complexity**, v. 7, n. 3, p. 260–272, set. 2010.

GROOT, R. S. DE; WILSON, M. A.; BOUMANS, R. M. J. A TYPOLOGY FOR THE CLASSIFICATION , DESCRIPTION AND VALUATION OF ECOSYSTEM FUNCTIONS , GOODS AND SERVICES Figure 1 : Framework for Integrated Assessment and Valuation of Ecosystem Functions , Goods and Services. **Ecological Economics**, v. 41, n. May, p. 1–20, 2002.

GROOT, R. S. DE; WILSON, M. A; BOUMANS, R. M. J. A TYPOLOGY FOR THE CLASSIFICATION , DESCRIPTION AND VALUATION OF ECOSYSTEM FUNCTIONS , GOODS AND SERVICES. **Ecological Economics**, v. 41, n. May, p. 1–20, 2002.

GUERRA, A. J. T. **Dicionário Geológico-Geomorfológico**. 8. ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

____. Processos Erosivos nas Encostas. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. DA (Eds.). . **Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. p. 472.

____. O início do Processo Erosivo. *In*: **Erosão e Conservação dos Solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. p. 50.

GUERRERO, J. V. R. **ZONEAMENTO GEOAMBIENTAL ANALÍTICO DA BACIA DO RIO CLARINHO A PARTIR DA TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DE TERRENO, NA ESCALA 1:50.000**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2014.

GUERRERO, J. V. R.; DANTAS CHAVES, M. E.; CESÁRIO JUSTINO, R.; VEROLA MATAVELI, G. A.; MOSCHINI, L. E. Potencial de contaminação de aquíferos na bacia do córrego do Gouveia, São Paulo. **Acta Brasiliensis**, v. 1, n. 3, p. 1, 2017.

GUERRERO, J. V. R.; GOMES, A.; LOLLO, J. A. DE; LORANDI, R.; MOSCHINI, L. E. **Geocological Mapping to Identify Groundwater Ecosystem Services Conflicts in a Brazilian Municipality** Book of Abstracts of the Geoethics & Groundwater Management Congress. **Anais...**Porto: 2020

GUERRERO, J. V. R.; LOLLO, J. A. DE; LORANDI, R. CARTOGRAFIA GEOAMBIENTAL COMO BASE PARA PLANEJAMENTO TERRITORIAL NA BACIA DO RIO CLARINHO , SP. **Revista brasileira de Cartografia**, p. 313–326, 2016.

GUERRERO, J. V. R.; MOSCHINI, L. E.; DANTAS CHAVES, M. E.; MATAVELI, G. A. V.; MORATO, R. G.; KAWAKUBO, F. S. ABORDAGEM GEOBIA PARA A ANÁLISE DA DINÂMICA DO USO DA TERRA E COBERTURA VEGETAL NO MUNICÍPIO DE BROTAS-SP, BRASIL. **GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica**, 2020.

GUERRERO, J. V. R.; MOSCHINI, L. E.; LOLLO, J. A. DE; MELO, N. A. T. DE. MAPEAMENTO DA APTIDÃO AO ECOTURISMO COMO INSTRUMENTO DE PLANEJAMENTO TERRITORIAL SUSTENTÁVEL: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE BROTAS, SP. **ACTA Geográfica**, v. 12, n. 282014, p. 143–155, 2018.

HAMAMIN, D. F.; NADIRI, A. A. Supervised committee fuzzy logic model to assess groundwater intrinsic vulnerability in multiple aquifer systems. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 8, 2018.

HASAN, M.; ISLAM, M. A.; AZIZ HASAN, M.; ALAM, M. J.; PEAS, M. H. Groundwater vulnerability assessment in Savar upazila of Dhaka district, Bangladesh — A GIS-based DRASTIC modeling. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 9, 2019.

HASAN, S. S.; ZHEN, L.; MIAH, M. G.; AHAMED, T.; SAMIE, A. **Impact of land use change on ecosystem services: A review**. [s.l.] Elsevier B.V., 2020.

HÉRIVAUX, C.; GRÉMONT, M. Valuing a diversity of ecosystem services: The way forward to protect strategic groundwater resources for the future? **Ecosystem Services**, v. 35, n. May 2018, p. 184–193, 2019.

HIRATA, R.; FERNANDES, A. J. Vulnerabilidade a Poluição de Aquíferos. *In*: FEITOSA,

F. A. C.; MANOEL-FILHO, J.; DEMETRIO, J. G. (Eds.). . **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.]. p. 812.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V. How much do we know about the groundwater quality and its impact on Brazilian society today? **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 31, n. ii, 2019.

HIRATA, R.; VIVIANI-LIMA, J. B.; HIRATA, H. A água como recurso. *In*: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M. DE; TAIOLI, F. (Eds.). . **Decifrando a Terra**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p. 623.

HUANG, L.; CAO, W.; XU, X.; FAN, J.; WANG, J. Linking the benefits of ecosystem services to sustainable spatial planning of ecological conservation strategies. **Journal of Environmental Management**, v. 222, n. June, p. 385–395, 2018.

IAC. **Levantamento Pedológico semi-detalhado do estado de São Paulo - Quadrícula de Brotas. SF.22-Z-B-III-4**. Campinas: [s.n.].

____. **Solos do estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/solosp/>>. Acesso em: 2 maio. 2017.

IBAMA. **AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL : Agentes Sociais, Procedimentos e Ferramentas**. v. Unico, p. 136, 1995.

IBGE. **IBGE Cidades - Brotas, SP**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/brotas/panorama>>. Acesso em: 22 maio. 2018.

IG/SMA. **UNIDADES BÁSICAS DE COMPARTIMENTAÇÃO DO MEIO FÍSICO (UBC)**. São Paulo: [s.n.].

IPCC. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. United Kingdom and New York: [s.n.].

IPT. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo - Escala 1:500.000**. São Paulo: [s.n.].

JAMES, J. N.; GROSS, C. D.; DWIVEDI, P.; MYERS, T.; SANTOS, F.; BERNARDI, R.; FIDALGO, M.; FARIA, D.; AMARAL, I.; HARRISON, R.; BUTMAN, D. Land use change alters the radiocarbon age and composition of soil and water-soluble organic matter in the Brazilian Cerrado. **Geoderma**, v. 345, n. March, p. 38–50, 2019.

JEONG, J. S.; GARCÍA-MORUNO, L.; HERNÁNDEZ-BLANCO, J.; JARAÍZ-CABANILLAS, F. J. An operational method to supporting siting decisions for sustainable

rural second home planning in ecotourism sites. **Land Use Policy**, v. 41, p. 550–560, 2014.

JÓNSSON, J. Ö. G.; DAVIDSDÓTTIR, B. Classification and valuation of soil ecosystem services. **Agricultural Systems**, v. 145, p. 24–38, 2016.

KADKHODAIE, F.; ASGHARI MOGHADDAM, A.; BARZEGAR, R.; GHAREKHANI, M.; KADKHODAIE, A. Optimizing the DRASTIC vulnerability approach to overcome the subjectivity: a case study from Shabestar plain, Iran. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 16, 2019.

KAINZ, W. **Fuzzy Logic and GIS**. 1. ed. Viena: University of Vienna, 2007.

KERTÉSZ, Á.; NAGY, L. A.; BALÁZS, B. Land Use Policy Effect of land use change on ecosystem services in Lake Balaton Catchment. **Land Use Policy**, v. 80, n. September 2017, p. 430–438, 2019.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. A Conservação do Cerrado Brasileiro. **MEGADIVERSIDADE**, v. 1, n. 1, p. 174–155, 2005.

KLØVE, B. *et al.* Groundwater dependent ecosystems. Part II. Ecosystem services and management in Europe under risk of climate change and land use intensification. **Environmental Science and Policy**, v. 14, n. 7, p. 782–793, 2011.

KNOUZ, N.; BOUDHAR, A.; BACHAOUI, E. M.; SAADI, C. Comparative approach of three popular intrinsic vulnerability methods: case of the Beni Amir groundwater (Morocco). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 11, 2018.

KOSMUS, M.; RENNER, I.; ULLRICH, S. **Integração de Serviços Ecológicos ao Planejamento do Desenvolvimento** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. [s.l: s.n.].

KRISTENSEN, P. **The DPSIR Framework** 2004 Disponível em: <[http://enviro.lclark.edu:8002/rid=1145949501662_742777852_522/DPSIR Overview.pdf](http://enviro.lclark.edu:8002/rid=1145949501662_742777852_522/DPSIR%20Overview.pdf)>

KUANG, Y.; PENG, Y.; SANG, W. International Journal of Geoheritage and Parks Spatial-temporal effects of regional ecosystem services based on RS and GIS — Taking Xiangxi Tujia-Miao autonomous region for example. **International Journal of Geoheritage and Parks**, v. 8, n. 1, p. 48–58, 2020.

KUMAR, A.; DATTA, M.; GURJAR, B. R.; NEMA, A. K.; SINGH, R. K. Response of groundwater contamination hazard rating systems to variations in subsoil conditions beneath municipal solid waste (MSW) dumps in developing countries. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 13, 2019.

LAM, S. T.; CONWAY, T. M. Ecosystem services in urban land use planning policies: A case study of Ontario municipalities. **Land Use Policy**, v. 77, n. September 2017, p. 641–651, 2018.

LAYRARGUES, P. P. A função social do ecoturismo. **Boletim Técnico do Senac**, p. 1–5, 2004.

LOLLO, J. A. DE; GUERRERO, J. V. R.; ABE, A. C. P.; LORANDI, R. **IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 - Volume 2**. [s.l.] Springer International Publishing, 2019. v. 2

MACEDO, R.; DORNELES, L.; KORASAKI, V.; LOUZADA, J. Agriculture , Ecosystems and Environment Conversion of Cerrado savannas into exotic pastures : The relative importance of vegetation and food resources for dung beetle assemblages. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 288, n. June 2018, p. 106709, 2020.

MACHADO, A. L.; PACHECO, J. B. Serviços ecossistêmicos e o ciclo hidrológico da bacia hidrográfica amazônica. **Revista Geonorte**, v. 1, n. 1, p. 71–89, 2010.

MACHADO, R. A. S.; OLIVEIRA, A. G.; LOIS-GONZÁLEZ, R. C. Urban ecological infrastructure: The importance of vegetation cover in the control of floods and landslides in Salvador / Bahia, Brazil. **Land Use Policy**, v. 89, n. December 2018, p. 104180, 2019.

MAFRA, N. M. C. Erosion and Land Use Planification. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. DA; BOTELHO, R. G. M. (Eds.). . **Soil Erosion and Conservation**. [s.l.] Rio De Janeiro, 2012. p. 340.

MALCZEWSKI, J. On the use of weighted linear combination method in GIS: Common and best practice approaches. **Transactions in GIS**, v. 4, n. 1, p. 5–22, 2000.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 7, p. 703–726, 2006.

MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. **Multicriteria Decision Analysis in Geographic**

Information Science. [s.l: s.n.].

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. **Zoneamento Agroecológico da Cana-de Açúcar Expandir a produção , preservar a vida , garantir o futuro** Documentos 110. [s.l: s.n.].

MANZIONE, R. L.; SOLDERA, B. C.; WENDLAND, E. C. Groundwater system response at sites with different agricultural land uses: case of the Guarani Aquifer outcrop area, Brotas/SP-Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 62, n. 1, p. 28–35, 2017.

MAPBIOMAS. **Coleção 4 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**,. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 22 jan. 2020.

MARCHESE, D.; REYNOLDS, E.; BATES, M. E.; MORGAN, H.; CLARK, S. S.; LINKOV, I. Resilience and sustainability: Similarities and differences in environmental management applications. **Science of the Total Environment**, v. 613–614, p. 1275–1283, 2018.

MARINONI, O. **Spatial multi-criteria analysis using the Analytic Hierarchy Process (AHP) – use of the ArcGIS extension “ extAhp 20 ”.** [s.l: s.n.].

MARTINELLI, M.; PEDROTTI, F. a Cartografia Das Unidades De Paisagem : Questões Metodológicas. **Revista do Departamento de Geografia da Universidade Federal de São Paulo - USP**, v. 14, p. 39–46, 2001.

MARTINS, R. C.; MADUREIRA, G. A. Do “buraco” ao atrativo turístico: uma sociologia da ressignificação do rural. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 57, n. 2, p. 326–338, 2019.

MATAVELI, G. A. V.; GUERRERO, J. V. R.; CHAVES, M. E. D.; JUSTINO, R. C.; KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G. O Programa Conservador das Águas e sua Relação com o Uso da Terra em Extrema-MG. **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 36, p. 130–140, 2018.

MEA, M. E. A. **Ecosystems and Human Well-Being**. Genebra: World Health Organization, 2005. v. 1

MELADO, J. **Manejo Sustentável de Pastagens. Pastoreio Voisin – Manejo de Pastagem Ecológica** Curso de Manejo Sustentável de Pastagens. [s.l: s.n.].

METZGER, J. P.; BUSTAMANTE, M. M. C.; FERREIRA, J.; FERNANDES, G. W.; LIBRÁN-EMBID, F.; PILLAR, V. D.; PRIST, P. R.; RODRIGUES, R. R.; VIEIRA, I. C. G.;

OVERBECK, G. E. Why Brazil needs its Legal Reserves. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 17, n. 3, p. 91–103, 2019.

MEZZALIRA, S. **LEXICO ESTRATIGRÁFICO DO ESTADO DE SAO PAULO**. São Paulo: [s.n.].

MFONKA, Z.; NDAM NGOUPAYOU, J. R.; NDJIGUI, P. D.; KPOUMIE, A.; ZAMMOURI, M.; NGOUH, A. N.; MOUNCHEROU, O. F.; RAKOTONDRABE, F.; RASOLOMANANA, E. H. A GIS-based DRASTIC and GOD models for assessing alterites aquifer of three experimental watersheds in Fouban (Western-Cameroon). **Groundwater for Sustainable Development**, v. 7, n. August 2017, p. 250–264, 2018.

MICHETTE, J. F. **Modelos de Previsão de Erosão Pluvial Utilizando SIG: Estudo na Bacia Hidrográfica da Represa do Lobo (BROA), SP**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.

MMA. **Aquífero Guarani**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/informma/item/8617-aquifero-guarani>>. Acesso em: 5 ago. 2020.

____. **Zoneamento Ambiental Municipal**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/planejamento-ambiental-e-territorial-urbano/itemlist/category/62-planejamento-ambiental-urbano.html>>. Acesso em: 20 ago. 2020a.

____. **Zoneamento Ambiental Municipal: O Meio Ambiente contribuindo para o planejamento urbano**. [s.l.: s.n.].

MONDINO, E.; BEERY, T. Ecotourism as a learning tool for sustainable development. The case of Monviso Transboundary Biosphere Reserve, Italy. **Journal of Ecotourism**, v. 18, n. 2, p. 107–121, 2019.

MORAES, C. C. M. DE; SANTANA, M. S.; SIMÕES, P. M. L.; CONCEIÇÃO, R. A. C. DA; SILVA, S. F. DA. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Brotas, SP**. Brasília: [s.n.].

MORAVCIKOVA, D.; KRIZANOVA, A.; KLIESTIKOVA, J.; RYPAKOVA, M. Green marketing as the source of the competitive advantage of the business. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 12, p. 1–13, 2017.

MOREIRA, F. R.; BARBOSA, C.; CÂMARA, G.; FILHO, R. A. Inferência Geográfica e

suporte à decisão. *In*: CÂMARA, G. (Ed.). . **Introdução à Ciência da Geoinformação**. [s.l.] INPE, 2001. .

NAHUELHUAL, L.; CARMONA, A.; LOZADA, P.; JARAMILLO, A.; AGUAYO, M. Mapping recreation and ecotourism as a cultural ecosystem service : An application at the local level in Southern Chile. **Applied Geography**, v. 40, p. 71–82, 2013.

NARDINI, R.; CAMPOS, S.; GOMES, L.; MOREIRA, K.; PIZA, M. Analysis of Land Use and Occupancy in Permanent Preservation AREAS ACCORDING TO THE HYDROGRAPHY OF RIBEIRÃO ÁGUA FRIA - BOFETE, SP - BRAZIL. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v. 32, n. 5, p. 944–950, 2012.

NESHAT, A.; PRADHAN, B. Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC framework and GIS. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 10, n. 22, 2017.

NÓBREGA, R.; ZIEMBOWICZ, T.; TORRES, G. N.; RODOLFO, L. B. N.; GUZHA, A. C.; AMORIM, R. S. S.; CARDOSO, D.; JOHNSON, M. S.; SANTOS, T. G.; COUTO, E.; GEROLD, G. Ecosystem services of a functionally diverse riparian zone in the Amazon e Cerrado agricultural frontier. v. 21, 2020.

NUNES, S.; GASTAUER, M.; CAVALCANTE, R. B. L.; RAMOS, S. J.; CALDEIRA, C. F.; SILVA, D.; RODRIGUES, R. R.; SALOMÃO, R.; OLIVEIRA, M.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; SIQUEIRA, J. O. Challenges and opportunities for large-scale reforestation in the Eastern Amazon using native species. **Forest Ecology and Management**, v. 466, n. December 2019, p. 118120, 2020.

OLIVEIRA, J. P. B. DE; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; ZANETTI, S. S.; MOREIRA, M. C. Assessing the use of rainfall synthetic series to estimate rainfall erosivity in Brazil. **Catena**, v. 171, n. October 2017, p. 327–336, 2018.

OLIVEIRA, T. E. DE; FREITAS, D. S. DE; GIANEZINI, M.; RUVIARO, C. F.; ZAGO, D.; MÉRCIO, T. Z.; DIAS, E. A.; LAMPERT, V. DO N.; BARCELLOS, J. O. J. Agricultural land use change in the Brazilian Pampa Biome: The reduction of natural grasslands. **Land Use Policy**, v. 63, p. 394–400, 2017.

OLSON, K. R.; AL-KAISI, M.; LAL, R.; MORTON, L. W. Soil ecosystem services and intensified cropping systems. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 72, n. 3, p. 64A-69A, 2017.

OTA, L.; HERBOHN, J.; GREGORIO, N.; HARRISON, S. Reforestation and smallholder

livelihoods in the humid tropics. **Land Use Policy**, v. 92, n. December 2019, p. 104455, 2020.

PADILHA, A. C. M.; AZEVEDO, J. B.; WITTMANN, M. L.; DOCENA, L. T.; FAGUNDES, P. DE M. Turismo rural e recursos hídricos no município de Carazinho (RS): um estudo empírico identificando oportunidades e desafios. **Revista Brasileira de Ecoturismo (RBEcotur)**, v. 8, n. 1, p. 74–92, 2015.

PAPADAS, K. K.; AVLONITIS, G. J.; CARRIGAN, M. Green marketing orientation: Conceptualization, scale development and validation. **Journal of Business Research**, v. 80, n. November 2016, p. 236–246, 2017.

PARAMATI, S. R.; ALAM, S.; CHEN, C. The Effects of Tourism on Economic Growth and CO 2 Emissions : A Comparison between Developed and Developing Economies. 2016.

PARIZI, E.; HOSSEINI, S. M.; ATAIE-ASHTIANI, B.; SIMMONS, C. T. Vulnerability mapping of coastal aquifers to seawater intrusion: Review, development and application. **Journal of Hydrology**, v. 570, n. December 2018, p. 555–573, 2019.

PARRON, LUCILIA MARIA; GARCIA, JUNIOR RUIZ; OLIVEIRA, EDILSON BATISTA DE ; BROWN, GEORGE GARDNER; PRADO, R. B. **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. [s.l: s.n.].

PARRON, L. M.; FIDALGO, E. C. C.; LUZ, A. P.; CAMPANHA, M. M.; TURETTA, A. P. D.; PEDREIRA, B. C. C. G.; PRADO, R. B. Research on ecosystem services in Brazil: a systematic review. **Revista Ambiente e Agua**, v. 14, n. 3, p. 445–458, 2019.

PAUDYAL, K.; BARAL, H.; BHANDARI, S. P.; BHANDARI, A.; KEENAN, R. J. Spatial assessment of the impact of land use and land cover change on supply of ecosystem services in Phewa watershed , Nepal. **Ecosystem Services**, v. 36, n. January, p. 100895, 2019.

PEDRETTI, D.; LUOMA, S.; RUSKEENIEMI, T.; BACKMAN, B. A geologically-based approach to map arsenic risk in crystalline aquifers: Analysis of the Tampere region, Finland. **Geoscience Frontiers**, v. 10, n. 5, p. 1731–1741, 2019.

PEIXOTO, C. A. B. **Geodiversidade do Estado de São Paulo**. 1. ed. São Paulo: CPRM, 2010a.

____. **Geodiversidade do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: [s.n.].

- PENTEADO, M. M. **Fundamentos de geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 1983.
- PEREIRA, F.; DIAS, M.; HÜBNER, R.; JESUS, F. DE; MOZENA, W.; ALISSON, F. Effects of land-use change on chemical attributes of a Ferralsol in Brazilian Cerrado. **Catena**, v. 177, n. September 2018, p. 180–188, 2019.
- PEREIRA, M. F. V.; GONÇALVES, A. R. O ECOTURISMO EM BROTAS-SP: AÇÃO PÚBLICA E PRIVADA NA PRODUÇÃO DA LOCALIDADE TURÍSTICA. **GEOGRAFIA**, v. 29, n. 2, p. 159–167, 2004.
- PEREIRA, P.; BOGUNOVIC, I.; MUÑOZ-ROJAS, M.; BREVIK, E. C. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, v. 5, p. 7–13, 2018.
- POR TRÁS DO ALIMENTO, I. **Você Bebe Agrotóxicos?** Disponível em: <<https://portrasdoalimento.info/>>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- PRADO, R. B. *et al.* Pesquisas em serviços ecossistêmicos e ambientais na paisagem rural do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 02, p. 610–622, 2015.
- PUGA, B. P.; JUNIOR, O. A.; HIRATA, R. C. A.; BERTOLO, R. A. Valoração De Serviços Ecossistêmicos De Águas Subterrâneas: Notas Introdutórias. **Águas Subterrâneas**, v. 353, n. 19, p. 1–14, 2015.
- RABELO, J. L. **Estudo Da Recarga Do Aquífero Guarani No Sistema Jacaré-Tietê**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2006.
- RAINERO, C.; MODARELLI, G. The attractive power of rural destinations and a synergistic community cooperative approach: A “tourismability” case. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 17, 2020.
- RANGANATHAN, J.; LUCAS, N.; IRWIN, F.; ZUREK, MO.; BENNET, K.; ASH, N.; WEST, P. **Ecosystem Services: A Guide for Decision Makers**. 1. ed. Washington: Word Resources Institute, 2008. v. 2
- RECH, A. U.; RECH, A. O zoneamento ambiental, urbanístico e agrário como instrumentos de tutela efetiva e eficaz do meio ambiente. *In*: RECH, A. U.; RECH, A. (Eds.). **Zoneamento ambiental como plataforma de planejamento da sustentabilidade**. Caxias do Sul: Educs, 2012. p. 35–68.
- REE, C. C. D. F. VAN; BEUKERING, P. J. H. VAN. Geosystem services: A concept in

support of sustainable development of the subsurface. **Ecosystem Services**, v. 20, p. 30–36, 2016.

REGRA, A. P. M. **Cenários como ferramenta na gestão ambiental municipal : um estudo de caso em Brotas – SP**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2013.

REIS, A. A. DOS; TEIXEIRA, M. D.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; MELLO, J. M. DE; LEITE, L. R.; SILVA, S. T. DA. Land use and occupation analysis of Permanent Preservation Areas in Lavras County, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, n. 3, p. 300–308, 2012.

REPÓRTERBRASIL. **Por trás do alimento: Você bebe agrotóxicos?** Disponível em: <<https://portrasdoalimento.info/agrotoxico-na-agua/>>.

RIBEIRO, O. C. F.; AMARAL, SI. C. F. Entre o lazer esportivo participativo e ambiental e o lazer turístico - As políticas públicas de lazer em Brotas/SP. **Movimento - Revista da Escola de Educação Física da UFRGS**, v. 1, p. 63–74, 2016.

RONCHI, S. **Ecosystem Services for Spatial Planning. Innovative Approaches and Challenges for Practical Applications**. [s.l: s.n.].

RONQUIM, C. C. **Queimada na colheita da cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos**. Campinas: [s.n.].

RONQUIM, C. C.; APARECIDA, C.; RODRIGUES, G.; FONSECA, M. F.; GRANNIER, V.; PINTO, B. **Dinâmica da mudança de uso e cobertura da terra e adequação ambiental dos municípios de Bonito (MS) e Brotas (SP)** Anais 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. **Anais...2018** Disponível em: <<https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/Anais-Geopantanal/pdfs/p70.pdf>>

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, 1994.

____. Landforms and Environmental planning. p. 38–51, 2012.

ROSS, J. L. S.; GOUVEIA, I. C. M. MAPA GEOMORFOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 10, n. 1, 2011.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. MAPA GEOMORFOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 10, p. 1–18, 1996.

RUPRECHT, J.; SPARKS, T.; LIU, N.; DELL, B.; HARPER, R. Using reforestation to reverse salinisation in a large watershed. **Journal of Hydrology**, v. 577, n. May, p.

123976, 2019.

SAATY, T. L. **The Analytical Hierarchy Process**. New York: Mc Graw Hill International, 1980.

SAHA, D.; ALAM, F. Groundwater vulnerability assessment using DRASTIC and Pesticide DRASTIC models in intense agriculture area of the Gangetic plains, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 12, p. 8741–8763, 2014.

SAHANI, N. Assessment of ecotourism potentiality in GHNPCA , Himachal Pradesh , India , using remote sensing , GIS. **Asia-Pacific Journal of Regional Science**, n. 0123456789, 2019.

SALEMI, M.; JOZI, S. A.; MALMASI, S.; REZAIAN, S. Conceptual framework for evaluation of ecotourism carrying capacity for sustainable development of Karkheh protected area, Iran. **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, v. 26, n. 4, p. 354–366, 2019.

SALIS, S. M. DE. **COMPOSIÇÃO FLORÍSTICA E ESTRUTURA DE UM REMANESCENTE DE MATA CILIAR DO RIO JACARÉ-PEPIRA, BROTAS, SP.** [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 1990.

SALOMÃO, F. X. DE T. Controle e Prevenção dos procesos erosivos. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. DA; BOTELHO, R. G. M. (Eds.). . **Erosão e Conservação dos Solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. p. 338.

SAMPAIO, E. V. D. S. B.; COSTA, T. L. DA. Revista Brasileira de Geografia Física. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, p. 1275–1291, 2011.

SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO, A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHÜLER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions : A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, n. December 2018, p. 818–828, 2019.

SANTANA, E. L.; SANTOS, J. C. V. Lago de São Simão e o desenvolvimento do turismo rural: uma nova atividade econômica sustentada pelo trabalho familiar. **Revista Brasileira de Ecoturismo (RBEcotur)**, v. 9, n. 6, p. 668–683, 2016.

SANTOS SILVA, M. P. DOS; CAMARA, G.; ESCADA, M. I. S.; MODESTO DE SOUZA,

R. C. Remote-sensing image mining: Detecting agents of land-use change in tropical forest areas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 16, p. 4803–4822, 2008.

SÃO PAULO. **Decree 51.150 / 2006 - Private Reserves of Natural Heritage, within the scope of State of Sao Paulo**, 2006.

SCHÄFFER, W. B.; ROSA, M. R.; AQUINO, L. C. S. DE; MEDEIROS, J. DE D. **Áreas de Preservação Permanente e Unidades de Conservação & Áreas de Risco. O que uma coisa tem a ver com a outra? Relatório de Inspeção da área atingida pela tragédia das chuvas na Região Serrana do Rio de Janeiro**. [s.l: s.n.]. v. 41

SCHIELEIN, J.; BÖRNER, J. Recent transformations of land-use and land-cover dynamics across different deforestation frontiers in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 76, n. April, p. 81–94, 2018.

SEVERIANO, R. M.; SILVA, D. T.; ESTADUAL, U.; UNESP, P.; PRUDENTE, P.; PAULO, S. RECUPERAÇÃO DE EROSÃO EM ÁREA RURAL LOCALIZADA EM PRESIDENTE PRUDENTE - SP LOW COST METHODOLOGY APPLICATION FOR EROSION RECOVERY IN RURAL AREA LACATED IN PRESIDENT PRUDENTE - SP RECUPERACIÓN DE EROSIÓN EN ZONA RURAL UBICADA EN PRESIDENTE PRUDENTE - SP Int. **Caderno Prudentino de Geografia**, p. 141–159, 2017.

SGROI, F. Forest resources and sustainable tourism, a combination for the resilience of the landscape and development of mountain areas. **Science of the Total Environment**, v. 736, p. 139539, 2020.

SILVA BARBALHO, M. G. DA; BORGES DE CAMPOS, A. Vulnerabilidade Natural Dos Solos E Águas Do Estado De Goiás À Contaminação Por Vinhaça Utilizada Na Fertirrigação Da Cultura De Cana De-Açúcar. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 30, n. 1, 2010.

SILVA, F. DE P. E. **Geologia de superfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no estado de São Paulo**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2003.

SILVA, J. L.; TONELLO, K. C.; MINGOTI, R. Diagnóstico ambiental como subsídio à restauração florestal e manutenção hidrológica da bacia do ribeirão dos Pinheirinhos, Brotas – SP. **Irriga**, v. 21, n. 1, p. 1–13, 2016.

SILVA, K. B.; MATTOS, J. B. A spatial approach for the management of groundwater quality in tourist destinations. **Tourism Management**, v. 79, n. January, p. 104079, 2020.

SILVA, M. C. DA. **AVALIAÇÃO DOS CONFLITOS DE USO E OCUPAÇÃO DE TERRAS E SEUS IMPACTOS NA PROVISÃO DOS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS NA MICROBACIA DO RIO DO PRATA.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

SINDICO, F.; HIRATA, R.; MANGANELLI, A. The Guarani Aquifer System: From a Beacon of hope to a question mark in the governance of transboundary aquifers. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 20, n. April, p. 49–59, 2018.

SONTER, L. J.; MORAN, C. J.; BARRETT, D. J.; SOARES-FILHO, B. S. Processes of land use change in mining regions. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, n. 1, p. 494–501, 2014.

SOUZA, L. C. DE. O município como partícipe na proteção das águas subterrâneas no Brasil. **Boletín Geológico y Minero**, v. 123, n. 3, p. 377–388, 2012.

SOUZA, V.; GALVANI, E. Determinação do Potencial Natural à erosão laminar na bacia do rio Jacaré Guaçu (SP). **RAEGA - O espaço geográfico em análise**, v. 39, p. 8–23, 2017.

STURIALE, L.; SCUDERI, A.; TIMPANARO, G.; MATARAZZO, B. Sustainable use and conservation of the environmental resources of the etna park (unesco heritage): Evaluation model supporting sustainable local development strategies. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 4, p. 1–16, 2020.

SU, C.; LIU, H.; WANG, S. A process-based framework for soil ecosystem services study and management. **Science of the Total Environment**, v. 627, p. 282–289, 2018.

TANAJURA, D. DA S.; LEITE, C. B. B. QUANTIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA JACARÉ-PEPIRA/SP. **Águas Subterrâneas**, v. 30, n. 3, p. 306–325, 2016.

TEIXEIRA, J.; CHAMINÉ, H. I.; ESPINHA MARQUES, J.; CARVALHO, J. M.; PEREIRA, A. J. S. C.; CARVALHO, M. R.; FONSECA, P. E.; PÉREZ-ALBERTI, A.; ROCHA, F. A comprehensive analysis of groundwater resources using GIS and multicriteria tools (Caldas da Cavaca, Central Portugal): environmental issues. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 6, p. 2699–2715, 2015.

TERRITORIOSELVAGEM. **EcoParque Jacaré.** Disponível em: <<https://www.territorioselvagem.com.br/atividades/eco-parque-jacare/>>. Acesso em: 5

maio. 2020.

The dynamics of tourism discourses and policy in Brazil. **Annals of Tourism Research**, v. 57, p. 1–17, 2016.

THOMPSON, B. S.; FRIESS, D. A. Stakeholder preferences for payments for ecosystem services (PES) versus other environmental management approaches for mangrove forests. **Journal of Environmental Management**, v. 233, n. August 2018, p. 636–648, 2019.

TIMOTHY FOX; JASON ROHWEDER; HLAVACEK, E.; JENNIFER J DIECK. **Decision Support Systems**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/umesc/science/decision-support-systems?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>. Acesso em: 28 maio. 2020.

TRICART, J. **Ecodinâmica**, 1977. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS - RJ/ecodinamica.pdf>>

UN-WATER. **UN-Water Annual Report**. Genebra: [s.n.]. Disponível em: <https://www.rtda.gov.rw/fileadmin/templates/publications/RWANDA_Annual_Report_2018-2019_SHARING.pdf>.

URBES. **Ecosystem services in urban areasThe Urbes Project**. [s.l: s.n.].

VALADARES, A.; ALVES, F.; GALIZA, M. **O crescimento do uso de agrotóxicos: uma análise descritiva dos resultados do censo agropecuário 2017Ipea**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes%0AAs>>.

VALENTIN, F. A. DA S. **ANÁLISE DO CONTROLE, RECUPERAÇÃO E PREVENÇÃO DA EROSIÃO HÍDRICA NO PARQUE CESAMAR EM PALMAS-TO**. [s.l.] Centro Universitario Luterano de Palmas, 2018.

VALERIANO, M. D. M. **Topodata : Guia Para Utilização De DadosIpea**. [s.l: s.n.].

VARGAS, L.; SAATY, T. **Prediction, Projection and Forecasting**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.

VERÍSSIMO, M. P.; XAVIER, C. L. Tipos de commodities, taxa de câmbio e crescimento econômico: Evidências da maldição dos recursos naturais para o Brasil. **Revista de Economia Contemporanea**, v. 18, n. 2, p. 267–295, 2014.

VEZZANI, F. M. Solos e os serviços ecossistêmicos. **Revista Brasileira de Geografia**

Física, v. 08, n. especial IV SMUD, p. 673–684, 2015.

WALKER, B.; HOOLING, C. S.; CARPENTER, S.; KINZIG, A. Resilience, Adaptability and Transformability in Social– ecological Systems. **Ecology and Society**, v. 9, n. 2, 2004.

WEBSTER, K. L.; BEALL, F. D.; CREED, I. F.; KREUTZWEISER, D. P. Impacts and prognosis of natural resource development on water and wetlands in Canada's boreal zone. **Environmental Reviews**, v. 23, n. 1, p. 78–131, 2015.

WOODRUFF, S. C.; BENDOR, T. K. Ecosystem services in urban planning: Comparative paradigms and guidelines for high quality plans. **Landscape and Urban Planning**, v. 152, p. 90–100, 2016.

WU, S.; LIANG, Z.; LIU, Y. Quantifying the risk of irreversible degradation for ecosystems: A probabilistic method based on Bayesian inference. **Ecological Indicators**, v. 107, n. August, p. 105621, 2019.

ZACHARIAS, A. A. **A representação gráfica das unidades de paisagem no zoneamento ambiental**. Ourinhos: EDITORA UNESP, 2010.

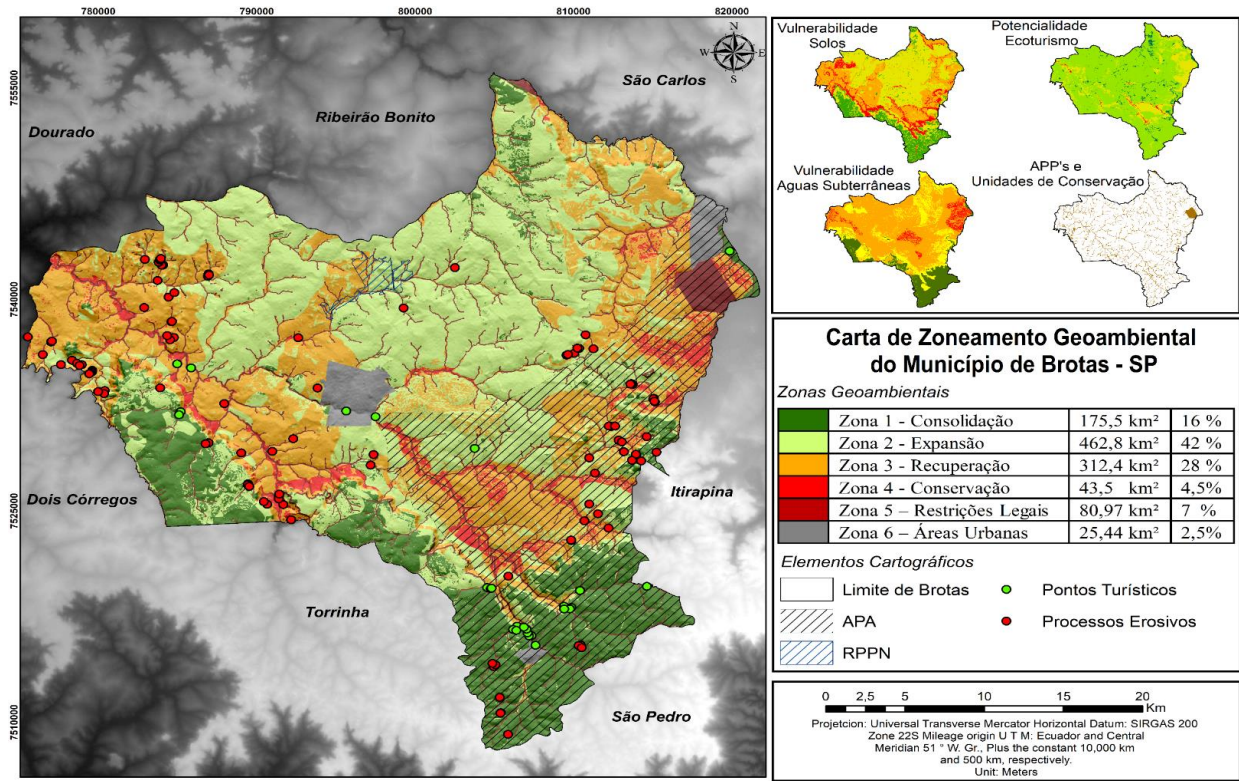
ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338–353, 1965.

ZAINE, J. E. **GEOLOGIA DA FORMAÇÃO RIO CLARO NA FOLHA RIO CLARO (SP)**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 1994.

ZONTA, J. H.; SOFIATTI, V.; COSTA, A. G.; SILVA, O. R. R. F. DA; BEZERRA, J. R. C. **Práticas de Conservação de Solo e Água Circular Técnica 133 - EMBRAPA**. [s.l: s.n.].

APÊNDICE

Zoneamento Geoambiental do Município de Brotas, SP



Carta de Zoneamento Geoambiental do Município de Brotas - SP

Zonas Geoambientais

Zona 1 - Consolidação	175,5 km ²	16 %
Zona 2 - Expansão	462,8 km ²	42 %
Zona 3 - Recuperação	312,4 km ²	28 %
Zona 4 - Conservação	43,5 km ²	4,5%
Zona 5 - Restrições Legais	80,97 km ²	7 %
Zona 6 - Áreas Urbanas	25,44 km ²	2,5%

Elementos Cartográficos

- Limite de Brotas
- APA
- RPPN
- Pontos Turísticos
- Processos Erosivos

Zona Geoambiental	Principais Tipos de Uso	Serviços Ecosistêmicos Essenciais			Principais Características e Recomendações
		Água Subterrânea (vulnerabilidade)	Ecoturismo (potencial)	Solos (vulnerabilidade)	
Z1 - Consolidação	Cana-de-açúcar (45%), Pastagens (18%), Florestas (14%), Anuais (9%), Silvicultura (9%)	Baixa	Muito Alto	Baixa	Zona com maior estabilidade ecodinâmica e, assim, com maior favorabilidade para a exploração antrópica da paisagem, com menores riscos aos serviços ecossistêmicos.
Z2 - Expansão	Cana-de-açúcar (32%), Silvicultura (19%), Pastagens (17%)	Alta	Alto	Moderada	Zona de alta complexidade entre as vulnerabilidades e potencialidades. Diante dessa complexidade, a recomendação é de incentivo a atividades agrícolas sustentáveis (agroecologia, rotação de culturas e pastagens, adubação orgânica) e incentivo a atividades ecoturísticas de baixo impacto, como vetor de ressignificação da paisagem.
Z3 - Recuperação	Pastagens (30%), Cana-de-açúcar (25%), Formações Naturais (21%)	Moderada a Alta	Moderado a Alto	Alta e Muito Alta (nas regiões mais declivosas)	Área de relevo acidentado, propícia à degradação relativa a atividades de alto impacto. Recomendação para a aplicação de atividades de recuperação tais como: isolamento das áreas degradadas, ordenamento e dissipação das águas superficiais, reconformação de barrancos / taludes com práticas mecânicas, proteção dos solos, e revegetação.
Z4 - Conservação	Florestas (devido à impossibilidade construtiva) e Cana.	Alta a Muito Alta	Moderado a Baixo	Muito Alta	Área crítica com altas vulnerabilidades e baixas potencialidades devido ao relevo acidentado. Devido aos riscos, sugere-se transformar essa zona em unidade de conservação de proteção integral para limitar totalmente os usos antrópicos.
Z5 - Restrições Legais	55 % natural, 45% de atividades antrópicas que não condizem com a legislação vigente.	Alta a Muito Alta	Moderado a Baixo	Moderada a Muito Alta	Área delimitada pelas restrições legais quanto a dinâmica de uso. A legislação exige que tais áreas sejam recobertas apenas por vegetação, sendo permitidos apenas usos extrativistas de baixo impacto.
Z6 - Áreas Urbanas	Urbanização, áreas florestadas (Patrimônio e Broa), Pastagens.	Alta a Muito Alta	Alto	Moderada a Alta	Recomenda-se diagnosticar, analisar e proteger os serviços ecossistêmicos urbanos em prol da qualidade de vida dos habitantes locais