

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Henrique Noguez da Cunha

**POTENCIALIDADE DAS TERRAS PARA USO AGRÍCOLA DE
BIOSSÓLIDOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NA REGIÃO
INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA-RS**

Santa Maria, RS
2023

HENRIQUE NOGUEZ DA CUNHA

**POTENCIALIDADE DAS TERRAS PARA USO AGRÍCOLA DE
BIOSSÓLIDOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NA REGIÃO
INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA-RS**

Tese de doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Geografia da Universidade Federal
de Santa Maria (UFSM, RS), como
requisito parcial para a obtenção do
título de Doutor em Geografia

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Sayao Penna e Souza

Santa Maria, RS
2023

Cunha, Henrique
POTENCIALIDADE DAS TERRAS PARA USO AGRÍCOLA DE
BIOSSÓLIDOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NA REGIÃO
INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA-RS / Henrique Cunha.- 2022.
117 p.; 30 cm

Orientador: Bernardo Sayão Penna e Souza
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Geografia, RS, 2022

1. Geoprocessamento 2. Zoneamento Edáfico 3.
Biossólidos na agricultura 4. Destinação segura ao lodo de
esgoto 5. Uso e cobertura da terra I. Sayão Penna e
Souza, Bernardo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, HENRIQUE CUNHA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

HENRIQUE NOGUEZ DA CUNHA

**POTENCIALIDADE DAS TERRAS PARA USO AGRÍCOLA DE
BIOSSÓLIDOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NA REGIÃO
INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA-RS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Geografia.

Aprovada em: 27 de janeiro de 2023.

Bernardo Sayão Penna e Souza, Dr. (UFSM) – (Presidente/Orientador)

Mauro Kumpfer Werlang, Dr. (UFSM)

Waterloo Pereira Filho, Dr. (UFSM)

Adalberto Koiti Miura, Dr. (Embrapa)

Diuliana Leandro, Dra. (UFPel)

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-graduação em Geografia pela oportunidade de formação e capacitação profissional.

Ao meu orientador Prof. Dr. Bernardo Sayao Penna e Souza, pela paciência, amizade e confiança depositada.

Aos professores e colegas do PPGGEO, pela amizade e companheirismo.

Aos colegas e ex-colegas do LABPLAM da Embrapa Clima Temperado.

Aos meus amigos pelo carinho e amizade, que deram apoio e estiveram presentes nos diversos momentos desta trajetória.

À minha família pela educação, amor, carinho, conselhos e apoio em toda minha trajetória.

RESUMO

O processo de tratamento do esgoto sanitário produz um lodo residual que, quando neutralizado e higienizado em forma de bio sólido, pode ser reciclado em utilização como fertilizante e condicionador do solo. O presente estudo avaliou as áreas potenciais para o uso de bio sólidos de lodo de esgoto, resultante do processo de tratamento de esgotamento sanitário na região intermediária Santa Maria/RS. Na análise foram identificadas as áreas que não possuem permissão legal com base na resolução CONAMA 375/06 a partir de dados de solos, geomorfologia, profundidade do lençol freático, proximidade com áreas urbanizadas e sistema viário, assim como áreas de preservação permanente. Foi também avaliada a aptidão do solo para o recebimento de bio sólido. Essas informações foram interpretadas para indicar áreas e usos da terra prioritários na região intermediária de Santa Maria-RS. A região intermediária Santa Maria é subdividida em quatro regiões imediatas e os resultados foram descritos para cada região imediata e para a região intermediária. A região intermediária apresentou 42% de sua área permitida ao uso de forma superficial e sem incorporação, 49% ao uso superficialmente com incorporação, 51% de forma subsuperficial e em sulcos e 52% com aplicação dentro de covas. A análise da aptidão do solo em áreas legalmente permitidas retornou para uma predominância de área restrita, com a presença de áreas aptas e inaptas. A identificação das classes de usos prioritários foi estabelecida pela adoção das duas classes agrossilvopastoris de maior abrangência na região intermediária, agricultura e agropecuária. Esse resultado revelou classes de usos prioritários em áreas com ou sem aptidão do solo ao uso de bio sólido em áreas legalmente permitidas.

Palavras-chave: Geoprocessamento; uso e cobertura da terra; lodo de esgoto

ABSTRACT

The sewage treatment process generates a residual sludge that can be transformed into a safe and usable product, called biosolids, through neutralization and sanitation processes. These biosolids can be used as fertilizer and soil enhancer. This study aimed to identify the potential areas for the use of sewage sludge biosolids in the Santa Maria intermediate region Rio Grande do Sul/Brazil. The analysis was based on data from soil, geomorphology, depth of the groundwater table, proximity to urban areas and roads, and permanent preservation areas, and it was performed in accordance with the CONAMA 375/06 resolution. Furthermore, the study evaluated the soil's suitability for the reception of biosolids. These results were interpreted to highlight priority land use areas in the Santa Maria-RS intermediate region. The Santa Maria intermediate region was divided into four subregions, and the results were reported for each subregion and the intermediate region as a whole. The intermediate region showed that 42% of its area could be used superficially without incorporation, 49% could be used superficially with incorporation, 51% could be used subsurface and in furrows, and 52% could be applied within pits. The soil suitability analysis in legally allowed areas showed that most of the area was restricted, with both suitable and unsuitable areas. The two most prominent agrosilvopastoral classes in the intermediate region were agriculture and livestock farming, and they were considered as priority use classes, regardless of soil suitability for biosolid use.

Keywords: Geoprocessing; land use and land cover; sewage sludge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Províncias geomorfológicas/geológicas do Rio Grande do Sul e sua classificação quanto a presença natural de metais no solo. Elaborado pelo autor.	29
Figura 2. Municípios do Rio Grande do Sul com mais de 100 mil habitantes urbanos. Elaborado pelo autor.	33
Figura 3. População atendida por coleta e tratamento de esgoto sanitário nos municípios do estado do Rio Grande do Sul. Elaborado pelo autor.	34
Figura 4. Estimativa de geração de lodo em ETEs nos municípios do RS. Elaborado pelo autor.	34
Figura 5. Situação Geográfica da Região Intermediária Santa Maria/RS.....	38
Figura 6. População dos municípios da Região Intermediária Santa Maria/RS.	41
Figura 7. Índices do bloco Educação na Região Intermediária Santa Maria/RS.	43
Figura 8. Índices do bloco Saúde na Região Intermediária Santa Maria/RS... 43	43
Figura 9. Índices do bloco Renda na Região Intermediária Santa Maria/RS... 44	44
Figura 10. Índices de desenvolvimento socioeconômico do ano de 2019 na Região Intermediária Santa Maria/RS.....	45
Figura 11. a) Dinâmica de cultivos temporários na Região Imediata Cachoeira do Sul; b) Dinâmica de cultivos temporários na Região Imediata Santa Maria; c) Dinâmica de cultivos temporários na Região Imediata Santiago; d) Dinâmica de cultivos temporários na Região Imediata São Gabriel-Caçapava do Sul.	47
Figura 12. Avanço do cultivo de soja nas regiões imediatas da Região Intermediária Santa Maria/RS.	48
Figura 13. Área dos municípios com cultivo de soja nas regiões imediatas da Região Intermediária Santa Maria/RS.....	49
Figura 14. a) Dinâmica da pecuária na Região Imediata Cachoeira do Sul; b) Dinâmica da pecuária na Região Imediata Santa Maria; c) Dinâmica da pecuária na Região Imediata Santiago; d) Dinâmica da pecuária na Região Imediata São Gabriel-Caçapava do Sul.	50
Figura 15. Dinâmica da pecuária nas regiões imediatas da Região Intermediária Santa Maria/RS	52
Figura 16. Pecuária nos municípios que compõem a Região Intermediária Santa Maria/RS.	53
Figura 17. Dinâmica da silvicultura nas regiões imediatas da Região Intermediária Santa Maria/RS.	54
Figura 18. Silvicultura nos municípios que compõem a Região Intermediária Santa Maria/RS.....	55

Figura 19. Dinâmica do PIB nas regiões imediatas da Região Intermediária Santa Maria/RS.....	55
Figura 20. Mapa dos tipos de rochas da Região Intermediária Santa Maria-RS.	57
Figura 21. Unidades de Relevo da Região Intermediária Santa Maria-RS.....	58
Figura 22. Classes de Relevo e declividades da Região Intermediária Santa Maria-RS.	59
Figura 23. Classes de solos da Região Intermediária Santa Maria-RS.....	60
Figura 24. Classes Climáticas da Região Intermediária Santa Maria-RS.....	62
Figura 25. Biomas sobre a Região Intermediária Santa Maria-RS.	63
Figura 26. Uso e Cobertura da terra na Região Intermediária Santa Maria-RS no ano de 2019.	64
Figura 27. Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na Região Intermediária Santa Maria.	64
Figura 28. Bacias Hidrográficas e seus rios principais sobre a Região Intermediária Santa Maria.	65
Figura 29. Fluxograma dos procedimentos metodológicos e seus resultados.	68
Figura 30. a) Direção de fluxo; b) Fluxo acumulado/drenagem; c). MDE original com remoção de possíveis anomalias; d). Amplitude altimétrica em relação à drenagem mais próxima.	71
Figura 31. a) Classificação da amplitude altimétrica em relação à drenagem mais próxima quanto a profundidade do lençol freático; b) Representação das classes em composição RGB.	72
Figura 32. Distribuição geográfica dos poços tubulares utilizados no processo de validação do modelo de profundidade do lençol freático. Elaborado pelo autor.	73
Figura 33. Processo de identificação da largura dos trechos da rede de drenagem no <i>software Google Earth Pro</i> TM	74
Figura 34. Fluxograma metodológico da identificação de áreas restritas e permitidas na resolução CONAMA 375/2006 (2006).	77
Figura 35. Fluxograma da confecção de informações de limitações pedológicas.	82
Figura 36. Profundidade estimada do lençol freático na Região Intermediária Santa Maria-RS.....	85
Figura 37. Gráfico de correlação de <i>Spearman</i> entre profundidade amostral e modelada.....	86
Figura 38. Restrições e permissões locais para o uso de biossólido na Região Intermediária Santa Maria-RS.....	87
Figura 39. Restrições locais para o uso de biossólido normalizadas por regiões imediatas e região intermediária.....	88

Figura 40. Áreas permitidas e não permitidas pela clinografia: a) aplicação superficial sem incorporação; b) aplicação superficial com incorporação; c) aplicação subsuperficial e em sulcos, e aplicação superficial sem incorporação em produção florestal; d) aplicação em covas.	90
Figura 41. Quantitativos de áreas não permitidas ao uso de biossólido por restrições clinográficas.	91
Figura 42. Áreas permitidas ao uso de biossólido para: a) aplicação superficial sem incorporação; b) aplicação superficial com incorporação; c) aplicação subsuperficial e em sulcos, e aplicação superficial sem incorporação em produção florestal; d) aplicação em covas.	93
Figura 43. Áreas permitidas ao uso de biossólido de acordo com o tipo de aplicação nas regiões imediatas e região intermediária Santa Maria.....	94
Figura 44. Aptidão e capacidade de uso de biossólido nas regiões imediatas e região intermediária Santa Maria.	95
Figura 45. Aptidão e capacidade de uso de biossólido na região intermediária Santa Maria.	96
Figura 46. Aptidão e capacidade de uso de biossólido para: a) aplicação superficial sem incorporação; b) aplicação superficial com incorporação; c) aplicação subsuperficial e em sulcos, e aplicação superficial sem incorporação em produção florestal; d) aplicação em covas.	97
Figura 47. Aptidão para cada tipo de aplicação de biossólido em área permitida.	98
Figura 48. Classes de uso e cobertura das regiões imediatas e intermediária presentes nas áreas de uso permitido pela resolução CONAMA 375/2006.....	99
Figura 49. Usos e cobertura da terra em áreas permitidas para: a) aplicação superficial sem incorporação; b) aplicação superficial com incorporação; c) aplicação subsuperficial e em sulcos, e aplicação superficial sem incorporação em produção florestal; d) aplicação em covas.	100
Figura 50. Distribuição das classes prioritárias ao uso de biossólido para os usos da terra na região intermediária Santa Maria.	101
Figura 51. Distribuição das classes prioritárias ao uso de biossólido na região intermediária Santa Maria para cada classe de aptidão.....	102
Figura 52. Áreas prioritárias ao uso de biossólido na região intermediária Santa Maria com destaque para os três níveis de aptidão.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação de Regiões imediatas e municípios formadores da Região intermediária Santa Maria/RS.	39
Tabela 2. Distribuição das classes de solos nas Região Imediatas.....	61
Tabela 3. Aptidão dos fatores naturais limitantes.	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Critérios restritivos na seleção de áreas para o uso de biossólido de acordo com a resolução CONAMA 375/06. 31

Quadro 2. Aptidão do solo quanto aos parâmetros descritos por Souza et al. (1994). 78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 HIPÓTESE	15
1.2 OBJETIVO GERAL	15
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4 JUSTIFICATIVA	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 GEOGRAFIA SOCIOAMBIENTAL	18
2.2 LODO DE ESGOTO: PRODUÇÃO E CARACTERÍSTICAS	19
2.3 CENÁRIO MUNDIAL DA RECICLAGEM DE LODO DE ESGOTO	21
2.4 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA.....	24
2.4.1 Normas Brasileiras (NBR)	25
2.4.2 Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020	26
2.4.3 Resoluções CONAMA 420/09 e 460/13	27
2.4.4 Portaria FEPAM nº85, de 2014	28
2.4.5 Restrições e aptidões na Reciclagem agrícola segura de lodo de esgoto	30
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	36
3.1 SITUAÇÃO GEOGRÁFICA DA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA	37
3.2 SOCIOECONOMIA NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA	40
3.3 TIPOS DE ROCHAS NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA	56
3.4 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA.....	57
3.5 SOLOS NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA	60
3.6 CLIMA NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA	61
3.7 BIOMAS, USOS E COBERTURAS DA TERRA NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA	62
3.8 HIDROGRAFIA NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA	65
4 MATERIAIS E MÉTODOS	67
4.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	68
4.1.1 Restrições Locacionais.....	69
4.1.1.1 Obtenção dos planos de informações secundários e criação de um banco de dados geográficos	69
4.1.1.2 Geração do modelo clinográfico e elaboração do plano de informações de profundidade do lençol freático	69

4.1.1.2.1 Confecção do Modelo clinográfico	69
4.1.1.2.2 Estimativa de Profundidade do lençol freático.....	70
4.1.1.3 Determinação das Áreas de Preservação Permanente.....	74
4.1.1.4 Determinação das restrições em Sistema Viário, Unidades de Conservação e área urbanizada	75
4.1.1.5 Integração dos planos de informações quanto às restrições locais previstas na lei	76
4.1.2 Aptidão das terras para a disposição de lodo de esgoto	78
4.1.3 Integração dos planos de informações quanto às aptidões e capacidades de uso do solo	83
4.1.4 Identificação de uso cobertura da terra nas áreas permitidas em diferentes classes de aptidão	83
4.1.5 Indicação de áreas prioritárias, com uso agrícola e silvícola em solos com aptidão em áreas legalmente permitidas.....	84
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
5.1 LENÇOL FREÁTICO	85
5.2 RESTRIÇÕES LOCACIONAIS.....	87
5.3 INTEGRAÇÃO DOS PLANOS DE INFORMAÇÕES QUANTO ÀS RESTRIÇÕES LOCACIONAIS PREVISTAS NA RESOLUÇÃO CONAMA 375/2006;	92
5.4 CLASSIFICAÇÃO E INTEGRAÇÃO DOS PLANOS DE INFORMAÇÕES QUANTO ÀS APTIDÕES E CAPACIDADES DE USO DO SOLO	95
5.5 IDENTIFICAÇÃO DE USO COBERTURA DA TERRA NAS ÁREAS PERMITIDAS EM DIFERENTES CLASSES DE APTIDÃO	99
5.6 INDICAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS, COM USO AGRÍCOLA EM SOLOS COM APTIDÃO EM ÁREAS LEGALMENTE PERMITIDAS.....	103
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	105

1 INTRODUÇÃO

A Geografia, como área de conhecimento, sempre expressou sua preocupação com a busca da compreensão da relação do homem com o meio, pois, dessa forma, o ser humano realiza suas atividades voltadas à subsistência.

Nesse contexto, o homem pode ser considerado um importante transformador de paisagens considerando-se alguns contextos, modificando de maneira cada vez mais rápida quando comparado aos agentes naturais. A compreensão da ação desse sujeito sobre o ambiente tem grande relevância, pois o indivíduo modela a paisagem e arquiteta o espaço a partir de seu conhecimento empírico e suas intencionalidades.

Na década de 1980, Orellana (1981), já preconizava que a paisagem e os processos formadores do relevo são alterados pela ação antrópica sobre os diversos usos da vegetação e solos condicionando alterações hidrológicas e configurações de problemas ambientais além de possível desequilíbrio e colapso do sistema.

Na grande maioria das vezes os problemas ambientais ocorrem devido à falta de planejamento, pois, este é um instrumento que consiste em otimizar a utilização do espaço e as políticas públicas para racionalizar a ocupação, considerando os limites dos ecossistemas, e para reordenar as atividades econômicas, como auxílio nas estratégias e ações na busca do desenvolvimento sustentável (GUERRA, 2018).

O desenvolvimento sustentável e a responsabilidade ambiental formam uma combinação apropriada para os dias atuais, já que a realidade atual de mundo globalizado e crescimento populacional, em constantes desenvolvimentos sob aspectos econômicos, tecnológicos e socioculturais ignoram, por vezes, parcial ou integralmente, os cuidados com os danos ambientais.

Com o crescimento da população mundial tem-se cada vez mais a preocupação com o planejamento a evitar danos ambientais. Dentre esses danos, surgem as inquietações sobre as questões relacionadas ao saneamento básico, serviço responsável pela geração de uma série de resíduos sólidos (SPIERING et al., 2020).

As estações de tratamento, ao conduzirem a água residuária do esgotamento sanitário em processos que tornam possível a disposição desta no ambiente geram um resíduo denominado lodo de esgoto, ocasionando outro problema relacionado com a destinação deste resíduo que, em sua forma bruta, é potencialmente prejudicial à saúde pública e ao ambiente (QUINTANA et al., 2011).

O lodo de esgoto, neutralizado e higienizado em forma de biossólido, como recentemente denominado, é o principal resíduo do processo de tratamento de esgotos sanitários. O destino final, ambientalmente seguro, ainda é um desafio (BITTENCOURT et al, 2009).

A adequada destinação final do lodo originário das estações de tratamento de esgoto é de responsabilidade social, representando uma necessidade de saúde pública e de preservação ambiental (BITTENCOURT et al, 2009). Neste sentido, para os resíduos (lodos) das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) existe a possibilidade de higienização e reciclagem em forma de biossólido antes de sua disposição para outros fins (BOSCOV, 2008).

Em países que incorporam os princípios do desenvolvimento sustentável estes resíduos são considerados como insumos em potencial, que após tratamento adequado são dispostos e reciclados e ainda têm valor econômico agregado. Entretanto, no Brasil, estes lodos são considerados como um simples resíduo e, alternativas como a deposição em aterros sanitários e o depósito a céu aberto acabam sendo as práticas mais usuais (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2019).

Mesmo com a definição de norma específica que regulamenta a reciclagem por uso agrícola de Lodos de Estações de Tratamento de Esgoto (LETE) - Resolução nº 375 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2006) - na prática ainda são poucos os exemplos de ações que foram de fato efetivadas. No estado do Rio Grande do Sul (RS), conforme dados do plano estadual de resíduos sólidos (SEMA, 2015), durante o ano de 2014, foram geradas mais de 100 mil toneladas de lodos provenientes do tratamento de água e esgoto.

O município de Santa Maria é considerado um exemplo no sistema de esgotamento sanitário, atendendo um percentual de população acima da média nacional. No entanto, esse percentual reflete também na maior geração de lodo

de esgoto como resíduo do processo de tratamento de esgoto no município (CORSAN, 2012).

Atualmente, esses lodos são armazenados nas estações de tratamento e depositados em aterros sanitários. Ainda, o limitado número de aterros sanitários presentes no RS e a saturação destes prevista com a extinção dos lixões, pelo Programa Lixão Zero (ZVEIBIL, 2015), podem acelerar o fim da vida desses aterros.

A falta de áreas disponíveis em aterros sanitários é um problema que deve ser resolvido, pois, caso contrário, os lodos não serão depositados adequadamente, já que a projeção é o comprometimento do volume livre dos aterros sanitários.

O aumento da geração de lodos é previsto com o aumento do saneamento básico e faz parte do sexto Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU (ODS), tratando de “Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos” até o ano de 2030.

Partindo do princípio que os processos de geração de resíduos advindos das etapas de saneamento sem a opção de deposição em aterros sanitários podem retornar para o sistema em forma de contaminantes com riscos para a natureza, e logo, pela organização do espaço produtivo social e de reciclagem ambiental torna-se imprescindível o estudo para demonstrar a importância das possibilidades de disposição segura para reciclagem desse resíduo no estado do Rio Grande do Sul, o qual não possui estudos com alternativas a não deposição em aterros sanitários limitados.

Assim, formulam-se as seguintes indagações:

- Se existem, onde estão localizadas as áreas aptas legalmente ao recebimento de bio sólido oriundo de lodos do tratamento de esgoto sanitário na região intermediária Santa Maria, área definida pelo IBGE (2017)?

- Quais as aptidões e capacidades de uso de bio sólido nos solos presentes nessas áreas?

- Essas áreas estão sendo utilizadas com atividades agrícolas?

1.1 HIPÓTESE

A presente tese possui como principal hipótese norteadora que a região intermediária de Santa Maria possui áreas que possibilitam a disposição e reciclagem de bio sólidos oriundos de esgotamento sanitário situadas em ambientes que já possuem uso agrícola e a avaliação de aptidão do solo torna possível indicar essas áreas como prioritárias para a disposição.

1.2 OBJETIVO GERAL

Identificar e avaliar as áreas de disposição para reciclagem de bio sólidos advindos do processo de saneamento básico na Região intermediária Santa Maria.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as áreas que a resolução Conama 375 permite o uso para a disposição de bio sólidos na Região Intermediária Santa Maria;
- Delinear as aptidões e capacidades de uso de bio sólido nos solos presentes na Região Intermediária Santa Maria;
- Relacionar as áreas permitidas à disposição de bio sólido com a aptidão edáfica presentes na Região Intermediária Santa Maria;
- Indicar áreas prioritárias para a disposição de bio sólidos em áreas com atividades antrópicas intensa.

Os presentes objetivos buscam responder dentro da pesquisa questões sobre a destinação segura e reciclagem dos resíduos oriundos do saneamento básico no estado do Rio Grande do Sul e, a partir de um estudo de caso, avaliar sua relação com os parâmetros físicos presentes na região intermediária Santa Maria/RS.

1.4 JUSTIFICATIVA

O trabalho envolve um estudo a respeito do espaço geográfico, onde o homem, por ser sujeito transformador influencia na qualidade do meio ambiente e interfere em sua qualidade de vida, uma vez que o meio físico e as ações humanas condicionam o ambiente desse espaço.

Depois de um extenso período de utilização dos recursos naturais primando por uma rentabilidade máxima dos sistemas e a busca por melhorias na qualidade e acesso ao saneamento básico, surge uma intensa preocupação quanto às implicações ambientais envolvidas nesse processo. Os elementos naturais são relativamente estáveis, todavia os fatores interferidos pelo homem podem sofrer alterações no tempo e no espaço, ampliando os episódios destes eventos (SANTOS et al., 2007).

Grande parte dos estudos que abordam a reciclagem agrícola de lodos oriundos de saneamento básico, na prática, elaboram zoneamentos com base nos critérios permissivos presentes na legislação brasileira e deixam de lado a avaliação da capacidade pedológica de uso desse lodo. Ainda, a partir do ano de 2018 foi discutida uma proposta de revisão na resolução 375/06 do CONAMA com critérios menos restritivos na escolha de áreas de disposição e, no ano de 2020, foi publicada na resolução CONAMA nº498 (CONAMA, 2020).

As informações dos elementos físicos e antrópicos contribuem como instrumentos de planejamento eficientes para estudos de detecção e análise de áreas de risco. A partir desta, é possível prevenir e estabelecer ações entre a sociedade e o poder público, com o objetivo de planejar a defesa contra as degradações ambientais. As medidas preventivas são conduzidas para identificação das áreas mais suscetíveis, para as quais podem ser planejadas medidas corretivas (MARCELINO, 2006).

A abordagem conjunta da identificação das áreas de disposição e reciclagem do lodo de saneamento com a análise do ambiente físico se torna de grande importância para a qualidade ambiental e segurança hídrica, pois o estudo da capacidade do solo e a ação antrópica é uma meta prioritária do planejamento conservacionista e tema de pesquisa em Conservação do Solo e da Água (SANTOS et al., 2007). Uma ferramenta importante para abordagens dessa natureza é a utilização de técnicas de geoprocessamento, como por

exemplo: Sensoriamento Remoto, Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Cartografia.

O fato de inexistirem estudos dessa natureza no estado do Rio Grande do Sul, e a importância da análise das áreas aptas a receberem a disposição de tal resíduo, que necessita ser reciclado por sempre ser gerado, e os riscos ambientais que podem compor a área de estudo são os motivos da proposta deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GEOGRAFIA SOCIOAMBIENTAL

Dentre as formas de conceituar o espaço, a união do social e do histórico reconstitui em um complexo procedimento. O descobrimento de novos espaços, a organização espacial da sociedade, a paisagem urbana e rural e o cenário são exemplos de espaços conceituados e existentes na forma geral da simultaneidade em constante evolução histórica (LEFEBVRE, 2013).

O ser humano modifica a natureza e produz ambientes propícios para as suas necessidades. A discussão sobre as consequências dessas transformações é primordial para o entendimento das questões ambientais e sociais integradas ao atual modelo de desenvolvimento global frente aos diferentes tipos de apropriações e usos da natureza (ACSELRAD, 1995).

A Geografia Socioambiental, como corrente de pensamento, surge a partir da necessidade de estudos que busquem o entendimento das questões ambientais e sociais, cujas avaliações naturais e sociais são idealizadas em um único processo (MENDONÇA, 2001). Mendonça (2001, p. 122) ainda afirma que “Nesta corrente, a problemática ambiental na geografia deixa de ser identificada apenas como ligada à geografia física e passa a ser geográfica.”.

Dessa forma, este estudo está inserido na corrente de pensamento de problemáticas socioambientais e aborda um conjunto de contradições presentes nas interações de sistemas sociais e interrelações com os sistemas naturais. Essa abordagem da Geografia é amplamente abordada por Mendonça, ao afirmar que:

O envolvimento da sociedade e da natureza nos estudos emanados de problemáticas ambientais, nos quais o natural e o social são concebidos como elementos de um mesmo processo, resultou na construção de uma nova corrente do pensamento geográfico aqui denominada geografia socioambiental (Mendonça, 2001, p. 113).

A adoção dessa perspectiva se mostra como um desafio, de forma que se torna insuficiente abordar o meio ambiente a partir do aspecto da natureza sem

considerar os aspectos econômico, social, cultural e político (SUERTEGARAY, 2014).

De acordo com Mendonça (2001), o prefixo “sócio” surge ao termo “ambiental” para destacar a necessidade de considerar a sociedade como sujeito básico dos processos associados às problemáticas ambientais. Nesse contexto, os processos associados ao saneamento básico e a geração de resíduos se enquadram como potenciais para a abordagem socioambiental, contemplando os processos de tomadas de decisões historicamente adotadas a esse tema.

2.2 LODO DE ESGOTO: PRODUÇÃO E CARACTERÍSTICAS

A coleta e o tratamento diário de milhões de litros de esgoto são parte de um grande serviço ambiental à sociedade proporcionado pelas estações de tratamento de esgotos (ETEs), evitando que abundante carga orgânica seja descartada aos corpos hídricos. O tratamento de esgoto é uma medida de saúde pública e preservação ambiental, constituindo na remoção da matéria orgânica e dos sólidos sedimentáveis por meio de processos químicos, físicos e biológicos (ANDREOLI et al., 2001a e 2001b). Após esse processo, a água residuária é devolvida aos corpos hídricos, e os três tipos de resíduos sólidos: grosseiros, areia e lodo, são armazenados na ETE.

O resíduo que apresenta maior volume é o lodo de esgoto, formado, durante o tratamento primário do esgoto, por matérias inorgânica e orgânica decantadas e, no tratamento secundário, por microrganismos produzidos no processo de ativação biológica do esgoto (CHRISTODOULOU; STAMATELATOU, 2016). Bouriou et al. (2015) definem o lodo de esgoto como o resíduo do processo de tratamento de esgotos sanitários, abrangendo uma infinidade de compostos orgânicos, inorgânicos e microrganismos. Apesar de representar menos de 1% da composição líquido do esgoto que as Estações recebem, isso representa milhões de toneladas de lodo por ano.

Em geral, o lodo advindo do tratamento de esgoto apresenta em sua composição teores de matéria orgânica entre 30 a 60%, fósforo (P) entre 0,5 a 4%, nitrogênio (N) entre 1,0 a 8% e Potássio (K) entre 0.1 a 0.6% (VON

SPERLING et al., 2001). Essa composição, rica em matéria orgânica e nutrientes, proporciona a sua reciclagem agrícola e florestal em contraponto de sua deposição em aterros sanitários (ABREU et al., 2017b). Nesse sentido, a resolução CONAMA nº 375 / 2006 (CONAMA, 2006) e atualização nº498/2020 (CONAMA, 2020) definem parâmetros a serem atendidos, devendo haver, sobretudo, a realização dos processos posteriores de tratamento, de estabilização e higienização do lodo, com o objetivo de tornar adequado à destinação final.

A estabilização do lodo de esgoto remove a matéria orgânica facilmente biodegradável e diminui os sólidos voláteis totais (SVT). Esse processo elimina maus odores, reduz os patógenos e o potencial de putrefação (ANDREOLI et al., 2001). O processo de higienização é uma etapa que atua na inativação de muitos parasitas intestinais, e principalmente seus ovos, pouco afetados pelo processo de estabilização (ANDREOLI et al., 2001; ANDREOLI e PINTO, 2001). São inúmeros os métodos para higienização de lodos com destinação em reciclagem agrícola, os mais empregados são a caleação, a vermicompostagem, a compostagem, a secagem térmica e a solarização (NASCIMENTO et al., 2014).

Para o uso agrícola, após os processos de higienização e estabilização, o lodo de esgoto passa a ser denominado biossólido, termo utilizado pela primeira vez nos Estados Unidos, na década de 90, para distinguir o lodo de esgoto que não foi devidamente tratado do lodo de esgoto higienizado e estabilizado (CHRISTODOULOU e STAMATELATOU, 2016) com o objetivo de obter maior aceitação pública e eliminar a conotação pejorativa ao termo lodo de esgoto, propondo este material não como um simples resíduo, mas um passivo que pode e deve ser reciclado em sistemas de usos benéficos (LU et al., 2012). No entanto, é de suma importância o controle quanto aos contaminantes presentes no biossólido.

Os potenciais contaminantes que podem trazer riscos ao meio ambiente e saúde humana devem ser controlados a definir uma destinação final segura ao biossólido. Os cuidados essenciais de contaminação são referentes aos metais pesados, como zinco (Zn), cádmio (Cd), chumbo (Pb), níquel (Ni), cromo (Cr) e cobre (Cu) e aos organismos patogênicos (protozoários, bactérias, vírus) (YADA

et al., 2015). Nesse sentido, buscando a reciclagem segura, as resoluções nº 375/2006 e nº 498/2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (CONAMA, 2006 e CONAMA, 2020) regulamentam e definem critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto/biossólidos advindos do tratamento de esgoto sanitário.

2.3 CENÁRIO MUNDIAL DA RECICLAGEM DE LODO DE ESGOTO

Muitos países praticam a reciclagem ou reaproveitamento dos nutrientes do lodo de esgoto, como Espanha, Japão, Nova Zelândia, Estados Unidos, Alemanha, Reino Unido, Canadá, Austrália, Portugal, França, dentre outros (LU et al., 2012; MININNI et al., 2014; BOURIOUG et al., 2015; CHRISTODOULOU; STAMATELATOU, 2016; WALLACE et al., 2016; EUROSTAT, 2015). As táticas de reciclagem do lodo de esgoto variam para cada país, considerando as necessidades ou aptidões, desde o uso em geração de energia (REN et al., 2017), recuperação de nutrientes, como o escasso fósforo (TORRI et al., 2017; EGLE et al., 2015), como condicionante de solos e adubo em cultivos florestais e agrícolas (SAMPAIO et al., 2012; CIESLIK et al., 2015; MARRON et al., 2015; SAMPAIO et al., 2016; ABREU et al., 2017b; GUERRINI et al., 2017), além do uso como substrato no cultivo de mudas ornamentais e florestais (TRAZZI et al., 2014; ABREU et al., 2017a; CABREIRA et al., 2017).

O contexto mundial de crescente apreensão com aspectos voltados para a saúde da população, mudanças climáticas, poluições ambientais e falta de recursos naturais, acarreta o uso de tecnologias cada vez mais eficientes no tratamento de esgoto. A produção de lodo é inevitável e relativa à eficiência do tratamento de esgoto, sendo imprescindível a adoção de usos sustentáveis desse resíduo sólido (LEBLANC et al., 2008).

Entre as alternativas empregadas, Libânio (2010), Andreoli et al. (2014) e Von Sperling (1995, 2001, 2014) destacam o destino de lodos residuários em descarga oceânica, deposição no solo, incineração, aterro sanitário, recuperação de áreas degradadas e reciclagem agrícola.

O lançamento do lodo nos oceanos, apesar de apresentar baixo custo financeiro, acarreta elevados impactos negativos no meio ambiente, tais como: poluição da água e dos sedimentos, transmissão de doenças, contaminação da flora e fauna marinha (VON SPERLING, 2014).

A deposição do lodo na superfície do solo, onde os componentes serão biologicamente degradados ou imobilizados, é um método de baixo custo, mas com grande possibilidade de contaminação do solo, água e ar, além da geração de odores e transmissão de doenças (ANDREOLI et al., 2014; VON SPERLING, 2014).

A alternativa por processo de incineração é realizada pela combustão na presença de excesso de oxigênio, onde há geração de gás carbônico, vapor d'água, dióxido de enxofre e cinza inerte. Do ponto de vista sanitário, é um procedimento seguro no tratamento de lodo de esgoto, reduzindo os materiais combustíveis com valores agregados em cinzas, mais inertes em relação ao seu estado inicial (HENDGES et al., 2017). Esse método esteriliza e reduz significativamente o volume do lodo suprimindo a necessidade de grandes áreas para a disposição final, no entanto tem como desvantagem o alto custo e a necessidade de disposição das cinzas (DUARTE, 2008; ANDREOLI et al., 2014; VON SPERLING, 2014; IWAKI, 2017).

Quanto a Disposição de lodos em Aterro sanitário, o lodo pode ser disposto em aterros exclusivos ou em conjunto com os rejeitos sólidos urbanos apresentando baixos custos de operação. No entanto, estes custos poderão aumentar se os aterros disponíveis demandarem o transporte a longas distâncias. No Brasil, o descarte em aterros sanitários é predominante, contrariando a Política Nacional de Resíduos Sólidos que busca a redução do encaminhamento de resíduos sólidos urbanos úmidos para aterros sanitários (IWAKI, 2017). Nos aterros não deve ser descartado o lodo digerido desidratado ou o lodo bruto desidratado, mas apenas cinzas dos incineradores. Muitos municípios destinam o lodo com os resíduos sólidos nos aterros sanitários, diminuindo a vida útil desses aterros, ocasionando impactos econômicos e ambientais (BIDONE; POVINELLI, 1999). Nesse sentido, a disposição final de lodos residuários do processo de tratamento de esgotos é um problema

emergente no Brasil e tende a aumentar ligeiramente, ao passo que se inserem e operam efetivamente os sistemas de coleta e tratamento de esgoto no país (DUARTE, 2008; ANDREOLI et al., 2014; VON SPERLING, 2014; IWAKI, 2017).

O uso de lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas é indicado em áreas com danos acentuados, em solos com déficit severos de matéria orgânica e nutrientes. Atua na recomposição do solo e da flora e possui uso limitado pela composição do lodo, que não deve apresentar elementos que contaminem o meio ambiente (ANDREOLI et al., 2014).

A destinação para reciclagem do lodo de esgoto por uso agrícola, em forma de bio sólido, se apresenta como uma alternativa que pode ser considerada ambientalmente correta. Os efeitos positivos dessa destinação estão associados na melhoria das características do solo (química, física e biológica), por contar com característica fertilizante em seus micros e macronutrientes, aumenta a retenção de água em solos com textura arenosa, assim como a infiltração em solos com maior teor de argila. Além de diminuir os riscos de contaminação dos cursos hídricos (BETTIOL; CAMARGO, 2006; HENDGES et al., 2017; RECESA, 2008).

Entre as alternativas de reciclagem do lodo de esgoto com potenciais, a utilização em cultivos agrícolas e florestais é a mais antiga e difundida, pois não necessita de grande tecnologia de implantação como em outros métodos de reaproveitamento. Os benefícios sociais, econômicos e ambientais da reciclagem do lodo de esgoto em áreas florestais e agrícolas são indicados por muitos autores como atributo de melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo (SAMPAIO et al., 2012; BONINI et al., 2015; YADA et al., 2015; KOMINKO et al., 2017) além da reciclagem de elementos escassos e finitos (TORRI et al., 2017); acréscimo de matéria orgânica no solo (YADA et al., 2015), diminuindo o uso de fertilizantes químicos e condicionadores de solos (BITTENCOURT et al., 2017; ABREU et al., 2017a), contribuindo para minimizar as consequências das mudanças climáticas, por meio do aumento do estoque de carbono orgânico no solo (OUIMET et al., 2015; KACPRZAK et al., 2017), e a diminuição do tempo de lotação de aterros sanitários.

No entanto, os aspectos negativos devem ser levados em consideração, a fazer o uso desse lodo de forma a não contaminar o solo e não colocar em risco a saúde dos trabalhadores e da população (ReCESA, 2008), tais como a possibilidade de contaminação do solo e da água com metais pesados, e dos cultivos com elementos tóxicos ou patógenos. Para tanto, as Resoluções CONAMA N° 375 de 2006 e N°498 de 2020 estabelecem critérios, a serem respeitados, e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário. Assim como, determina que os lodos gerados em sistemas de tratamento de esgoto sejam submetidos a processos de redução de patógenos e da atratividade de vetores, para que possam ser utilizados na agricultura (DUARTE, 2008; ANDREOLI et al., 2014; IWAKI, 2017). Assim, o termo “biossólido” foi introduzido para designar o lodo de esgotos processado o suficiente para tolerar, de modo seguro, a aplicação como fertilizante e reciclagem de seus nutrientes (USEPA, 2004).

Considerando as alternativas globalmente utilizadas e abordadas em estudos que tratam de tais destinações, assim como considerações dos autores sobre a segurança na destinação desse biossólido, se torna imprescindível a compreensão das normas de segurança presentes na legislação brasileira. O cumprimento dessas normas é importante para proteger a natureza e assegurar que as gerações futuras possam desfrutar de um meio ambiente saudável.

2.4 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

A legislação ambiental brasileira conta com um caráter mais restritivo em comparação com as demais legislações globais. Esse fato se deve à abrangência territorial do Brasil, que conta com grande diversidade de ambientes (MILARÉ, 2011).

O Decreto 4.771/65, Código Florestal Brasileiro, redefiniu a flora brasileira como bem de interesse comum, sobre o direito de propriedade. Contudo, a consideração sobre a proteção ambiental foi introduzida no país somente em 1981, por meio da lei 6.938/81, que constituiu a PNMA-Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1965; BRASIL, 1981).

No ano de 2010, foi publicada e regulamentada a Lei 12.305/2010, Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), configurada pela busca da sustentabilidade. O objetivo dessa Lei se deu pela quebra necessária na resistência social que entendia os resíduos como algo a ser afastado e o cuidado pelos impactos provocados pela sua inevitável geração ao ambiente e às pessoas. Assim, a PNRS se configurou com alguns instrumentos essenciais e inovadores dessa nova proposta de comportamento coletivo rumo à sustentabilidade, como o marco regulatório na preservação ambiental, a logística reversa, quanto a gestão integrada, a responsabilidade compartilhada, o gerenciamento apropriado e os acordos setoriais (BRASIL, 2010).

No estudo da presente tese e por conceito da Lei 12.305, entende-se Resíduos Sólidos como material resultante de atividades humanas com destinação final inviável ao descarte no meio ambiente, considerando a saúde pública e a sanidade do meio. A importância da gestão destes resíduos, por parte de seus geradores, em cuidado à saúde pública e a qualidade ambiental corroboram com os princípios básicos, preconizados no Art. 6º, da prevenção/precaução e a valoração do resíduo sólido reciclável como um bem de valor social promotor de cidadania (BRASIL, 2010).

Conforme o Art. 13º, para uma gestão eficaz, os resíduos são classificados quanto à origem. No caso da presente tese, a classificação é de resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, não perigoso e não inerte (BRASIL, 2010). Essa classificação é presente nas Normas Brasileiras – ABNT NBR: 10.004/2004; 10.005/2004 e 10.006/2004 (ABNT, 2004a; ABNT, 2004b; ABNT, 2004c).

2.4.1 Normas Brasileiras (NBR)

A classificação de resíduos sólidos, definida na ABNT NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004a), envolve a assimilação da atividade que os originou, de suas características e propriedades e a correlação com outros resíduos e substâncias como impacto conhecido ao meio ambiente e à saúde. A avaliação e caracterização do resíduo deve ocorrer de acordo com as matérias-primas, os insumos e o procedimento que lhe deu origem (ABNT, 2004a). Nesse sentido,

para que possam ser gerenciados adequadamente, a Norma ABNT NBR 10.004 classifica os resíduos sólidos quanto ao risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente.

A NBR 10.005/2004 (ABNT, 2004b) determina os requisitos para a aquisição de extrato lixiviado de resíduos sólidos, diferenciando os resíduos classificados pela NBR 10.004 como perigosos (classe I) e não perigosos (classe II). A lixiviação é entendida como um processo para determinar da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas que compõem o resíduo sólido, por dissolução, inferindo sobre a potencialidade de periculosidade do resíduo sólido em contato com o solo.

Os requisitos exigíveis para o extrato solubilizado de resíduos sólidos é presente na NBR 10.006/2004 (ABNT, 2004c), visando distinguir os resíduos classificados na ABNT NBR 10.004/2004 como não perigosos inertes e não perigosos não inertes. Esses não apresentam periculosidade, no entanto, quando não são inertes, podem conter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

2.4.2 Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020

A Resolução nº375/2006 do Conselho Nacional do meio ambiente – CONAMA, regulamenta os critérios para a reciclagem de lodos de ETE no sistema agrícola, abordando sobre a caracterização físico-química e biológica e a quantidade de substâncias e patógenos permitidos no lodo para a disposição no solo. Normatiza, também, sobre a origem e o sistema de tratamento aplicado ao afluyente, estabelecendo a precisão dos processos que tornem o material estabilizado não sofrendo alterações que possam liberar substâncias indesejáveis ou perigosas à saúde humana e ambiental (SAMPAIO, 2013). Essa resolução, parte do princípio da precaução ao restringir o uso do lodo, ainda que estabilizado e higienizado, sobre áreas de pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos, raízes e culturas inundadas, além de demais culturas onde a parte comestível tenha contato com o solo. Ainda, define períodos de carência após a aplicação e o monitoramento periódico do lodo e do solo, antes e depois de sua utilização (CONAMA, 2006).

A resolução CONAMA nº498, de 19 de agosto de 2020 (CONAMA, 2020) é a mais recente para regulamentação da reciclagem agrícola de lodo e foi criada para adequar critérios regulamentados na resolução CONAMA nº375/06 após revisões. Sua finalidade é determinar critérios e procedimentos para condução e aplicação de biossólido em solos. Ao contrário da resolução nº375/06, que tratava sobre o uso de lodo de esgoto de estações de tratamento de efluentes, o termo “biossólido” é presente no texto da resolução nº498, definido como produto do tratamento de lodo de esgoto que atende aos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos pela resolução, e, portanto, é apto à aplicação no solo.

A Resolução CONAMA 498/2020 (CONAMA, 2020) classifica o lodo em classe A e B, conforme a quantidade de patógenos e determina que o resíduo industrial poderá ser usado de forma excepcional, quando autorizado pelo órgão ambiental competente. Ainda, ao contrário da resolução 375/2006, aborda outra classificação, em lodos classe 1 ou 2, conforme valores máximos permitidos para as substâncias químicas.

Em relação às restrições de uso, aqueles lodos classificados como classe A, desde que respeitado o período de carência determinado para a cultura, podem ser aplicados em solos no cultivo de pastagens e forrageiras e alimentos consumidos crus, cuja parte comestível não tenha contato com o solo. Por outro lado, não há restrições quanto ao intervalo de aplicação de lodos classe A e colheita na aplicação em solos no cultivo de produtos alimentícios que não têm contato com solo; produtos alimentícios que não são consumidos crus; produtos não alimentícios. A aplicação de lodos classe B não é permitida em solos no cultivo de alimentos que possam ser consumidos crus. No entanto, é permitida a sua aplicação em florestas plantadas, recuperação de solos e de áreas degradadas (CONAMA, 2020).

2.4.3 Resoluções CONAMA 420/09 e 460/13

A Resolução nº420/2009 do CONAMA (CONAMA, 2009) norteia sobre valores orientadores, com informações sobre a qualidade natural do solo quanto à presença e/ou teores de elementos, com vistas ao gerenciamento de áreas contaminadas, tais: Valor Referência de Qualidade (VRQ); Valor de Prevenção

(VP); Valor de Investigação (VI). Os valores de referência, de acordo com a determinação desta resolução, são apurados pelos órgãos ambientais competentes e são determinados com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de vários tipos de solos. Quanto aos valores indicados para solos da Resolução Conama 420/09, constam as 11 substâncias inorgânicas descritas na Resolução Conama 375/06. No entanto, a Conama 420/09 estabelece que os valores de referência para as substâncias inorgânicas deverão ser definidos pelo estado.

A Resolução Conama 460/13 (CONAMA, 2013) altera a Resolução 420/09 e determina como prazo até o final do ano de 2014, aos órgãos ambientais dos estados e do Distrito Federal estabelecerem VRQs para substâncias químicas presentes naturalmente no solo. O estado do Rio Grande do Sul determinou os VRQs dentro do prazo estabelecido na resolução 460/13 e torna possível a abordagem referente aos acréscimos de micronutrientes ao solo (FEPAM, 2014).

2.4.4 Portaria FEPAM n°85, de 2014

No estado do Rio Grande do Sul, a avaliação dos elementos e concentrações nos solos foi verificada pelo Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em parceria com a Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), resultando na Portaria FEPAM 85/2014 (FEPAM, 2014). Os valores de referência buscam delimitar a ocorrência de elementos nos solos, inferindo o grau de qualidade dos solos em funções básicas de servir para a sustentação da vida, na produção de alimentos, filtro natural, fonte de recursos minerais, assim como manter o ciclo da água e nutrientes. Essa resolução possui como principal papel orientar sobre a disposição de resíduos de forma a não contaminar um solo viável.

Outra grande importância em verificar, qualificar e quantificar os elementos presentes nesses solos é permitir a não consideração de áreas degradadas aquelas com presença de elementos que podem ocorrer naturalmente no solo.

A portaria 85/2014 (FEPAM, 2014) apresenta valores de referência para o enquadramento do solo em classes, de acordo com a concentração de substâncias químicas tóxicas em maior ou menor grau. Sendo categorizados desde a Classe 1, aqueles solos que apresentam concentrações de substâncias menores que o valor referência de qualidade (VRQ), até a Classe 4, a partir de solos que apresentam, pelo menos uma substância, concentrações maiores que o valor de investigação (VI).

No estudo de teores naturais de metais presentes nos solos das regiões do estado do Rio Grande do Sul (ALTHAUS, 2013), foi utilizada a separação dos solos conforme o seu material geológico de formação, desconsiderando as divisões de classes por tipo de solo. Apesar das unidades de solos se mostrarem homogêneas, as abordagens utilizadas no Sistema de Classificação de Solos foram realizadas por meio da análise da gênese dos solos e não consideram a geoquímica da crosta terrestre (MELLO E ABRAHÃO, 2013). Nesse sentido, para o estado do Rio Grande do Sul, foram estabelecidas cinco regiões coincidentes com as províncias geológicas/geomorfológicas com informações sobre os teores naturais de metais presentes no solo (Figura 1).

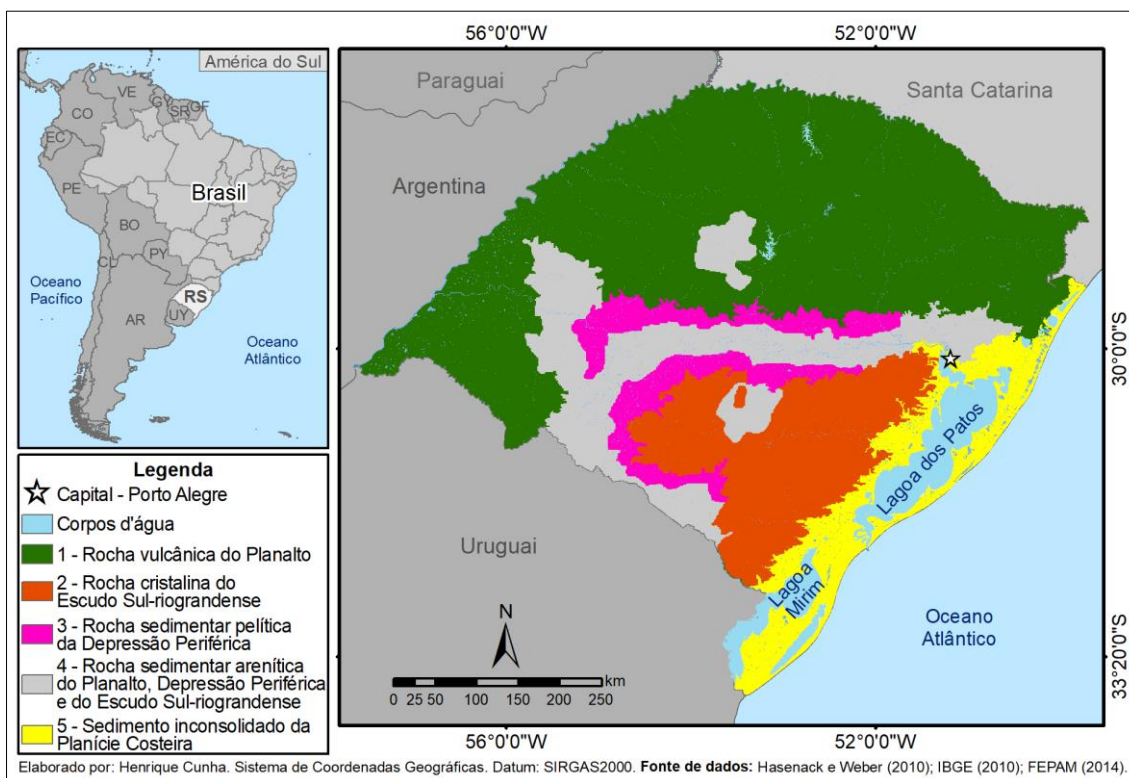


Figura 1. Províncias geomorfológicas/geológicas do Rio Grande do Sul e sua classificação quanto a presença natural de metais no solo. Elaborado pelo autor.

A Portaria FEPAM 85/2014 (FEPAM, 2014) utiliza as províncias presentes no mapa presente na figura 1 como critério aos valores de referência para o enquadramento do solo. Dessa forma, quando um estudo for aplicado a essa temática, esse mapeamento deve ser considerado para evitar possíveis acumulações de metais pesados no solo.

2.4.5 Restrições e aptidões na Reciclagem agrícola segura de lodo de esgoto

Considerando as Leis, Resoluções e Portarias (BRASIL, 1965; BRASIL, 1981; ABNT, 2004a; ABNT, 2004b; ABNT, 2004c; CONAMA, 2006; CONAMA, 2009; BRASIL, 2010; CONAMA, 2013; FEPAM, 2014; CONAMA, 2020) que abordam a temática sobre os riscos presentes na reciclagem de resíduos, a reciclagem agrícola de lodo de esgoto sem planejamento ou conhecimento do material tem potencial em resultar em impactos ambientais negativos. O tratamento de esgoto tem por característica a presença de organismos patogênicos, moléculas ligadas a metais pesados e compostos orgânicos complexos (BETTIOL; CAMARGO, 2006). O lodo precisa ser submetido ao devido tratamento, evitando que estes poluentes sejam importados ao solo, às plantas e, conseqüentemente, às águas superficiais e subterrâneas, por meio de lixiviação e escoamento superficial (FERNANDES et al., 1993).

Nesse sentido, a aplicação de lodo de esgoto no solo, além de proporcionar a reciclagem desse resíduo e possuir benefício como fertilizante para as plantas, necessita de cuidados em sua gestão, para evitar impactos negativos, especialmente em relação à contaminação por compostos orgânicos e o acúmulo de metais pesados (TORRI et al., 2012).

Com o objetivo de reduzir os riscos ambientais da disposição de lodo de esgoto no solo, a Seção V da resolução CONAMA nº 375/2006 (CONAMA, 2006), define as restrições locais sobre áreas não permitidas para a disposição de lodo de esgoto. Parâmetros como áreas de preservação permanente, adjacência de residências e de cursos hídricos, unidades de

conservação, áreas declivosas e solos rasos ou hidromórficos, são restrições para a disposição de lodo de esgoto (CONAMA, 2006) (Quadro 1).

Quadro 1. Critérios restritivos na seleção de áreas para o uso de biossólidos de acordo com a resolução CONAMA 375/06.

Art. 15. Não será permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado:
I - Em unidades de conservação, com exceção das Áreas de Proteção Ambiental-APA;
II - Em Área de Preservação Permanente-APP;
III - Em Áreas de Proteção aos Mananciais-APMs definidas por legislações estaduais e municipais e em outras áreas de captação de água para abastecimento público, a critério do órgão ambiental competente;
IV - No interior da Zona de Transporte para fontes de águas minerais, balneários e estâncias de águas minerais e potáveis de mesa, definidos na Portaria DNPM no 231, de 1998;
V - Num raio mínimo de 100 m de poços rasos e residências, podendo este limite ser ampliado para garantir que não ocorram incômodos à vizinhança;
VI - Numa distância mínima de 15 (quinze) metros de vias de domínio público e drenos interceptadores e divisores de águas superficiais de jusante e de trincheiras drenantes de águas subterrâneas e superficiais;
VII - em área agrícola cuja declividade das parcelas ultrapasse: <ul style="list-style-type: none"> a) 10% no caso de aplicação superficial sem incorporação; b) 15% no caso de aplicação superficial com incorporação; c) 18% no caso de aplicação subsuperficial e em sulcos, e no caso de aplicação superficial sem incorporação em áreas para produção florestal; d) 25% no caso de aplicação em covas;
VIII - em parcelas com solos com menos de 50 cm de espessura até o horizonte C;
IX - Em áreas onde a profundidade do nível do aquífero freático seja inferior a 1,5 m na cota mais baixa do terreno;
X - Em áreas agrícolas definidas como não adequadas por decisão motivada dos órgãos ambientais e de agricultura competentes.

Fonte: adaptado de CONAMA (2006).

O avanço das geotecnologias permitiu que os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) fossem aplicados amplamente em diversos campos ambientais, integrando e relacionando planos de informações de diferentes fontes, possibilitando a interpretação de grande número de variáveis em diferentes escalas de trabalho (PASSUELO et al., 2012). Passuelo et al. (2012) indicam que as ferramentas presentes em SIG permitem a análise espacial e locacional das áreas definidas como restritas ou permitidas para a disposição do lodo de esgoto para reciclagem agrícola, no entanto, essa análise parte de uma questão complexa, que envolve um

conjunto de critérios, baseados na literatura, na legislação e no conhecimento adquirido em estudos de especialistas.

De forma a complementar o processo de identificação de áreas permitidas, Souza et al. (2008), a partir do sistema de classificação das terras ajustada aos solos tropicais (LEPSCH et al., 1991), propõe uma classificação dentre as áreas legalmente permitidas (CONAMA, 2006) para a qualificação quanto ao processo de reciclagem agrícola. Esses autores utilizaram parâmetros ambientais escolhidos a partir da interação da paisagem e do lodo com o solo, estabelecendo, assim, as categorias de uso, apto e inapto, de acordo com o impacto resultante das interações. A identificação da aptidão à disposição de lodo de esgoto para a reciclagem agrícola pode ser conduzida em ambiente SIG, na tomada de decisões espaciais. Esse ambiente permite identificar, por meio de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, locais para a disposição de lodo de esgoto de uma determinada região, possibilitando a indicação das melhores áreas para aplicação de lodo de esgoto para reciclagem agrícola.

A identificação de áreas legalmente permitidas ou restritas (CONAMA, 2006) e o mapeamento de aptidão edáfica ao uso de lodo de esgoto (SOUZA et al., 2008) conduzidos com o uso de geotecnologias permite mais rigor e precisão nas análises e integrações de planos de informações e o armazenamento, disponibilidade e gerenciamento desse banco de dados como parte do conjunto que permite escolhas nos processos decisórios.

Alguns autores têm avaliado as potencialidades de reciclagem agrícola de lodo de esgoto, como os estudos de Souza et al (1994; 2008) e Andreoli et al (2000), a partir da classificação de terras para disposição final do lodo de esgoto e a aptidão das terras do estado do Paraná, Lima (2014) para o perímetro de irrigação Jaíba-MG, Taques (2015) que avaliou as áreas potenciais do estado do Espírito Santo para aplicação do lodo de esgoto na agricultura e Urban e Isaac (2016) em estudo de caso nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí.

No Rio Grande do Sul, não existem estudos voltados para a identificação das áreas permitidas e aptas para a reciclagem agrícola de lodo de esgoto. Os municípios com maior número de habitantes em área urbana necessitam de maior atenção na geração de lodo de esgoto. No estado,

dentre os 497 municípios, apenas 16 contavam com a população urbana maior que 100 mil habitantes (Figura 2).

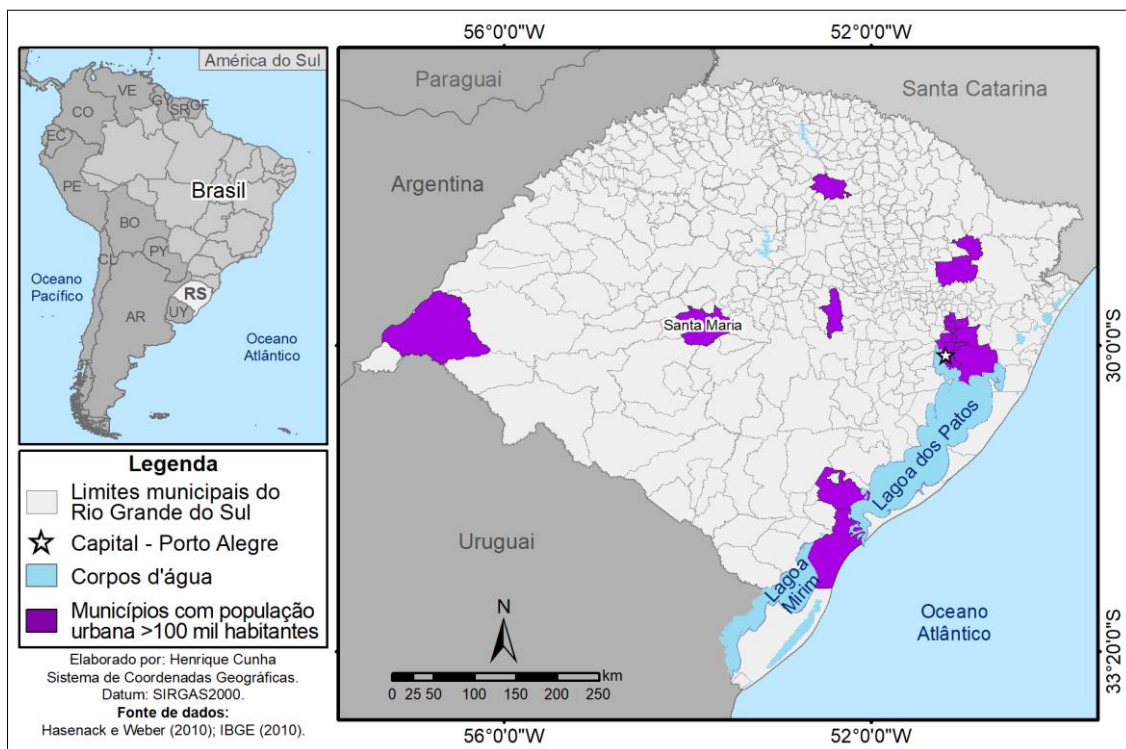


Figura 2. Municípios do Rio Grande do Sul com mais de 100 mil habitantes urbanos. Elaborado pelo autor.

Dentre os municípios do estado do Rio Grande do Sul, poucos municípios possuem atendimento com tratamento de esgoto em percentuais maiores que 76% da população urbana (PERS, 2015; SNIS, 2018) (Figura 3). Apesar do município de Santa Maria apresentar valores intermediários (51% a 75%) de atendimento na coleta e tratamento do esgoto sanitário, esse percentual quando confrontado com a população urbana representa um valor acima de 50 mil habitantes (figura 3). Correlacionado a isso, na figura 4 são apresentados os municípios do estado do Rio Grande do Sul classificados de acordo com a faixa de produção de lodo de esgoto.

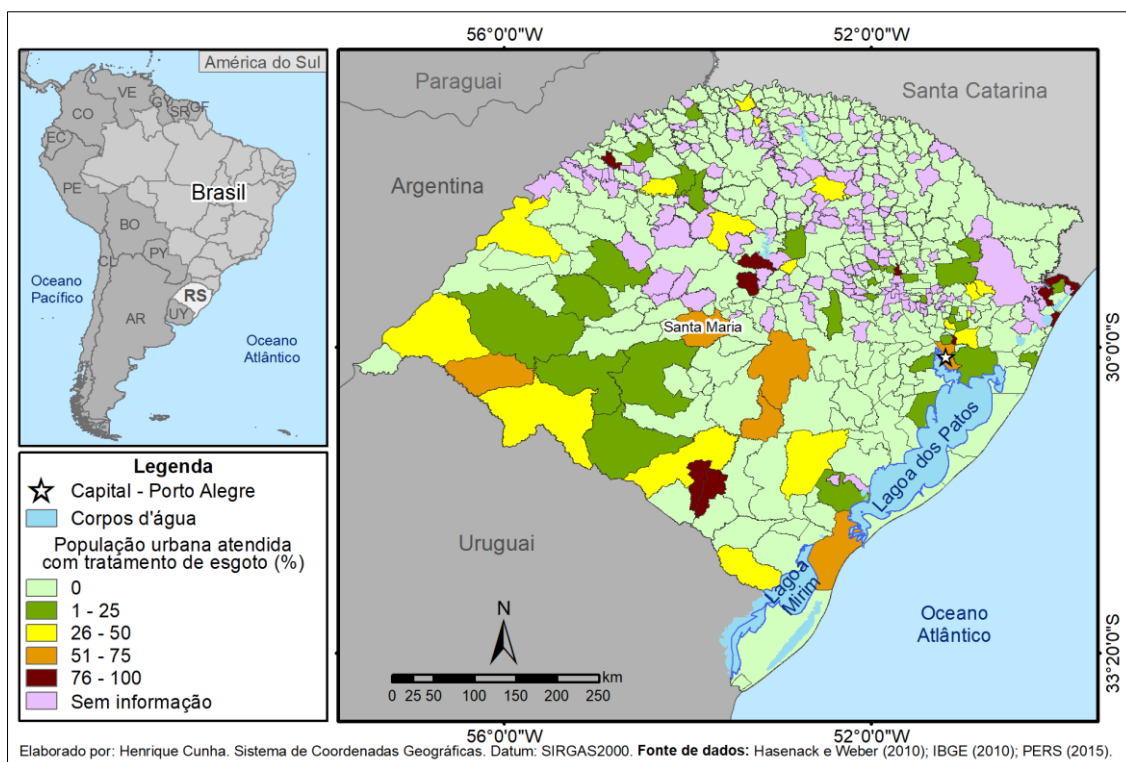


Figura 3. População atendida por coleta e tratamento de esgoto sanitário nos municípios do estado do Rio Grande do Sul. Elaborado pelo autor.

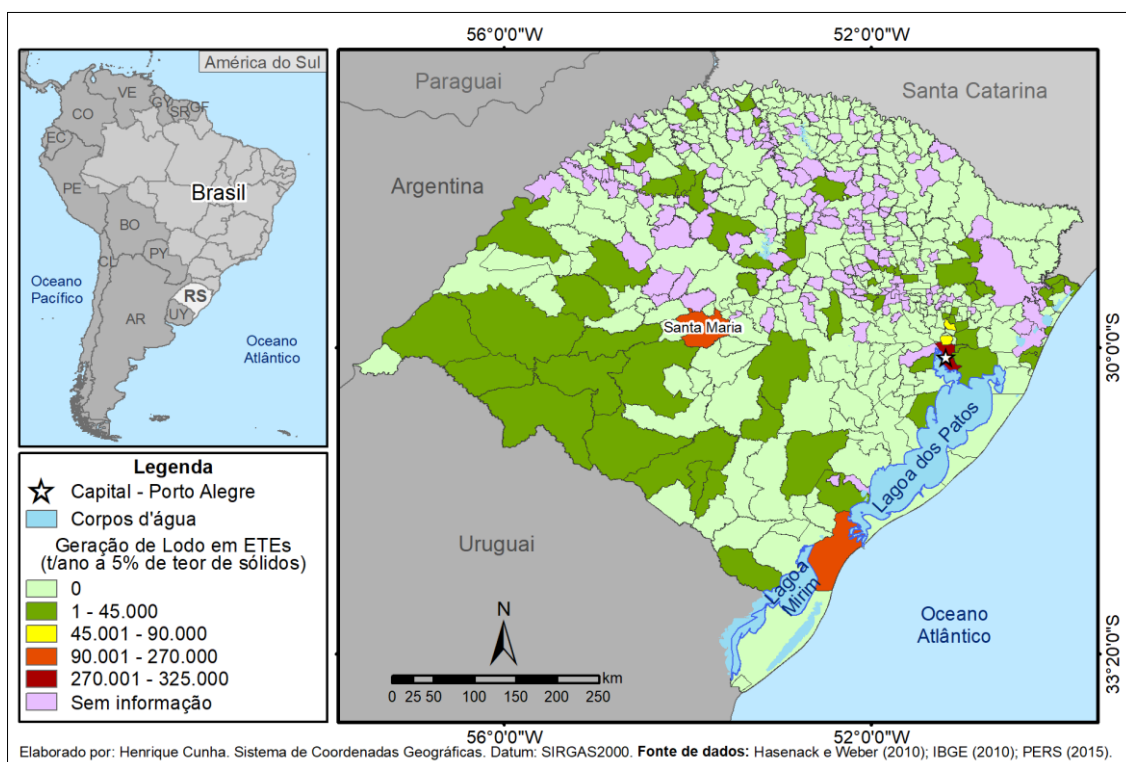


Figura 4. Estimativa de geração de lodo em ETEs nos municípios do RS. Elaborado pelo autor.

O município de Santa Maria está entre os que mais produzem lodo, oriundo do tratamento de esgoto sanitário (PERS, 2015) (Figura 4). Assim, é

de suma importância o uso de alternativas viáveis, com segurança ambiental e à saúde humana, para a reciclagem de todo esse lodo gerado no processo de tratamento do esgoto de Santa Maria e municípios vizinhos.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A caracterização da área de estudo foi realizada a partir de dados geográficos tabulares, vetoriais e matriciais disponibilizados por órgãos oficiais e também como resultado de estudos aplicados. Foram descritas sete características, elencadas a seguir de sua base de dados geográficos.

A situação geográfica da Região Intermediária Santa Maria foi descrita com base nas informações de organização do território presentes no banco de dados geográficos do IBGE (2017) em escala 1:250.000. Os aspectos socioeconômicos foram abordados com base nas informações de indicadores presentes no IBGE e no Departamento de Economia e Estatística do Rio Grande do Sul (DEE), ambos em escala municipal.

Os tipos de rochas foram apresentados de acordo com os mapeamentos geológicos da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) publicados por Silva et al. (2004) e Ramgrab et al. (2004) em escala 1:750.000. Os aspectos geomorfológicos foram apresentados em duas características, a primeira representando as unidades de relevo com base no mapeamento exploratório do projeto RADAMBRASIL em escala 1:250.000, disponível em IBGE (2021a), e a segunda, com o uso do modelo digital de elevação com resolução espacial de 30m, as formas de relevo interpretadas conforme o método proposto no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos publicado por Dos Santos et al. (2018).

Os tipos de solos presentes na Região Intermediária Santa Maria foram identificados com base nas classes presentes no mapeamento exploratório do projeto RADAMBRASIL em escala 1:250.000, disponível em IBGE (2021b). O clima da região em estudo foi representado a partir da classificação de Maria Rossato (2011) realizada para o estado do Rio Grande do Sul.

Os biomas foram discriminados a partir das informações vetoriais presentes em IBGE (2019) em escala 1:250.000 e as classes de usos e coberturas da terra foram identificadas no banco de dados geográficos disponibilizado por MapBiomas (2019) em escala 1:100.000. As informações sobre o sistema hidrográfico foram adquiridas na base de dados da Agência

Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA, 2019), em escala 1:250.000. A caracterização da região intermediária Santa Mara está apresentada nos próximos itens.

3.1 SITUAÇÃO GEOGRÁFICA DA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) propôs diferentes regionalizações ao longo das últimas 8 décadas (IBGE, 2017): As divisões fisiográficas (1940 e 1960); Microrregiões (1968 e 1990) e as Mesorregiões (1976 e 1990).

Em 2017, o IBGE apresentou a nova classificação regional, as Regiões Geográficas Intermediárias e Imediatas. Conforme IBGE (2017, p. 9):

A necessidade de atualização dos recortes regionais vem ao encontro do expressivo aumento verificado na diferenciação interna do território brasileiro, como resultado das transformações econômicas, demográficas, políticas e ambientais ocorridas ao longo das últimas décadas.

A partir desse novo recorte, a área de estudo compreendeu a Região Intermediária Santa Maria, localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul, delimitada pelas coordenadas 55°36'26"O, 28°46'20"S e 52°40'53"O, 31°10'46"S (Figura 5).

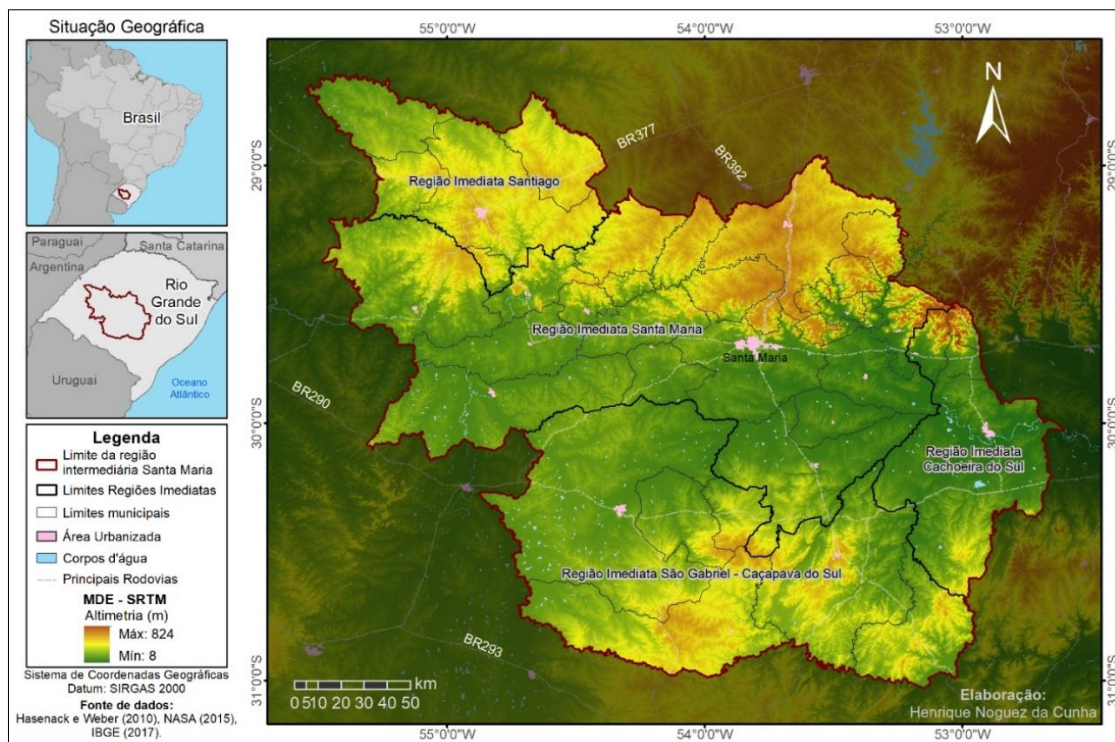


Figura 5. Situação Geográfica da Região Intermediária Santa Maria/RS.

A Região intermediária foi escolhida pela presença do município de Santa Maria, que conta com grande produção de lodo de esgoto (CORSAN, 2012) e, assim, possui necessidade de dar destino adequado a esse resíduo.

A figura 5 apresenta a composição da Região Intermediária Santa Maria pelo agrupamento de quatro Regiões Imediatas, denominadas Santiago, Santa Maria, Cachoeira do Sul e São Gabriel/Caçapava do Sul. Assim como a presença de 40 municípios (IBGE, 2017). A tabela 1 mostra os municípios presentes na área de estudo, a área municipal abrangida em cada Região Imediata e a percentagem de cada Região imediata em relação a área total da Região Intermediária.

Dentre os 43.667,9 km² da Região Intermediária Santa Maria, a Região Imediata Santa Maria compreende a maior representação territorial com 46,6% da área da Região intermediária Santa Maria. Nela se destacam os municípios de São Francisco de Assis, Cacequi, São Sepé, Júlio de Castilhos e Santa Maria (tabela 1).

Tabela 1. Relação de Regiões imediatas e municípios formadores da Região intermediária Santa Maria/RS.

Região intermediária	Regiões imediatas	Area na Região Intermediária (%)	Municípios	Área municipal (km ²)	Area municipal na Região Imediata (%)
Santa Maria	Cachoeira do Sul	10,1	Cachoeira do Sul	3.735,2	84,4
			Cerro Branco	158,8	3,6
			Novo Cabrais	192,3	4,3
			Paraíso do Sul	337,8	7,6
	Santa Maria	46,6	Agudo	536,1	2,6
			Cacequi	2.370,0	11,6
			Dilermando de Aguiar	600,6	3,0
			Dona Francisca	114,3	0,6
			Faxinal do Soturno	169,9	0,8
			Formigueiro	582,0	2,9
			Itaara	173,0	0,8
			Ivorá	122,9	0,6
			Jaguari	673,4	3,3
			Jari	856,5	4,2
			Júlio de Castilhos	1.929,4	9,5
			Mata	311,9	1,5
			Nova Palma	313,5	1,5
			Pinhal Grande	477,1	2,3
			Quevedos	543,4	2,7
			Restinga Seca	968,5	4,8
			Santa Maria	1.781,8	8,8
			São Francisco de Assis	2.508,5	12,3
			São João do Polêsine	79,2	0,4
			São Martinho da Serra	669,6	3,3
	São Pedro do Sul	873,6	4,3		
	São Sepé	2.200,7	10,8		
	São Vicente do Sul	1.175,2	5,8		
	Silveira Martins	118,3	0,6		
	Toropi	203,0	1,0		
	Santiago	12,2	Capão do Cipó	1.008,7	18,9
			Itacurubi	1.120,9	21,0
			Nova Esperança do Sul	191,0	3,6
			Santiago	2.413,2	45,2
Unistalda			602,4	11,3	
São Gabriel - Caçapava do Sul	31,0	Caçapava do Sul	3.047,1	22,5	
		Lavras do Sul	2.600,6	19,2	
		Santa Margarida do Sul	955,3	7,0	
		Santana da Boa Vista	1.420,6	10,5	
		São Gabriel	5.023,9	37,1	
		Vila Nova do Sul	507,9	3,7	
Area da Região intermediária Santa Maria (km ²)				43.667,9	

Fonte: IBGE (2017). Elaborada pelo autor

Em seguida, com a segunda maior representação territorial, se destaca a Região Imediata São Gabriel/Caçapava do Sul composta por seis

municípios, perfazendo 31% da Região intermediária Santa Maria. As Regiões Imediatas Santiago e Cachoeira do Sul são formadas por 5 e 4 municípios, respectivamente. Juntas, essas Regiões imediatas representam 22,3% da Região intermediária.

3.2 SOCIOECONOMIA NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA

De acordo com o Departamento de Economia e Estatística do estado do Rio Grande do Sul (DEE, 2019), em 2019, a Região Intermediária Santa Maria totalizou 759.967 pessoas residentes equivalente a 6,7% da população total do Rio Grande do Sul (11.377.239). Quando avaliada a população de cada uma das quatro regiões imediatas que compõem a Região Intermediária Santa Maria, houve destaque para a Região Imediata Santa Maria com 63,1% (479.903 habitantes) de representação na Região Intermediária.

Em forma de apresentação decrescente do quantitativo da população das demais regiões imediatas, São Gabriel – Caçapava do Sul apresentou 15,5% (117.329 habitantes), Cachoeira totalizou 13,1% (99.312 habitantes) e Santiago com 63.423 habitantes, o que representa 8,3% da região intermediária. A figura 6 apresenta o quantitativo, dividido em quatro classes, da população nos municípios integrantes da área de estudo.

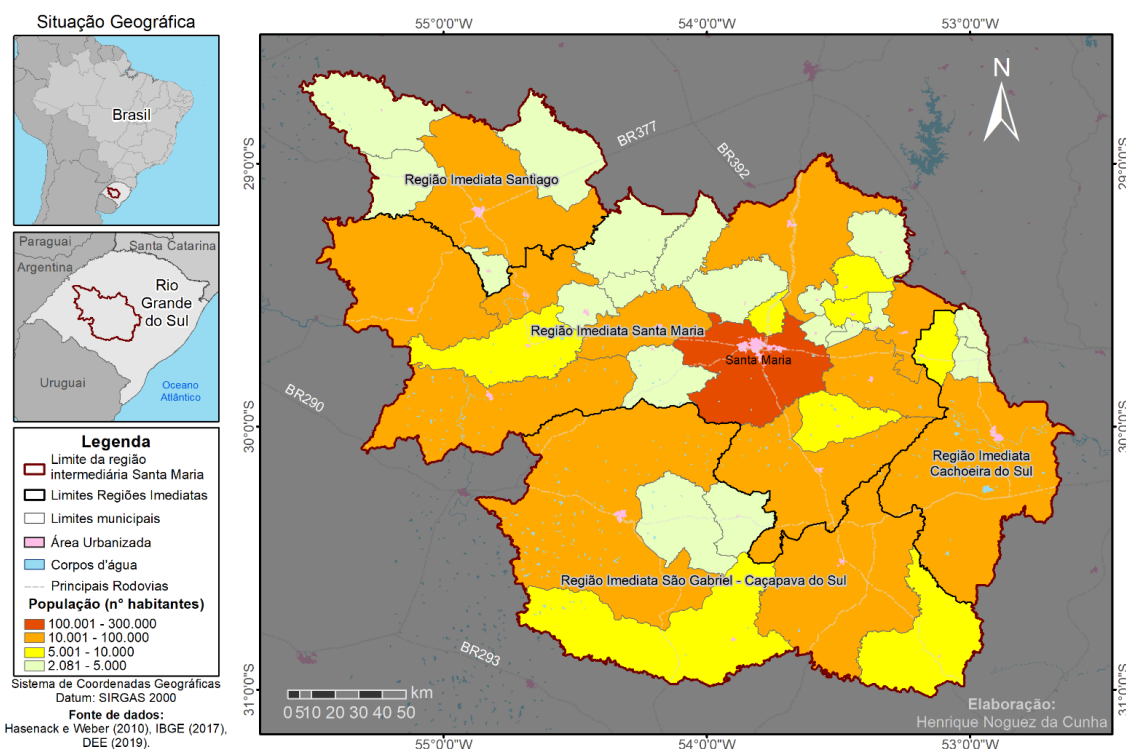


Figura 6. População dos municípios da Região Intermediária Santa Maria/RS.

Cabe destacar a maior representação populacional do município de Santa Maria na região em estudo, o qual possui a maior área urbanizada e tem seu nome como referência na toponímia utilizada na região intermediária e imediata que a compreende. Por outro lado, a Região Imediata Santiago conta com a representação predominante do município de Santiago com 49.743 habitantes e outros quatro municípios com população somadas em 13.680 (figura 6). A análise da população presente em uma área a ser estudada possibilita a compreensão dos níveis da socioeconomia local e regional.

Com o objetivo de caracterizar os ambientes quanto a esse aspecto, o Índice de Desenvolvimento Socioeconômico (IDESE) foi proposto pela Fundação de Economia e Estatística (FEE) do Estado do Rio Grande do Sul (RS), atualmente extinta, e é representado de forma sintética. O IDESE tem como principal característica a avaliação e o monitoramento dos níveis de desenvolvimento estadual, municipal e regional para o estado do Rio Grande do Sul (FEE, 2014).

A metodologia de confecção do IDESE foi atualizada pelo DEE e, atualmente, é composto de doze indicadores presentes em três elementos

temáticos (DEE, 2019). Dessa forma os elementos avaliados são Educação, Renda e Saúde e serão abordados, referente ao ano de 2019, nessa presente caracterização da Região Intermediária de Santa Maria com base nas informações tabulares presentes na base de dados geográficos do DEE (2019).

A Região Intermediária Santa Maria apresenta um índice médio do bloco Educação de 0,74 e na figura 7, a partir de cinco classes categorizadas a partir de dois desvios padrões da média, tem representada a sua distribuição municipal. Os maiores valores foram identificados nos municípios de Itaara, da Região Imediata Santa Maria, e Nova Esperança do Sul, Região Imediata Santiago. Por outro lado, os menores valores no índice de educação foram obtidos nos municípios de Paraíso do Sul, Jari e Capão do Cipó, presentes, respectivamente, nas regiões imediatas Cachoeira do Sul, Santa Maria e Santiago.

O índice médio da região intermediária sobre o bloco Saúde foi quantificado em 0,84, valor representado em predominância pelos municípios presentes na porção norte da área de estudo (figura 8). Os municípios de Itaara e Quevedos estão presentes na Região Imediata Santa Maria e apresentaram os maiores índices de Saúde. Por outro lado, os municípios de Santana da Boa Vista, Caçapava do Sul e São Gabriel, presentes na Região Imediata São Gabriel – Caçapava do Sul, e os municípios de Cachoeira do Sul e Paraíso do Sul, da Região Imediata Cachoeira do Sul, apresentam os menores índices de Saúde, com valores inferiores a 0,79.

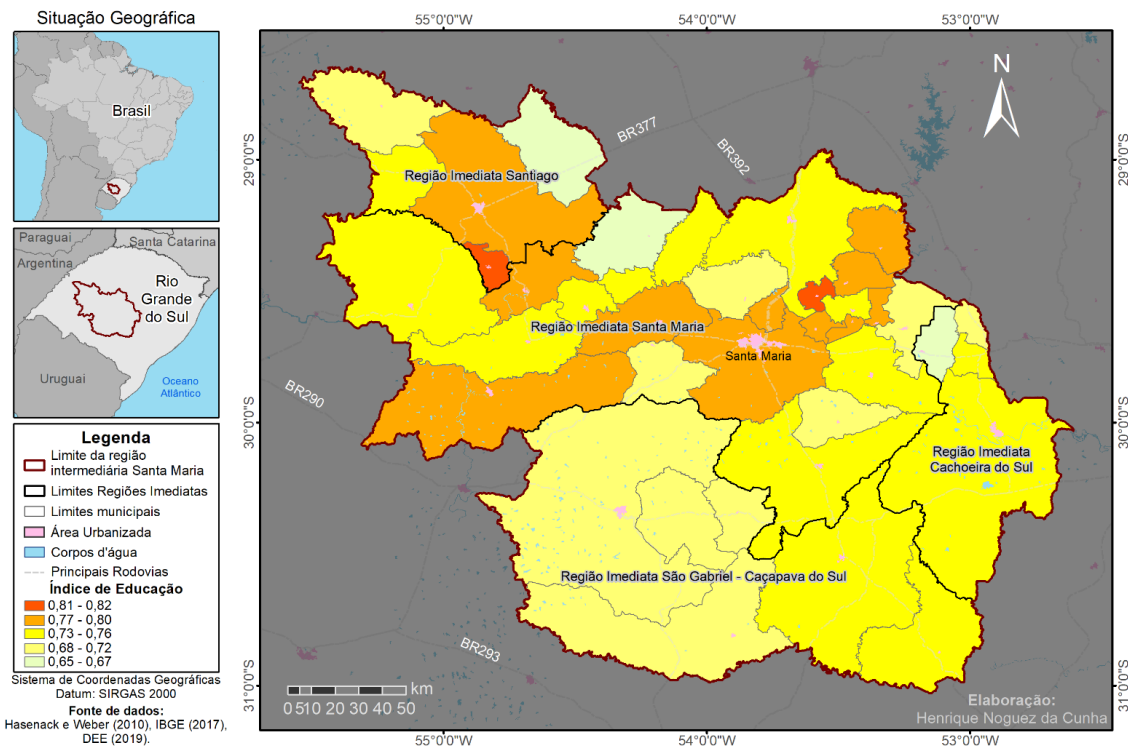


Figura 7. Índices do bloco Educação na Região Intermediária Santa Maria/RS.

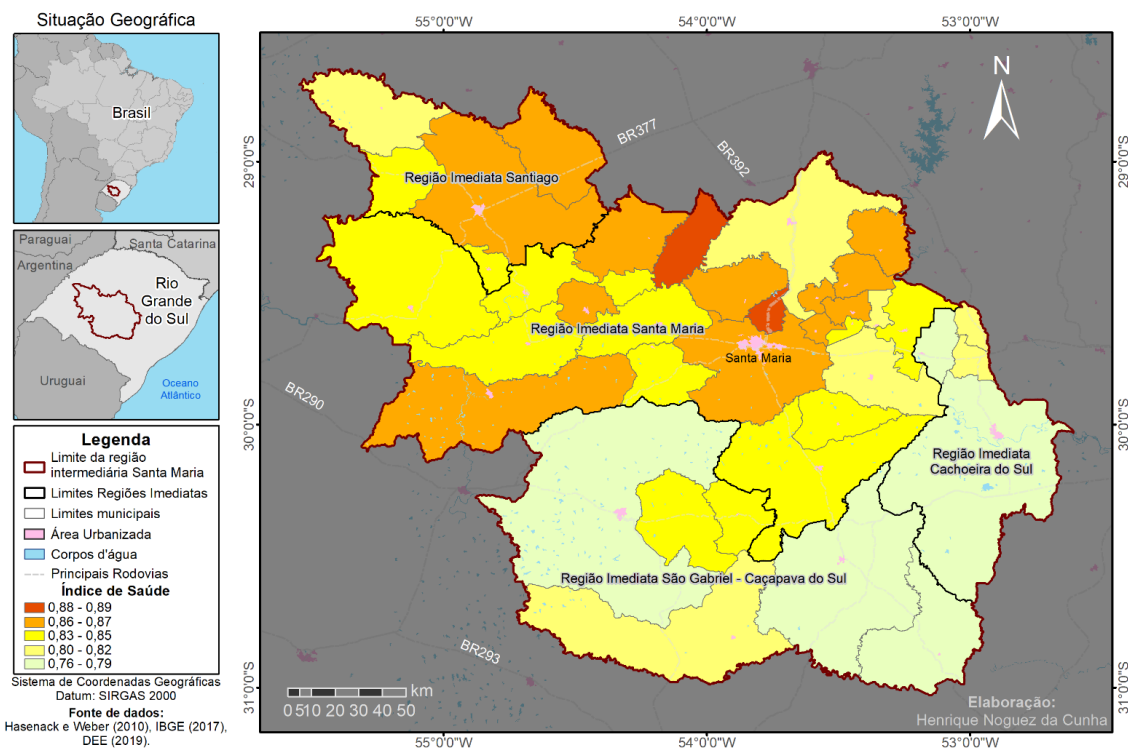


Figura 8. Índices do bloco Saúde na Região Intermediária Santa Maria/RS.

A região intermediária apresenta o índice de renda com valor 0,66 e, embora seja o menor valor entre os índices médios da região, possui a distribuição de 30% de seus municípios com índices superiores a 0,71. Os

municípios com maiores índices de renda foram Júlio de Castilhos, Santa Margarida do Sul, Nova Palma, Pinhal Grande e Capão do Cipó, em contrapartida, o município de Santana da Boa Vista contou com o menor índice de Renda, 0,52 (figura 9).

O índice de desenvolvimento socioeconômico médio da região intermediária no ano de 2019 foi 0,75. Esse índice foi condicionado pelos altos valores presentes nas regiões imediatas Santiago e Santa Maria e baixos valores nas regiões imediatas Cachoeira do Sul e São Gabriel-Caçapava do Sul (figura 10).

Os municípios de Nova Palma e Pinhal Grande, ambos da Região Imediata Santa Maria, apresentaram os maiores IDESEs, superiores a 0,80. Com valores inferiores a 0,69, os municípios de Santana da Boa Vista, Paraíso do Sul e Cerro Branco representaram os menores índices de desenvolvimento socioeconômico e necessitam de maior desenvolvimento nos blocos de Educação, Saúde e Renda.

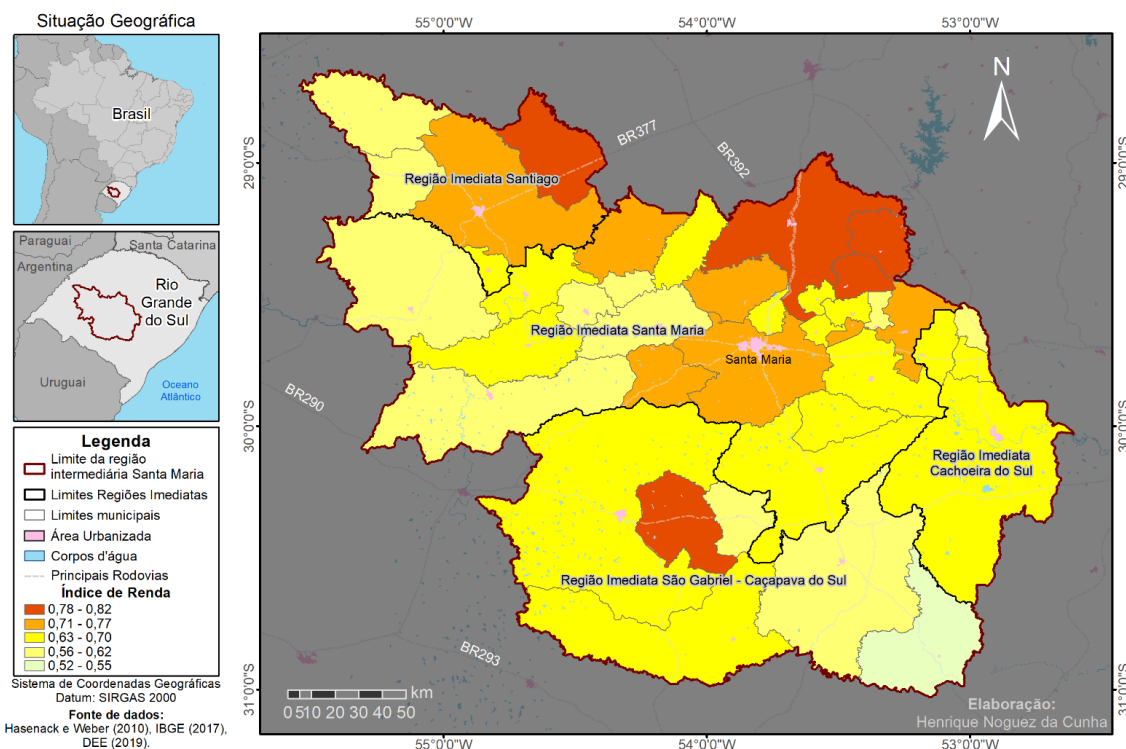


Figura 9. Índices do bloco Renda na Região Intermediária Santa Maria/RS.

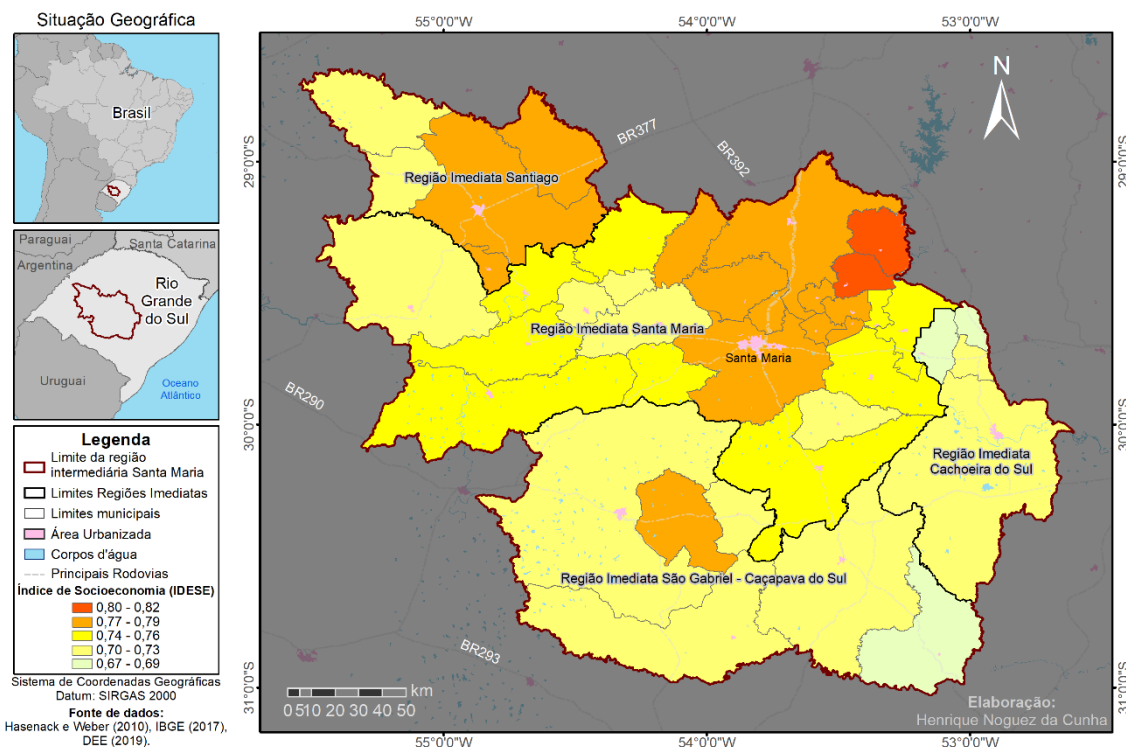


Figura 10. Índices de desenvolvimento socioeconômico do ano de 2019 na Região Intermediária Santa Maria/RS.

A avaliação sintética do IDESE se apresenta como uma ferramenta importante para a tomada de decisões em políticas públicas e para avaliar o progresso em direção ao desenvolvimento sustentável. No entanto, é de suma importância que sejam observadas as principais características econômicas da área de estudo. A evolução temporal das áreas das principais produções agrícolas temporárias dos últimos vinte anos, arroz, soja, milho e trigo, esta apresentada na figura 11.

A figura 11a representa a evolução histórica de cultivos temporários de forma discriminada na Região Imediata Cachoeira do Sul. Em destaque, em curva ascendente desde o ano de 2002, o cultivo de soja aumentou 183% no período de 2010 a 2017 e diminuiu 26% entre 2018 e 2019, indicando possível crescimento futuro por manter aumento de 2,8% entre 2019 e 2021. A área de cultivo rizícola, que em 2002 apresentava uma área de cultivo superior a área de cultivo sojícola, diminuiu a partir do ano de 2011, indicando possível troca por cultivo de soja. As demais culturas não apresentaram variações significativas ao longo do tempo.

A evolução histórica de cultivos temporários da Região Imediata Santa Maria é representada na figura 11b e, assim como na Região Imediata

Cachoeira, não apresenta variações significativas na área com cultivo de milho e trigo e apresenta redução da área de arroz em 11,2% entre os anos de 2011 e 2012. O cultivo de soja se mostra crescente desde 2002 com pequena diminuição entre os anos de 2005 e 2007. O elevado crescimento de área produzida desde o ano de 2011 indica que esse é o principal cultivo e tende a aumentar, necessitando de outras fontes de insumos para a recuperação dos nutrientes degradados durante esse tipo de uso agrícola.

A Região Imediata Santiago apresenta o menor valor de áreas com cultivo de arroz dentre as demais regiões imediatas (figura 11c). O cultivo de soja é representado, assim como na Região Imediata São Gabriel-Caçapava do Sul (figura 11d) e nas outras regiões imediatas, a partir de um grande aumento de área nos últimos 10 anos. A tendência identificada nos gráficos da figura 11 é de predomínio do cultivo sojícola como principal produto de *commodities* e a manutenção ou conversão das áreas anteriormente utilizadas para cultivo de arroz. As demais culturas não contaram com alterações significativas em área produzida e se caracterizam por compreender suas safras em períodos diferentes do cultivo de arroz e soja.

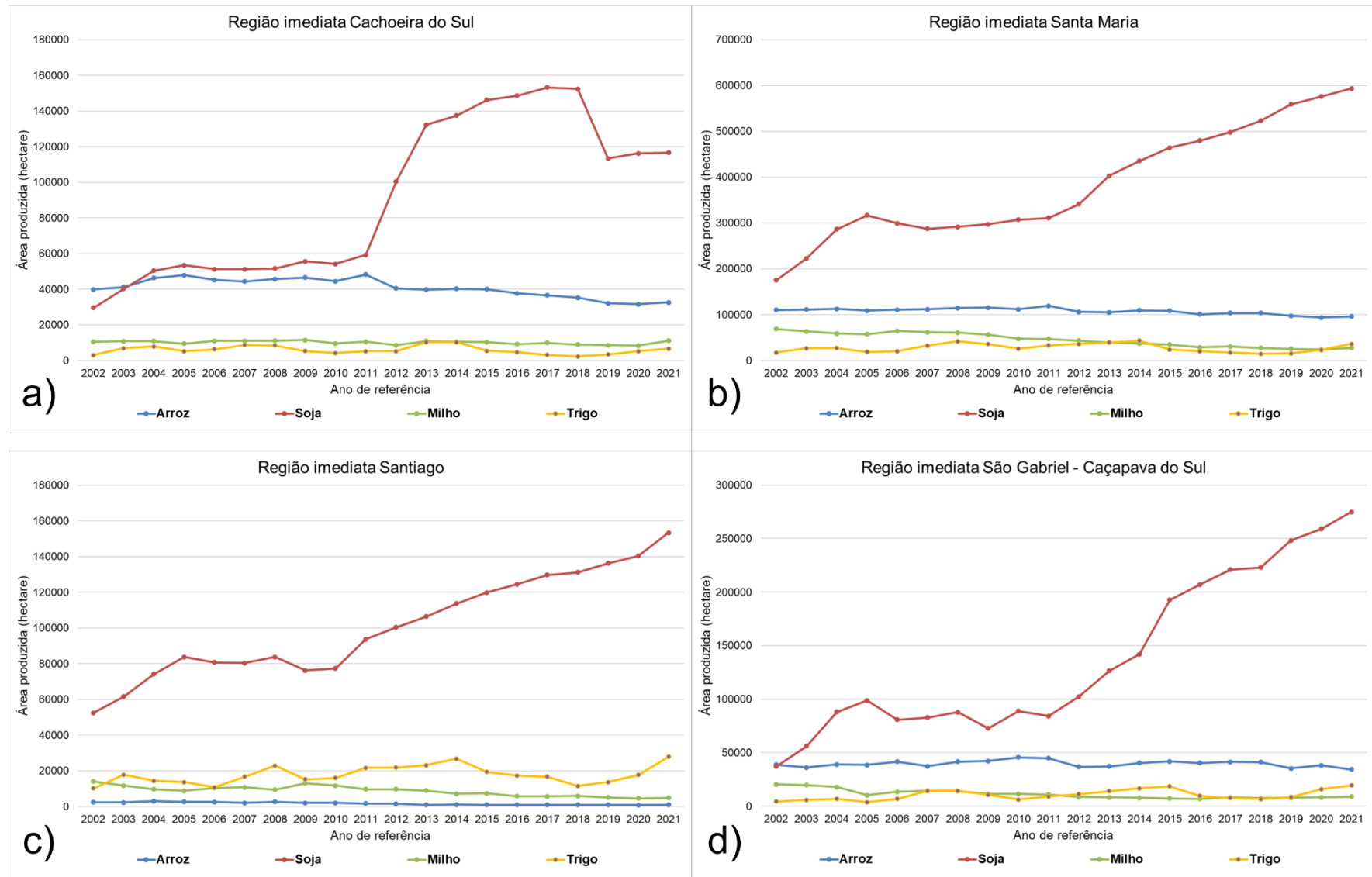


Figura 11. a) Dinâmica de cultivos temporários na Região Imediata Cachoeira do Sul; b) Dinâmica de cultivos temporários na Região Imediata Santa Maria; c) Dinâmica de cultivos temporários na Região Imediata Santiago; d) Dinâmica de cultivos temporários na Região Imediata São Gabriel-Caçapava do Sul.

A dinâmica do cultivo de soja ao longo das duas últimas décadas apresentou valores positivos com crescimento em todas as regiões imediatas e os percentuais de área plantada com essa *commoditie* agrícola estão representados na figura 12. A Região Imediata de Santa Maria apresenta 29,2% de sua área com plantio de soja, seguida da Região São Gabriel-Caçapava do Sul com 20,3%, Santiago com 28,8% e Cachoeira do Sul com 26,4%.

Cabe destacar que esses valores foram normalizados pela área de cada região imediata e, por apresentarem diferentes percentuais de representação areal dentro da região intermediária Santa Maria, apenas representam o quantitativo desse cultivo para a região imediata. Quando avaliado em escala municipal, os maiores valores de áreas cultivadas com soja, referentes a safra dos anos 2021/2022, estão presentes nos municípios de São Gabriel, Cachoeira do Sul e Júlio de Castilhos com mais de 90mil hectares cultivados, cada (figura 13).

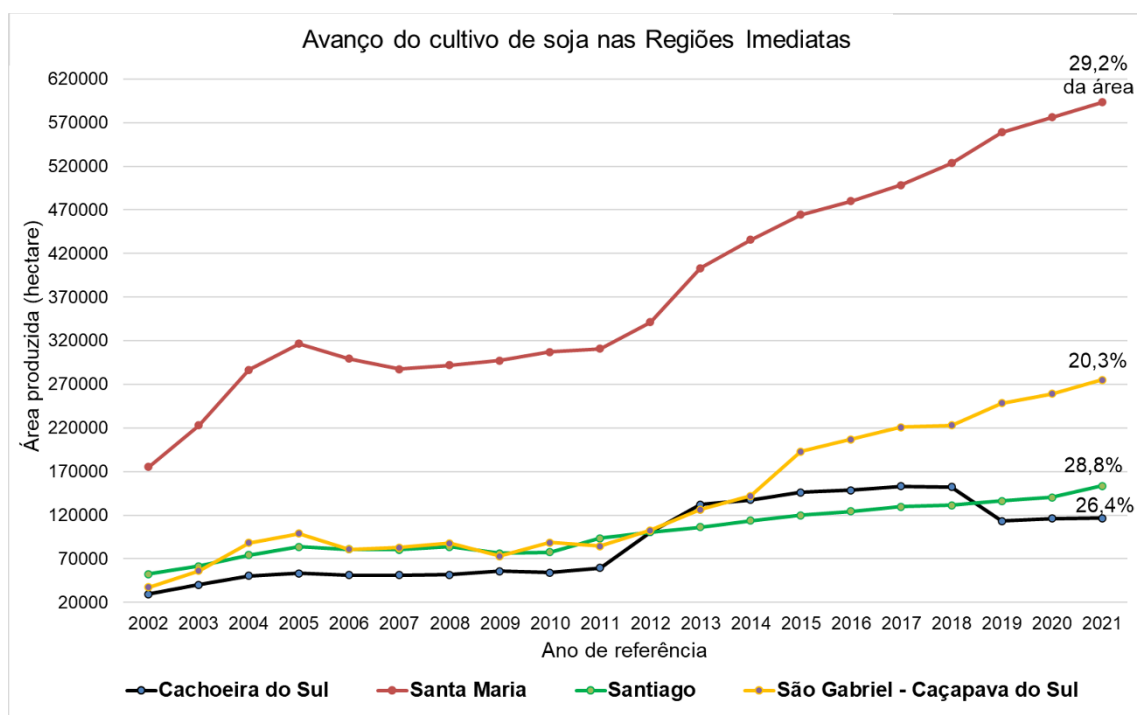


Figura 12. Avanço do cultivo de soja nas regiões imediatas da Região Intermediária Santa Maria/RS.

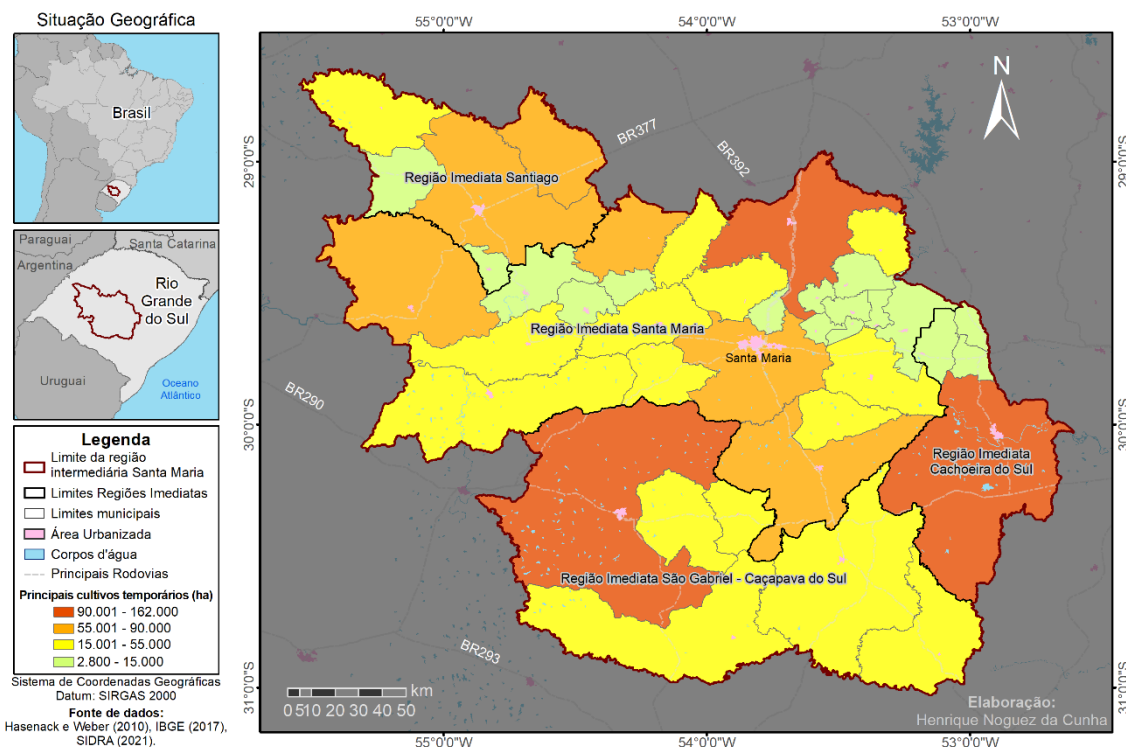


Figura 13. Área dos municípios com cultivo de soja nas regiões imediatas da Região Intermediária Santa Maria/RS.

A dimensão territorial dos municípios e também das regiões imediatas condicionam as maiores ou menores contribuições para a caracterização de cultivo agrícola de *commodities*. Essa atividade, em especial o cultivo sojícola, se apresenta como a principal atividade agrícola da Região Intermediária Santa Maria na atualidade e possui aumento dinâmico em razão da sua implantação em locais anteriormente utilizados para o cultivo rizícola e possivelmente das áreas de pecuária extensiva.

Nesse sentido, as principais atividades pecuárias presentes na Região Intermediária Santa Maria foram identificadas e quantificadas no período das duas últimas décadas e estão apresentadas na figura 14, com a dinâmica de número de indivíduos (cabeças) de bovinos, suínos e ovinos criados por ano em cada região imediata. A pecuária de suínos representa os menores valores em todas as regiões imediatas por suas características de criação em confinamento e não depende de grande extensão territorial (figuras 14a, 14b, 14c e 14d). A Região Imediata Santa Maria contou com a maior criação de suínos ao longo dos últimos 20 anos e diminuição de 137.154 cabeças, em 2002, para 44.597 cabeças em 2021, equivalente a 67,5% de queda (figura 14b).

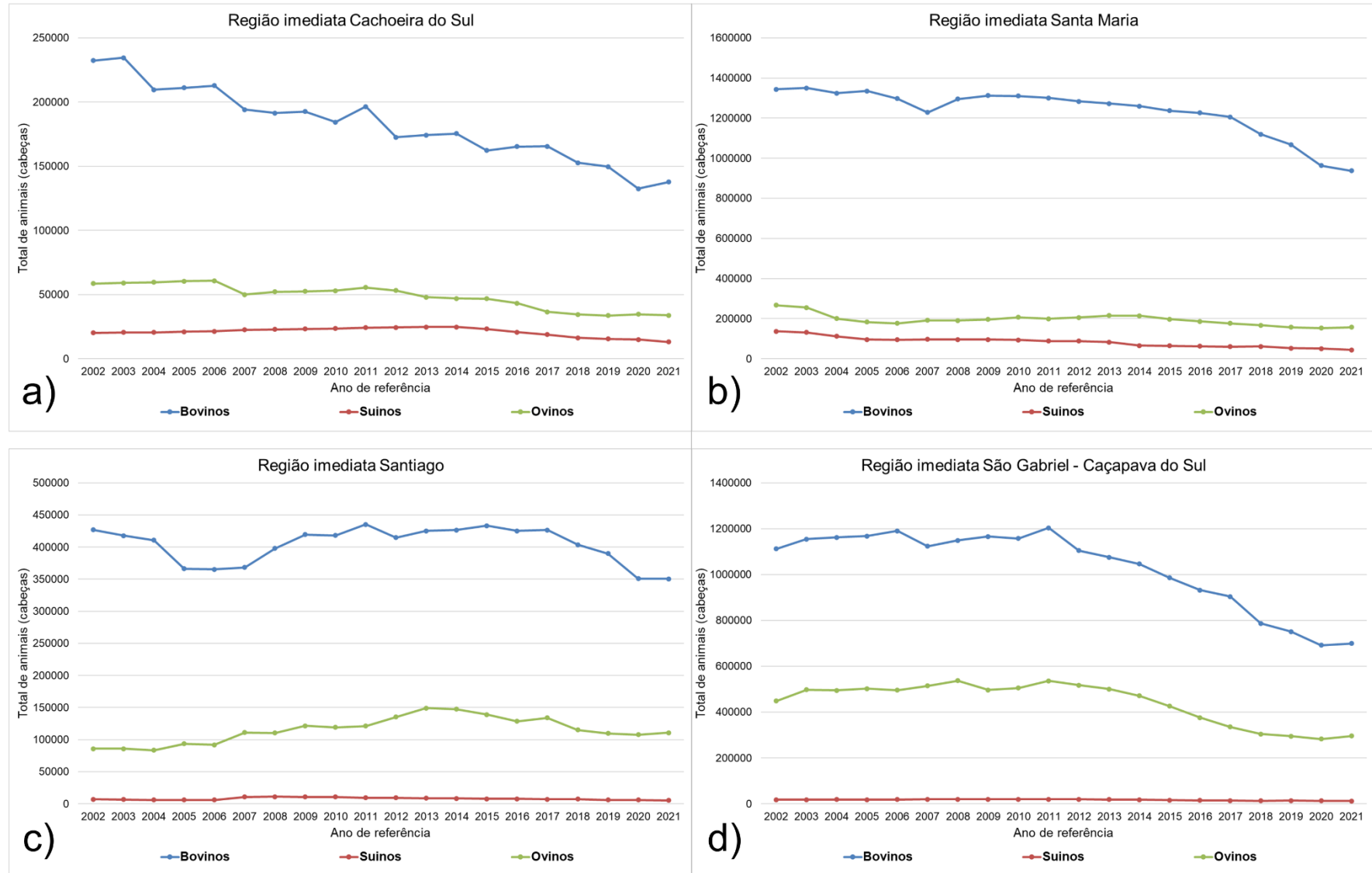


Figura 14. a) Dinâmica da pecuária na Região Imediata Cachoeira do Sul; b) Dinâmica da pecuária na Região Imediata Santa Maria; c) Dinâmica da pecuária na Região Imediata Santiago; d) Dinâmica da pecuária na Região Imediata São Gabriel-Caçapava do Sul.

Na Região Imediata Cachoeira do Sul, a pecuária ovina apresentava 58.535 cabeças em 2002 e manteve aumento até o ano de 2006. A partir do ano de 2007, os valores de produção se mantiveram em instabilidade com reduções e resultaram em 33.856 no ano de 2021. A pecuária bovina apresentou, assim como em todas as outras regiões imediatas, a maior produção com 232.333 cabeças de bovinos em 2022 e redução para 137.764 em 2021 (figura 14a).

A criação de ovinos da região imediata Santa Maria se apresenta com diminuição de valores, com 267.521 cabeças no ano de 2002 e 156.930 no ano de 2021. Por outro lado, a criação de bovinos que contava com 1.343.702 de cabeças em 2002, atingiu um valor de queda de 30,2% até o ano de 2021. A pecuária bovina, de 2021, da Região Imediata Santiago sofreu uma queda de 17,9% de produção em relação ao ano de 2002, quando apresentava 426.882 cabeças de bovinos. Por outro lado, a criação de ovinos se estabilizou ao longo dessas duas décadas e apresentou um aumento de 29%, com 110.749 cabeças em 2021.

A dinâmica de produção pecuária da Região Imediata São Gabriel-Caçapava do Sul, apresentada na figura 14d, demonstra uma similaridade na tendência das produções bovina e ovina. É possível verificar que essas produções mantiveram seus patamares até o ano de 2011 e, a partir dessa data, obtiveram queda de produção.

A figura 15 apresenta o somatório das atividades pecuárias em cada região imediata e torna possível a sua avaliação temporal. As regiões imediatas com maior representatividade de atividade pecuária na região intermediária Santa Maria foram São Gabriel-Caçapava do Sul e Santa Maria (figura 15) e, ao serem relacionadas temporalmente com a dinâmica do cultivo de soja (figura 12), apresentam o ano de 2011 como um marco temporal que indica a conversão de campos com atividades pecuaristas em cultivo sojícola. Pois, apresentaram autocorrelação negativa com possível projeção de aumento em anos futuros.

Embora a Região Imediata Santa Maria apresente, no ano de 2021, a maior produção pecuária dentre as outras regiões, não apresenta um município com grande produção (figura 16). Sua dimensão territorial e maior número de municípios (tabela 1) tendenciam uma maior produção com valores altos a partir do somatório de 62,5% dos municípios que a compõem, mesmo que apresentem baixos ou médios valores na atividade. Por outro lado, a Região Imediata São Gabriel-Caçapava do Sul conta com o município de São Gabriel com a maior produção pecuária municipal da Região intermediária (figura 16).

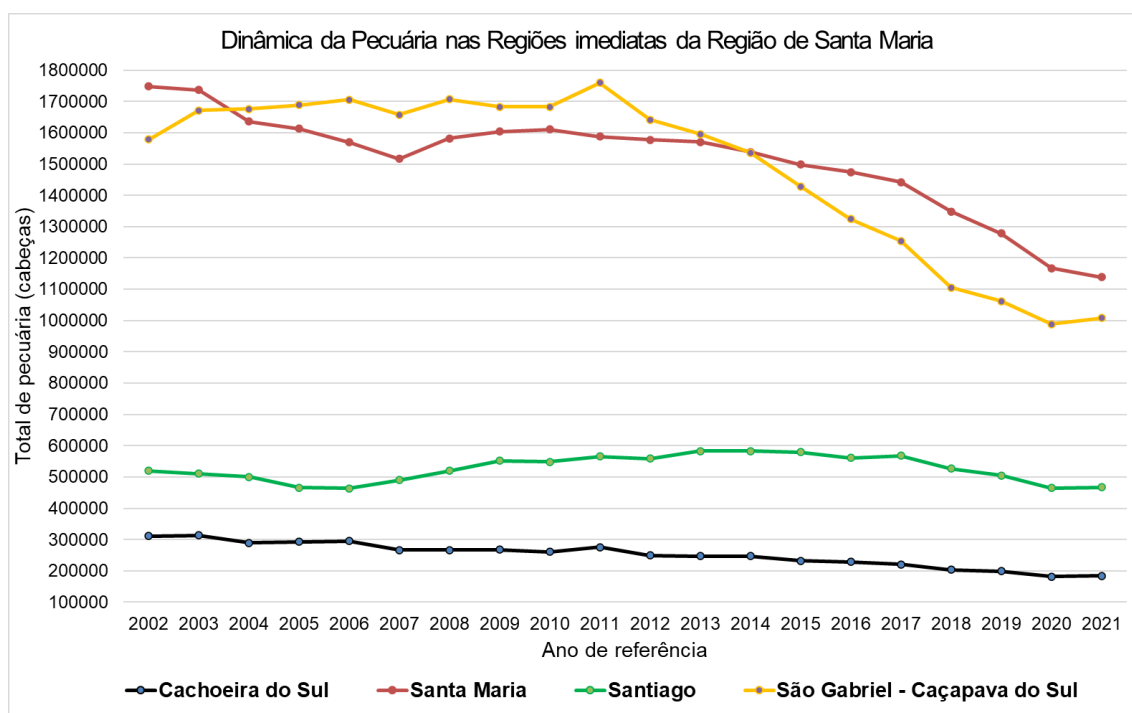


Figura 15. Dinâmica da pecuária nas regiões imediatas da Região Intermediária Santa Maria/RS

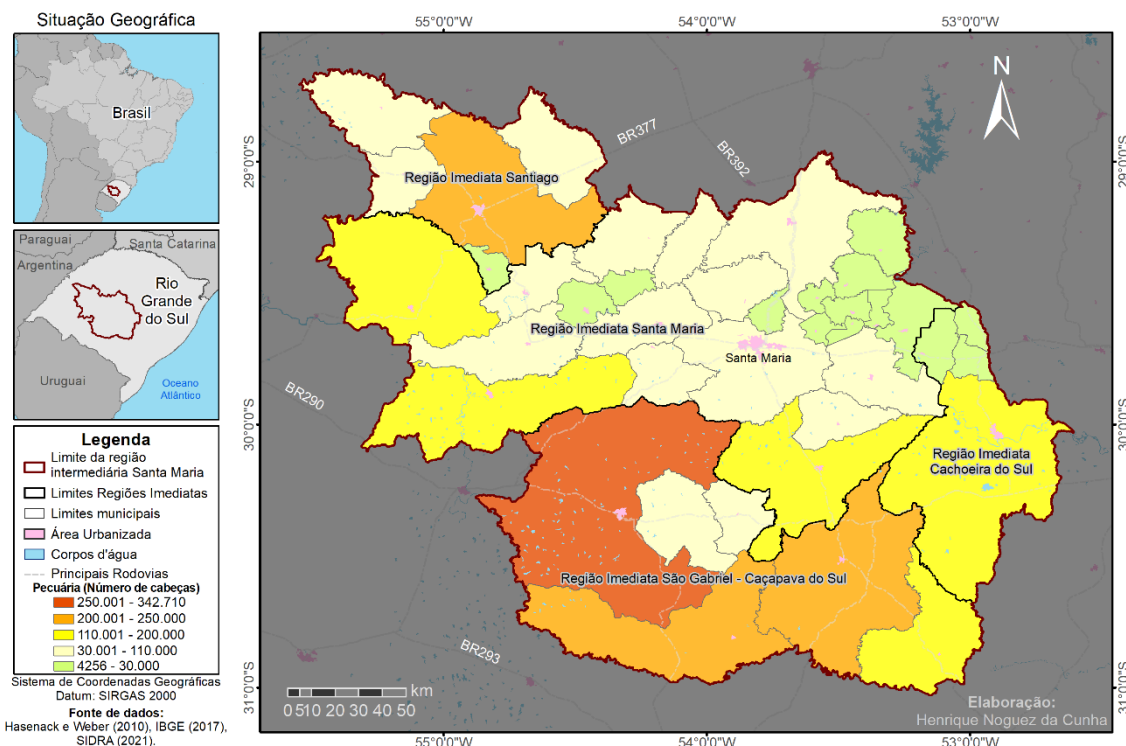


Figura 16. Pecuária nos municípios que compõem a Região Intermediária Santa Maria/RS.

De acordo com Matte (2019), o avanço da atividade silvícola está presente na porção territorial que abrange a Região Intermediária Santa Maria. Esse tipo de produção, assim como a produção temporária de granífera, causa degradação na qualidade dos solos (GALINDO; ALMEIDA, 2021) e pode indicar a necessidade de recuperação dos atributos por meio de insumos em forma de biossólido advindo do processo de tratamento de esgoto.

Na figura 17 são apresentadas as dinâmicas do cultivo silvícola presentes na base de dados no IBGE (SIDRA, 2021) para o período de 9 anos, de 2013 a 2021. A Região Imediata Santiago apresentou a menor área com silvicultura enquanto a região São Gabriel-Caçapava do Sul indica possível tendência de aumento de área produzida. As regiões imediatas Santa Maria e Cachoeira do Sul apresentaram valores próximos e cabe destaque para Cachoeira do Sul por contemplar a maior densidade de produção devido sua menor área territorial (figura 17). Quando avaliados os municípios de maior atividade silvícola, Cachoeira do Sul, São Gabriel e

Cacequi apresentaram áreas silvícolas superiores a 10mil hectares (figura 18).

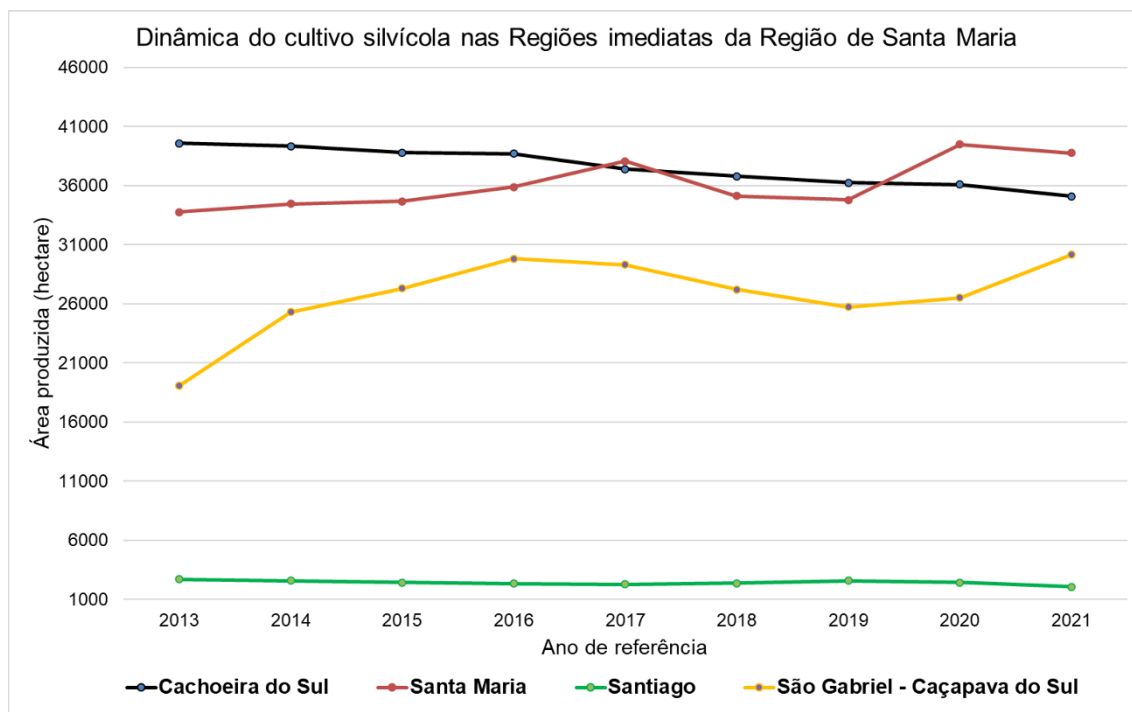


Figura 17. Dinâmica da silvicultura nas regiões imediatas da Região Intermediária Santa Maria/RS.

O município de São Gabriel se destaca por compor os maiores valores de produções graníferas, pecuárias e silvícolas dentre os demais municípios da Região Intermediária Santa Maria. No entanto, apresenta um baixo índice de desenvolvimento econômico, principalmente ao se tratar de saúde e educação.

A dinâmica de Produto Interno Bruto (PIB) (DEE, 2019) das regiões imediatas é apresentado na figura 19 como um indicador do potencial de crescimento da região. Nesse caso, também para comparar o desempenho econômico das regiões avaliar o impacto de políticas públicas e outras iniciativas na economia.

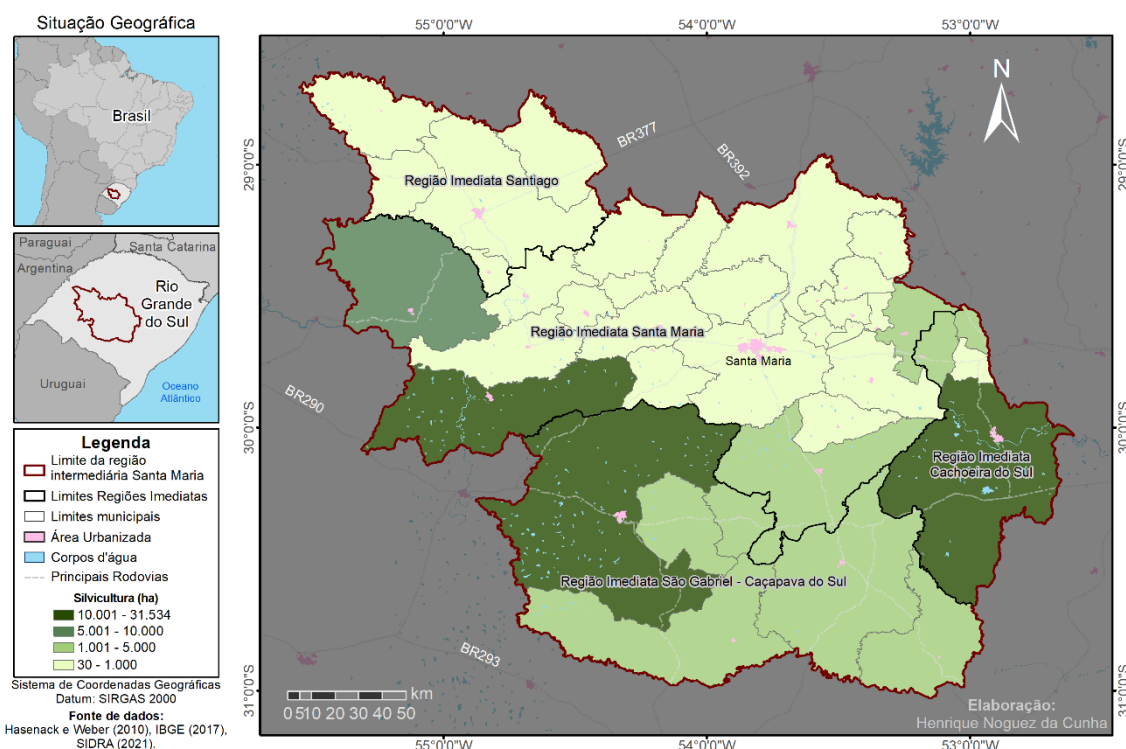


Figura 18. Silvicultura nos municípios que compõem a Região Intermediária Santa Maria/RS.

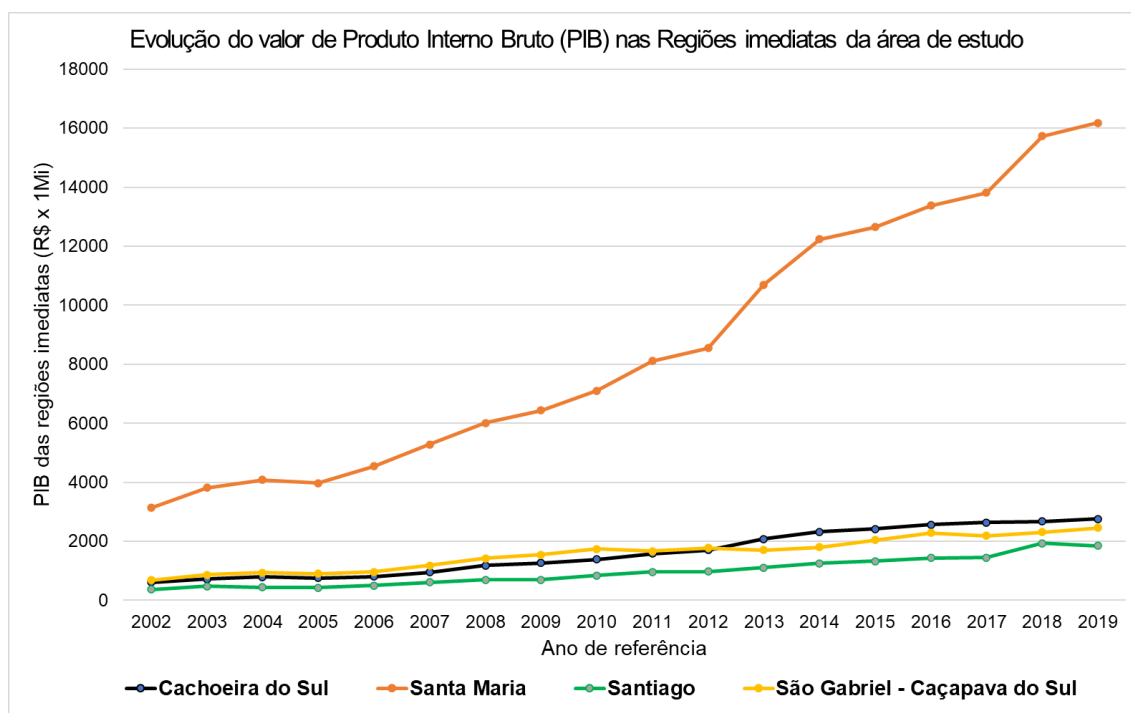


Figura 19. Dinâmica do PIB nas regiões imediatas da Região Intermediária Santa Maria/RS.

Todas as regiões imediatas caracterizaram um aumento de seus valores em PIB ao longo das duas últimas décadas. No entanto, a Região

Imediata Santiago apresentou uma queda de 4,5% no valor de PIB de 2019 em relação ao ano de 2018. A Região Imediata Santa Maria, possui seu PIB alavancado pelo município de Santa Maria, que conta com as maiores população, instalações industriais e bens de serviço, sendo considerada como o polo regional da região intermediária, em um crescente aumento do PIB em 416,1% nas últimas duas décadas para a região (DEE, 2019).

3.3 TIPOS DE ROCHAS NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA

De acordo com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), com predominância na Região Imediata Santiago e ocorrência nas porções norte da Região Imediata Santa Maria e central da Região São Gabriel-Caçapava do Sul, situam rochas ígneas e metamórficas (Figura 20) (SILVA et al., 2004; RAMGRAB et al., 2004). Ainda, nesses locais, ocorrem granitos, sienogranitos, granodioritos, quartzos, andesitos, tufos, muscovitas, monzogranitos, basaltos e dacitos. As Rochas metamórficas ocorrem em porções fragmentadas na porção sul da Região intermediária, compreendendo metadioritos, xistos, metapelitos, ortognaisses, grafitas, metagranitoides, rochas metalvulcânicas e ortogranulitos.

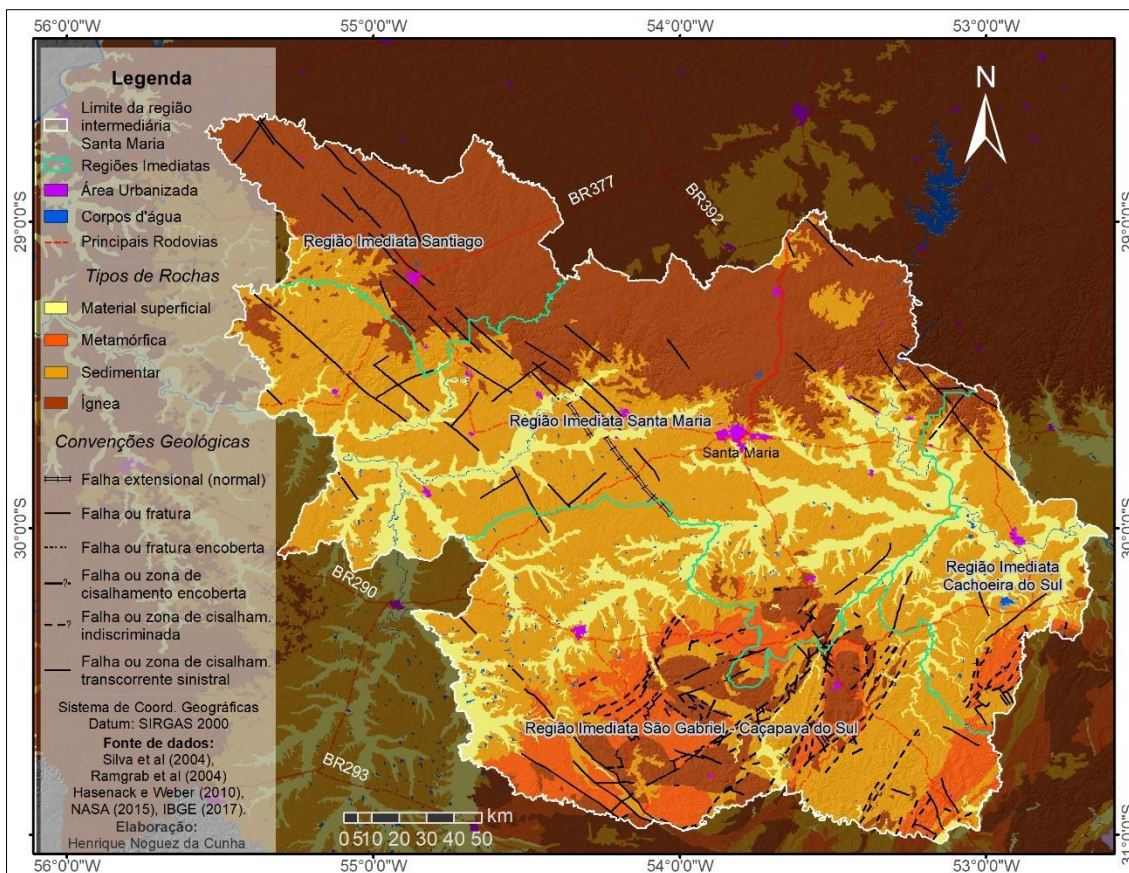


Figura 20. Mapa dos tipos de rochas da Região Intermediária Santa Maria-RS.
 Fonte: Adaptado de Silva et al (2004); Ramgrab et al (2004). Elaborado pelo autor

A porção central conta com o predomínio de rochas sedimentares, onde são encontrados arenitos, siltitos, arcóseos, argilitos, folhelhos, conglomerados e pelitos; e depósitos de materiais superficiais em estreitas faixas e fragmentos que se estendem ao longo da rede de drenagem fluvial. A litologia nesses locais restringe-se a depósitos superficiais formados por areias (geralmente associações de silte, argila e cascalhos) (Figura 20) (SILVA et al., 2004; RAMGRAB et al., 2004).

3.4 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA

A geomorfologia da região Intermediária Santa Maria se divide em três principais ambientes. Na porção sul se estrutura pelo Planalto Rebaixado Sul Rio-Grandense com a presença de planaltos residuais; na porção central

predominam as depressões dos rios Jacuí e Ibicuí e Planícies Alúvio-Coluvionares e a porção norte ainda conta com as depressões dos rios, a presença de aplanamentos e dissecações da Serra Geral e os planaltos da Campanha e Missões (IBGE, 2021a) (Figura 21).

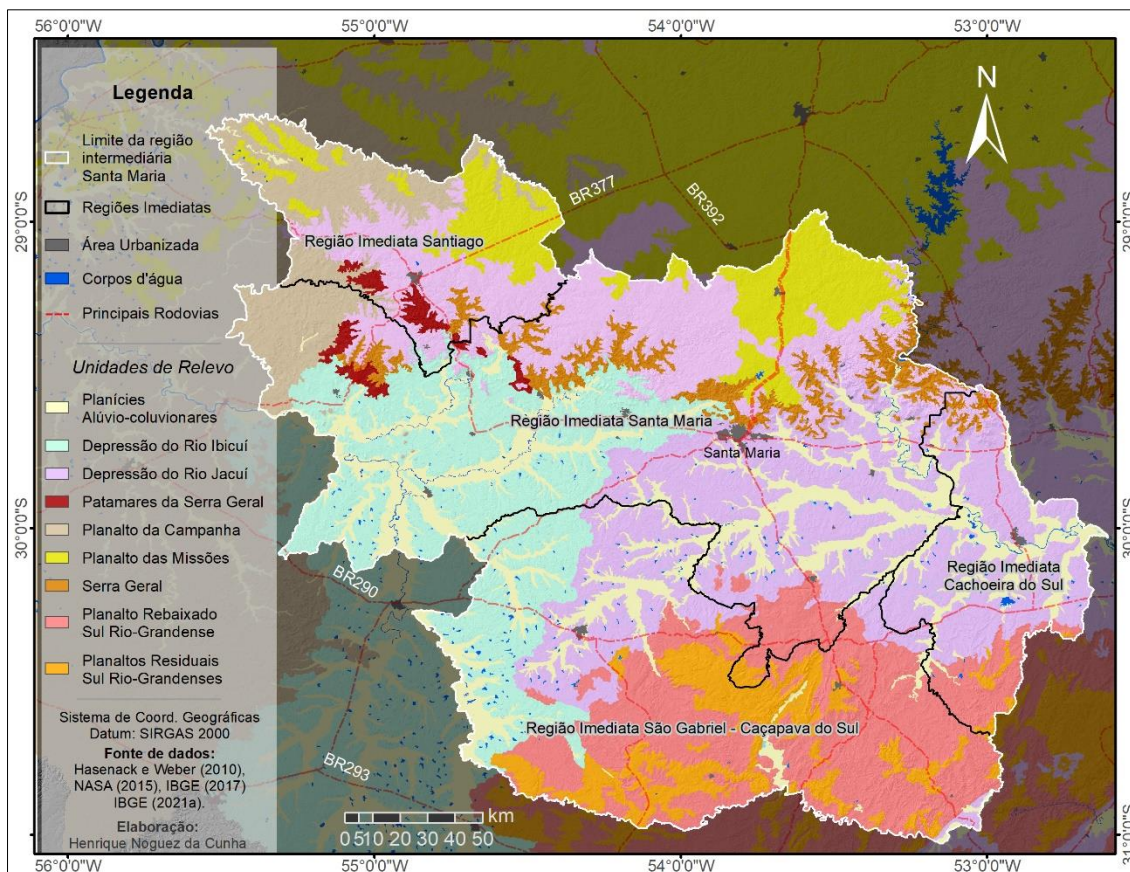


Figura 21. Unidades de Relevo da Região Intermediária Santa Maria-RS
Fonte: Adaptado de IBGE (2021a). Elaborado pelo autor

A diversidade dos aspectos geomorfológicos presente na Região Intermediária (figura 21), reflete nas formas de relevo, seguindo a classificação de Dos Santos et al. (2018) que propõe classes de relevo de acordo com a declividade, com a distribuição de relevos forte ondulados a escarpado nas áreas de planalto residual Sul Rio-Grandense e na Serra Geral e seus Patamares. As demais unidades geomorfológicas configuram relevo plano a ondulado (figura 22).

A variação clinográfica presente entre as características das Depressões, Serra e Planaltos resulta, apesar de contar com valores

discretos, em médias próximas ao relevo Suave Ondulado. Em média, a Região Imediata Santiago possui 7,6% de declividade. As Regiões Cachoeira do Sul, Santa Maria e São Gabriel-Caçapava do Sul apresentam 7,8%, 8,2% e 8,8% de clinografia, respectivamente.

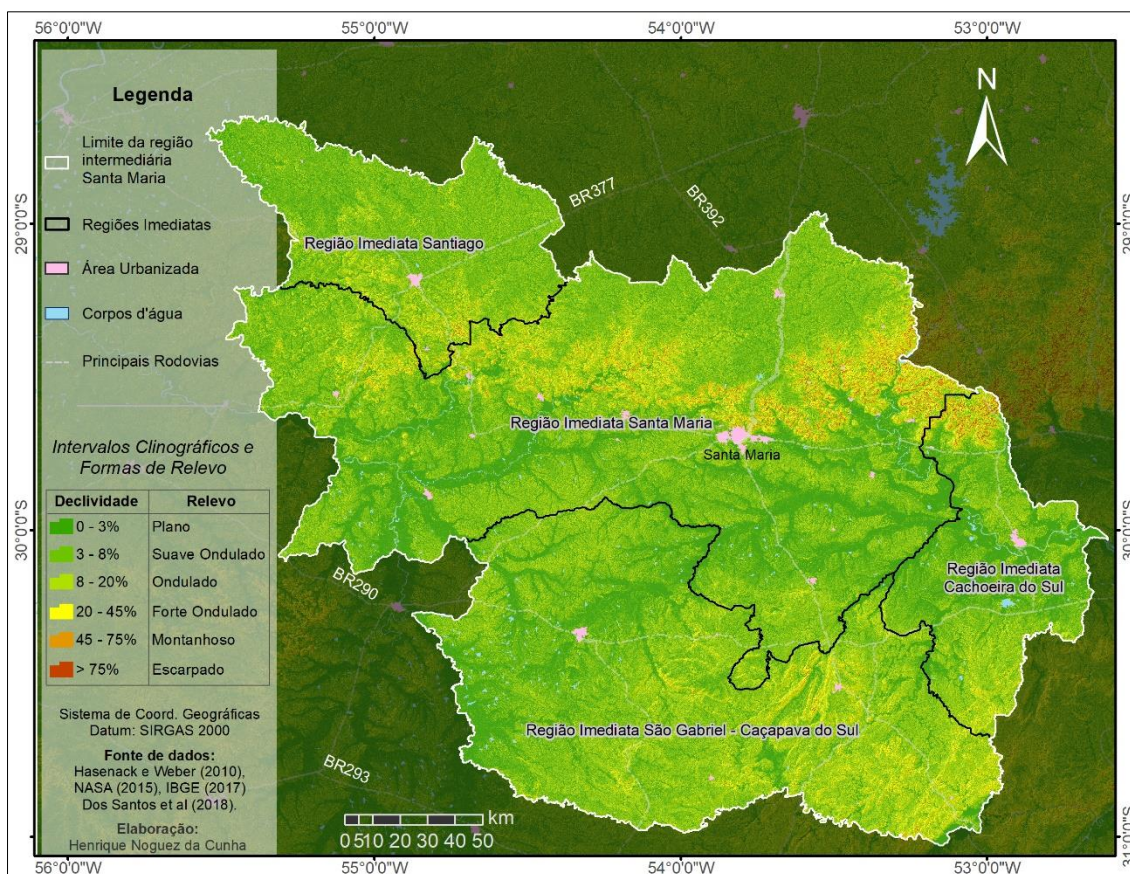


Figura 22. Classes de Relevo e declividades da Região Intermediária Santa Maria-RS.

Os maiores declives são presentes nas Regiões Imediatas Santa Maria e Cachoeira do Sul (aproximadamente 250% de inclinação). A Região São Gabriel-Caçapava do Sul conta com declividade máxima de 180% e Santiago, 132%, presentes na classe de relevo escarpado (maior que 75% de declividade).

3.5 SOLOS NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA

As principais classes de solos presentes na Região Intermediária são Argissolos (37,5), Neossolos (27,6%) e Planossolos (12,1%). As demais classes são da ordem dos Cambissolos, Chernossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Nitossolos e Plintossolos e perfazem 22,8% da Região Intermediária (IBGE, 2021b) (figura 23).

A Região Imediata Cachoeira do Sul possui como predomínio as áreas compostas por Argissolo (52%), Planossolo (21,9%) e Neossolo (17,4%) (IBGE, 2021b) (tabela 2).

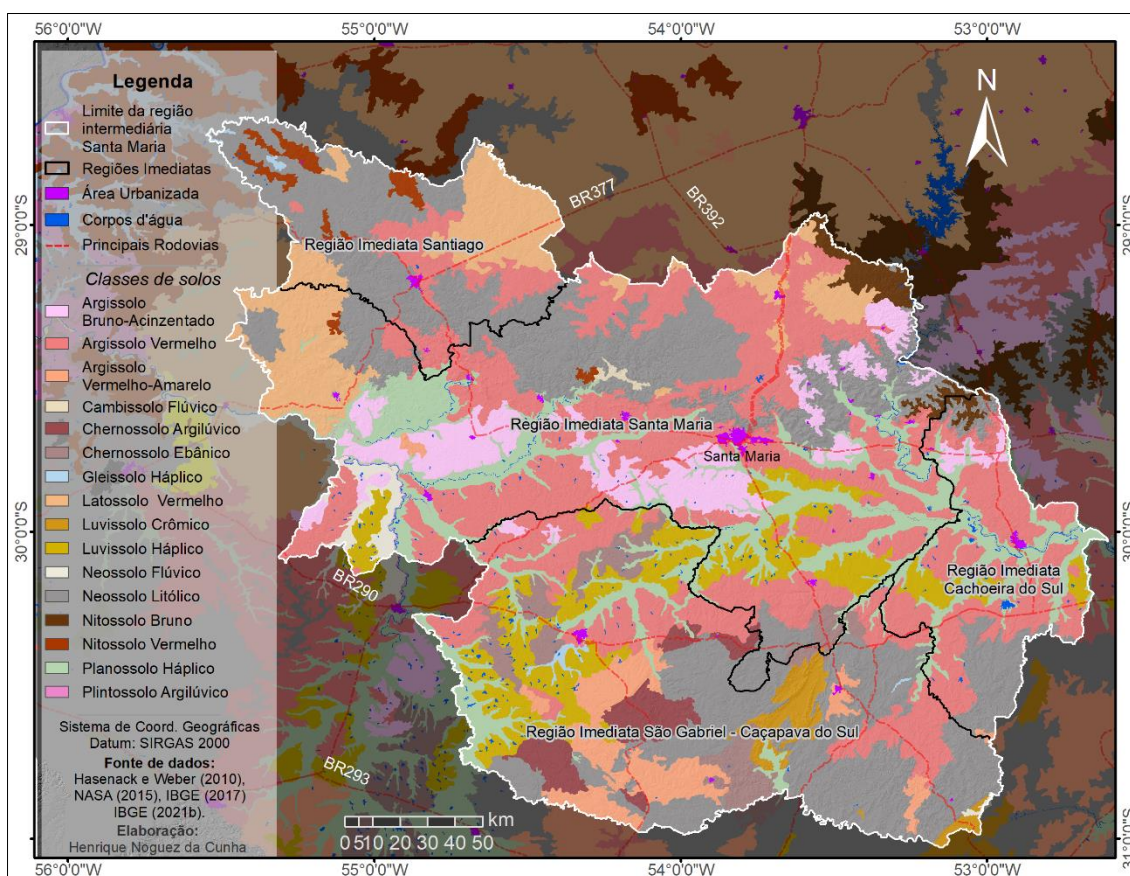


Figura 23. Classes de solos da Região Intermediária Santa Maria-RS.
Fonte: Adaptado de IBGE (2021b).

Tabela 2. Distribuição das classes de solos nas Região Imediatas.

Classe de Solo	Percentual de classes de solos nas Regiões Imediatas (%)			
	Cachoeira do Sul	Santa Maria	Santiago	São Gabriel - Caçapava do Sul
Argissolo	52,0	45,3	16,9	29,2
Cambissolo	0,1	0,2	0	0
Chernossolo	0	0,7	0	14,7
Gleissolo	0	0	0,7	0,5
Latossolo	0	8,9	25,7	0
Luvissolo	6,8	5,1	0,0	15,9
Neossolo	17,4	22,1	50,0	30,4
Nitossolo	1,8	2,4	6,2	0
Planossolo	21,9	15,0	0,5	9,2
Plintossolo	0	0,2	0	0

Fonte: Adaptado de IBGE (2021b). Elaborada pelo autor

A tabela 2 apresenta todas as Regiões Imediatas com altos valores percentuais de Argissolo e Neossolo (IBGE, 2021b). Contudo, na Região Santiago também se destaca a presença de Latossolos em mais de 25% de cobertura (tabela 2).

3.6 CLIMA NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA

A características climáticas da área em estudo apresentam variações que acompanham o delineado do relevo. A Região Imediata São Gabriel - Caçapava do Sul e a metade sul da região Cachoeira do Sul estão localizadas sob o clima subtropical Ia, segundo a classificação de Rossato (2011), que indica um clima pouco úmido com inverno frio e verão fresco (figura 24).

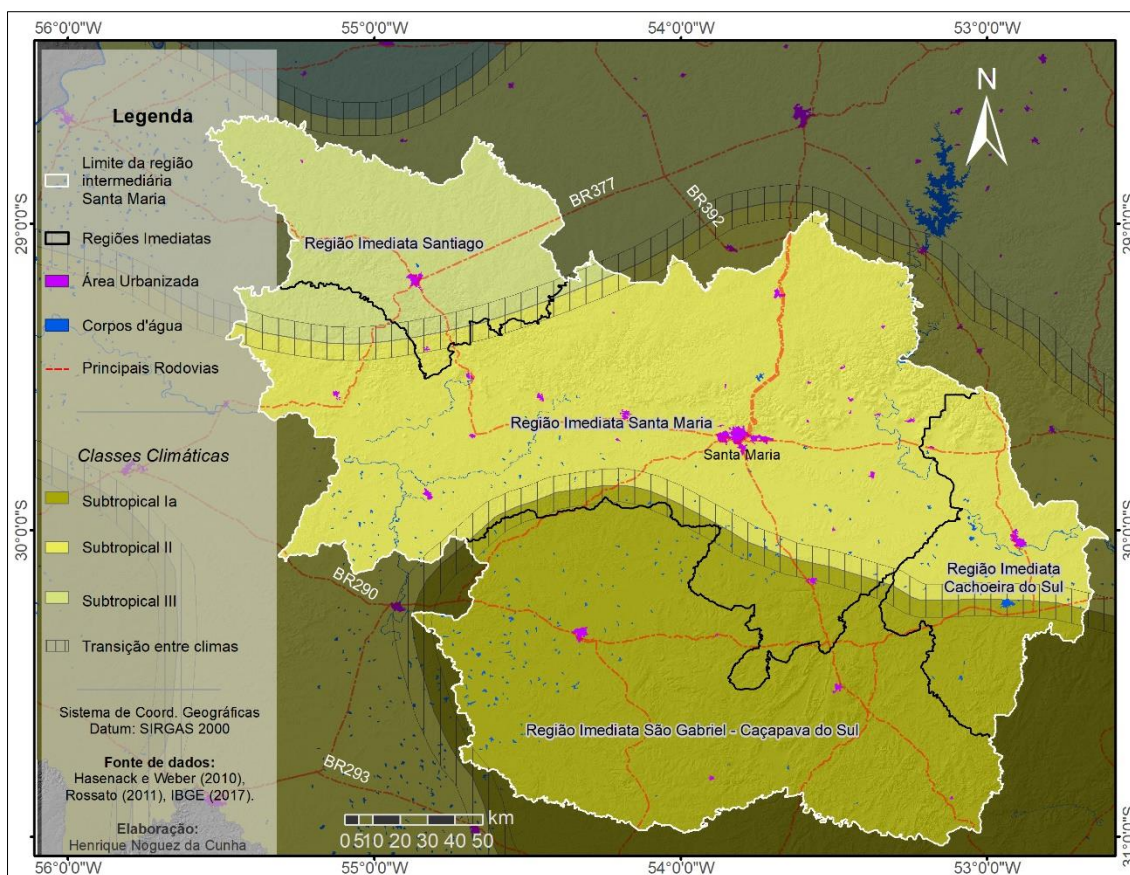


Figura 24. Classes Climáticas da Região Intermediária Santa Maria-RS.
Fonte: Adaptado de Rossato (2011).

A metade superior da região Cachoeira do Sul e praticamente toda a Região imediata de Santa Maria possuem o clima Subtropical II, medianamente úmido com variação longitudinal de temperaturas médias. Já a Região Santiago e a borda noroeste da Região Imediata Santa Maria estão localizadas sob o clima Subtropical III, úmido com variação longitudinal de temperaturas médias (ROSSATO, 2011). Essas variações climáticas influenciam na organização do espaço e suas formas de trabalho, assim como na composição florística da região (CERA et al., 2015).

3.7 BIOMAS, USOS E COBERTURAS DA TERRA NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA

Resultante de uma série de características físicas e climáticas, os diferentes biomas brasileiros configuram variações na vegetação nativa e

formas socioeconômicas de uso da terra (IBGE, 2019). O bioma pampa é predominante na área de estudo e possui características de cobertura campestre e uso agropecuário. Na área em estudo, o bioma mata atlântica é presente junto à Serra Geral e possui maior cobertura florestal (figuras 25 e 26) (IBGE, 2019).

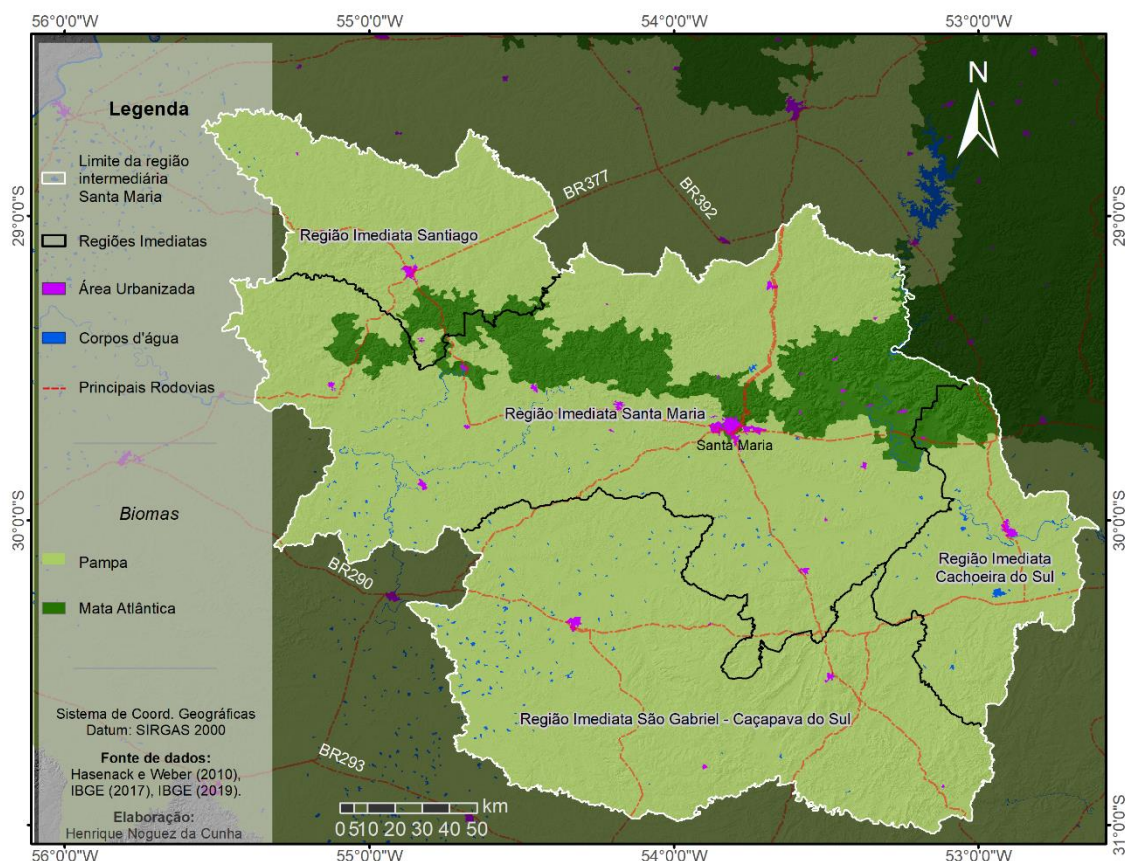


Figura 25. Biomas sobre a Região Intermediária Santa Maria-RS.
Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

A cobertura florestal esteve presente, no ano de 2019, sobre as áreas de maiores declividades. As formações predominantes na área de estudo foram campestre (33,9%), agropecuária (33,2%), características do bioma pampa, e formação florestal (17,6%) (figura 27).

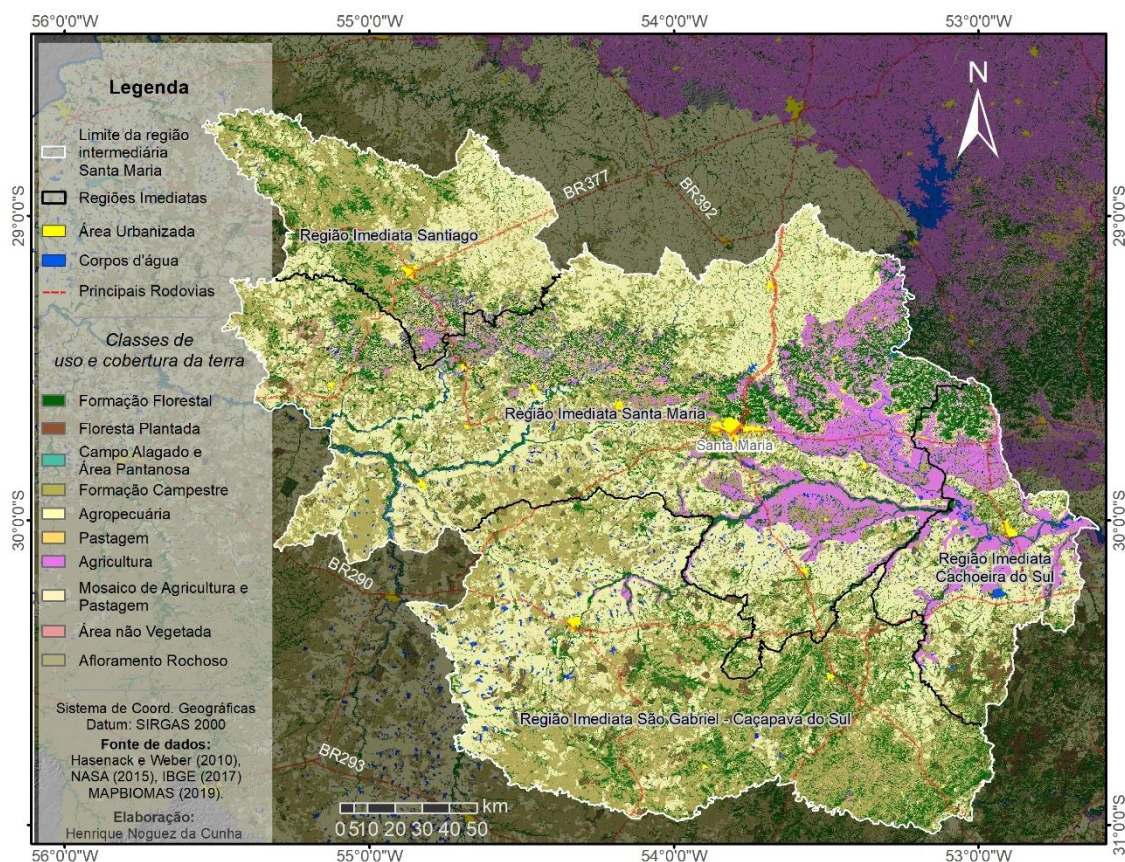


Figura 26. Uso e Cobertura da terra na Região Intermediária Santa Maria-RS no ano de 2019. Fonte: Adaptado de MapBiomas (2019).

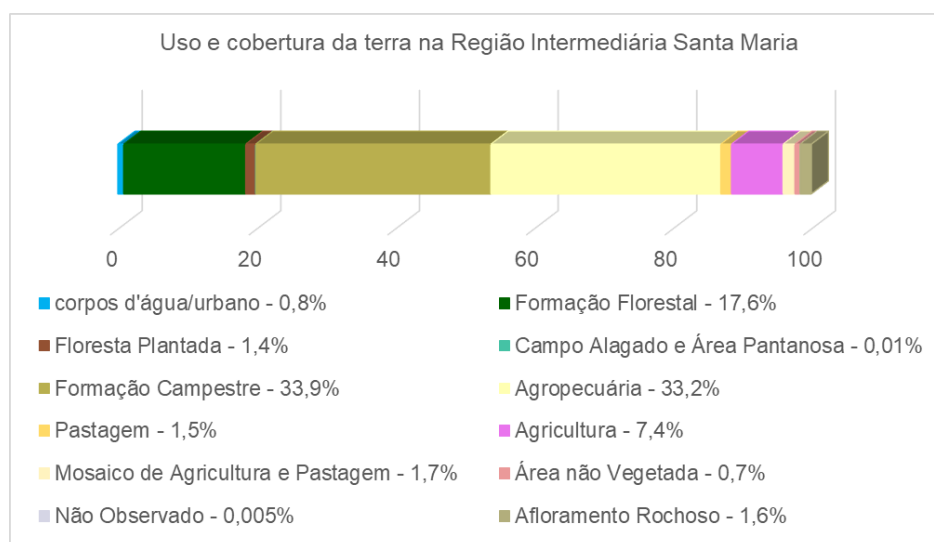


Figura 27. Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na Região Intermediária Santa Maria.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2019). Elaborado pelo autor

São apresentadas, assim, três principais classes de uso e cobertura da terra presentes na área no ano de 2019 (figura 27). As demais 9 classes se

mostraram menos representativas e quando somadas totalizam apenas 15,3% da área estudada.

3.8 HIDROGRAFIA NA REGIÃO INTERMEDIÁRIA SANTA MARIA

A Agência Nacional de Águas divide o território Brasileiro em doze grandes regiões hidrográficas (ANA, 2019). Na região intermediária Santa Maria são presentes oito bacias hidrográficas pertencentes à três regiões hidrográficas, a área de drenagem e região do Rio Uruguai, do Rio Camaquã e do Guaíba (SEMA, 2018) (figura 28).

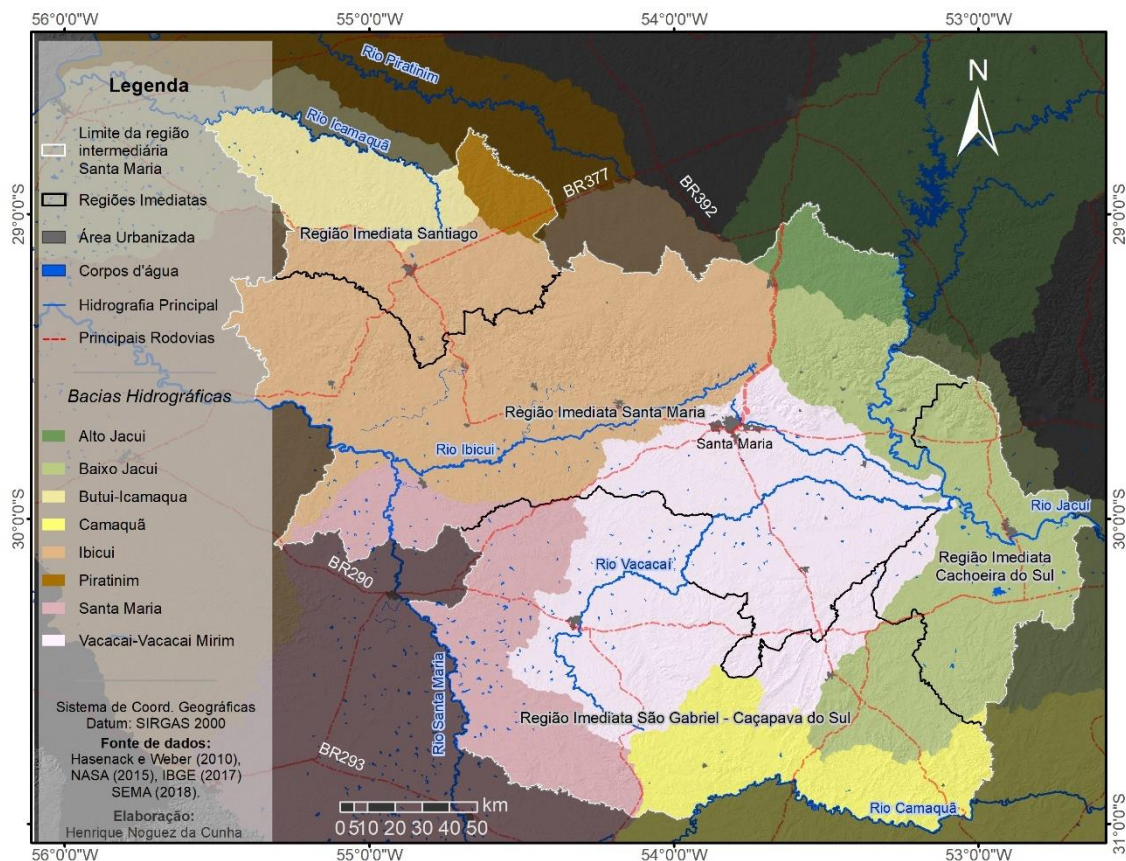


Figura 28. Bacias Hidrográficas e seus rios principais sobre a Região Intermediária Santa Maria. Fonte: Adaptado de SEMA (2018).

As bacias hidrográficas Alto Jacuí, Baixo Jacuí e Vacacaí-Vacacaí-Mirim estão localizadas no sudeste da área em estudo e contribuem para o sistema de drenagem da Bacia do Guaíba. Ao extremo sul da região

intermediária, a bacia hidrográfica do Camaquã possui suas cabeceiras. As quatro demais bacias hidrográficas são localizadas nas áreas mais ao oeste e noroeste da Região e contribuem para o sistema de drenagem região hidrográfica do Rio Uruguai (SEMA, 2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa bibliográfica é o estudo de toda a bibliografia publicada, por meio de livros, revistas, publicações digitais e impressas (GIL, 2002). O seu intuito é fazer com que o pesquisador tenha contato direto com o material documentado a respeito de um determinado assunto, subsidiando-o na análise de pesquisas ou suas informações. Ela pode ser considerada como o primeiro passo de toda a pesquisa científica (LAKATOS; MARCONI, 1992).

Na pesquisa bibliográfica foram consultadas diversas literaturas referentes ao assunto em estudo, livros e artigos acadêmicos e científicos publicados na internet possibilitando que este trabalho tomasse forma para ser fundamentado.

Este trabalho transcorreu no período entre os anos de 2018 e 2022, contando com o suporte recebido do Laboratório de Planejamento Ambiental (LABPLAM) da Embrapa Clima Temperado, na disponibilização dos *softwares* licenciados.

Foram empregados os seguintes procedimentos metodológicos (Figura 29):

- A) Pesquisa Bibliográfica;
- B) Obtenção dos planos de informações secundários e criação de um banco de dados geográficos;
- C) Geração do modelo de declividade e elaboração do plano de informações de profundidade do lençol freático e sua restrição ao uso de biossólido;
- D) Determinação das Áreas de Preservação Permanente e sua restrição ao uso de biossólido;
- E) Determinação das restrições em Sistema Viário, Unidades de Conservação e área urbanizada;
- F) Integração dos planos de informações quanto as restrições locais previstas na resolução CONAMA 375/06;
- G) Classificação e integração dos planos de informações quanto as aptidões

e capacidades de uso do solo;

H) Identificação de uso cobertura da terra nas áreas permitidas em diferentes classes de aptidão;

I) Indicação de áreas prioritárias, com uso agrícola em solos com aptidão em áreas legalmente permitidas.

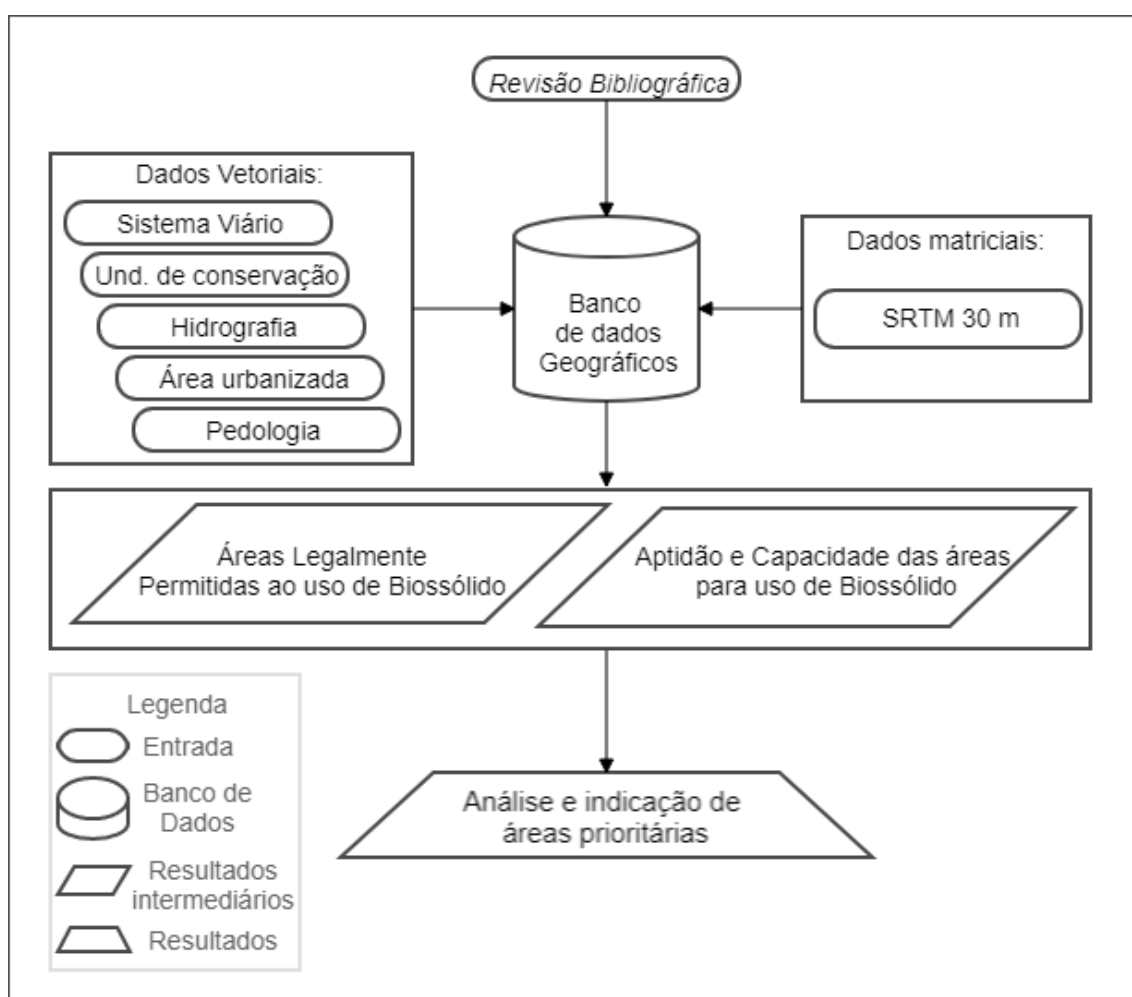


Figura 29. Fluxograma dos procedimentos metodológicos e seus resultados.

4.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados e os procedimentos metodológicos para as seguintes avaliações: Identificação de “Restrições Locacionais”, “Aptidão das terras para a disposição de lodo de esgoto”, “Integração dos planos de informações quanto às aptidões e capacidades de uso do solo”, “Identificação de uso cobertura da terra nas áreas

permitidas em diferentes classes de aptidão” e “Indicação de áreas prioritárias, com uso agrícola e silvícola em solos com aptidão em áreas legalmente permitidas”.

4.1.1 Restrições Locacionais

4.1.1.1 Obtenção dos planos de informações secundários e criação de um banco de dados geográficos

Para este estudo foi organizado um banco de dados geográficos com planos de informações secundárias como o modelo digital de elevação (MDE) da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 30 m, presente no acervo matricial da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço – NASA (2015), assim como os Pls vetoriais sistema viário e hidrografia disponíveis em versão digital em Hasenack e Weber (2010) e SEMA (2018). Também se utilizaram dados pedológicos em escala 1:250.000, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2021b), de uso e cobertura da terra em escala 1:100.000 (IBGE, 2016; MAPBIOMAS, 2019) e Unidades de Conservação do Rio Grande do Sul (SEMA, 2018). Os procedimentos foram realizados em ambiente SIG ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2014) e *software* de processamento digital de imagens ENVI 5.2 (*Exelis Visual Information Solutions*, Boulder, Colorado).

4.1.1.2 Geração do modelo clinográfico e elaboração do plano de informações de profundidade do lençol freático

4.1.1.2.1 Confecção do Modelo clinográfico

Primeiramente, foram eliminados os possíveis *sinks* dos dados altimétricos SRTM (NASA, 2015), que consiste no preenchimento de pequenas depressões que possam ser originadas, indevidamente, no processo de montagem do MDE.

Em ambiente SIG ArcMap 10.2.2 (ESRI, 2014), a partir do mosaico dos dados SRTM foi gerado o mapa clinográfico por meio da relação entre a distância vertical e a distância horizontal entre cada dois pixels (tangente = cateto oposto/cateto adjacente). As informações de declividade resultantes foram reclassificadas em quatro intervalos de restrição (>10%, >15%, >18%, >25%), de acordo com o item VII do artigo 15 e seção V da resolução CONAMA 375/06 (CONAMA, 2006), que prevê quatro tipos de aplicações de biossólido no solo de acordo com o intervalo de declividade.

4.1.1.2.2 *Estimativa de Profundidade do lençol freático*

A profundidade de lençol freático está presente como critério restritivo da resolução CONAMA 375/06 (CONAMA, 2006), pois é uma informação importante na determinação da vulnerabilidade de corpos de água subterrâneos à contaminação. Seu conhecimento preciso requer o uso de sondagens a campo (MINGOTI, 2012; MINGOTI, 2016); contudo, ela pode ser estimada por meio da utilização do modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) (RENNÓ et al., 2008), o qual obtém do Modelo Digital de Elevação (MDE) a distância vertical de cada pixel em relação à drenagem mais próxima, ou seja, indica a altura de uma determinada localização geográfica, não em relação ao nível do mar, mas em relação ao ponto da rede de drenagem mais próxima. Essas amplitudes altimétricas possuem correlação com a profundidade do lençol freático e com a topografia do terreno (NOBRE et al., 2011).

Nesse sentido, para o mapeamento de profundidade estimada do nível do lençol freático foi utilizado o modelo proposto por Rennó et al. (2008) e Nobre et al (2011). Este procedimento foi realizado por meio da extensão *Hand_grid* (RENNÓ et al., 2008) do software ENVI 5.2 (*Exelis Visual Information Solutions*, Boulder, Colorado). Inicialmente foi realizada a correção do MDE SRTM (NASA, 2015), que conta com o ajuste de possíveis inconsistências nos dados altimétrico originais mosaicados. Em seguida foram gerados os planos matriciais de direção de fluxo (Figura 30a), fluxo acumulado (Figura 30b) e Distância vertical em

relação a drenagem mais próxima a substituição dos pixels da rede de drenagem para o valor zero e também a alteração do valor de cada célula para a amplitude em relação à drenagem mais próxima. (Figura 30d)

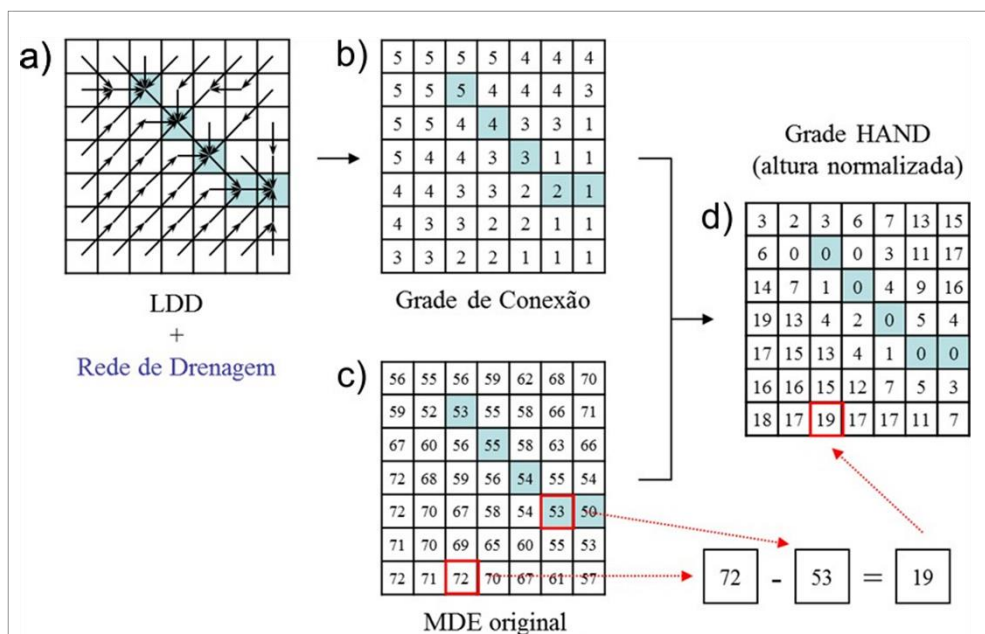


Figura 30. a) Direção de fluxo; b) Fluxo acumulado/drenagem; c). MDE original com remoção de possíveis anomalias; d). Amplitude altimétrica em relação à drenagem mais próxima.

Fonte: Rennó et al. (2008).

O modelo foi categorizado em 3 níveis de acordo com as indicações de Nobre et al (2011). A primeira classe foi definida pelo intervalo de altura de 0 a 5 m, a segunda entre 5 e 15 m e a terceira acima de 15 m, representando as profundidades de lençol freático superficial, rasa e profunda sucessivamente (figura 31).

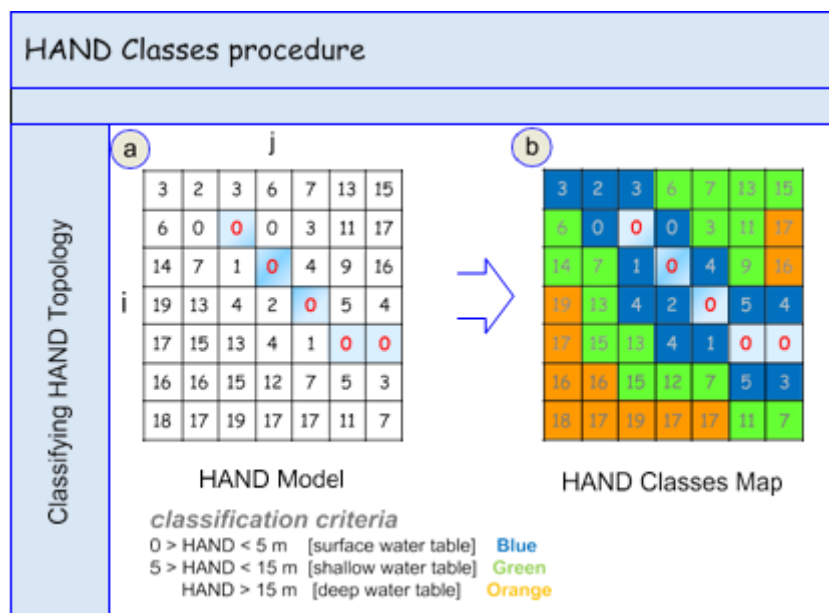


Figura 31. a) Classificação da amplitude altimétrica em relação à drenagem mais próxima quanto a profundidade do lençol freático; b) Representação das classes em composição RGB.
Fonte: Nobre et al. (2011).

Considerando que a resolução CONAMA 375/06 (CONAMA, 2006) estabelece como áreas restritas as proximidades com o lençol freático, de modo a garantir a segurança hídrica sobre possíveis erros e equívocos do modelo não aferido, dentre os níveis indicados por Nobre et al (2011), a classe de profundidade superficial foi considerada como parâmetro de restrição ao uso de biossólido (Figura 31).

Para isso, essas classes foram exportadas e rotuladas como área restrita ao uso de biossólido pela proximidade do lençol freático. Como resultado, essas classes possibilitam indicar as áreas com o uso restrito ou permitido pela legislação.

O mapeamento de proximidade do lençol freático foi submetido, no *software* estatístico SPSS v.17 (SPSS, 2008), ao processo de validação por correlação aos pontos de localização da profundidade de poços tubulares presentes na base de dados geográficos do sistema de informações de águas subterrâneas SIAGAS/CPRM (CPRM, 2022). A figura 32 apresenta a sobreposição de 200 pontos de poços tubulares amostrais de validação, sorteados aleatoriamente, na área de estudo.

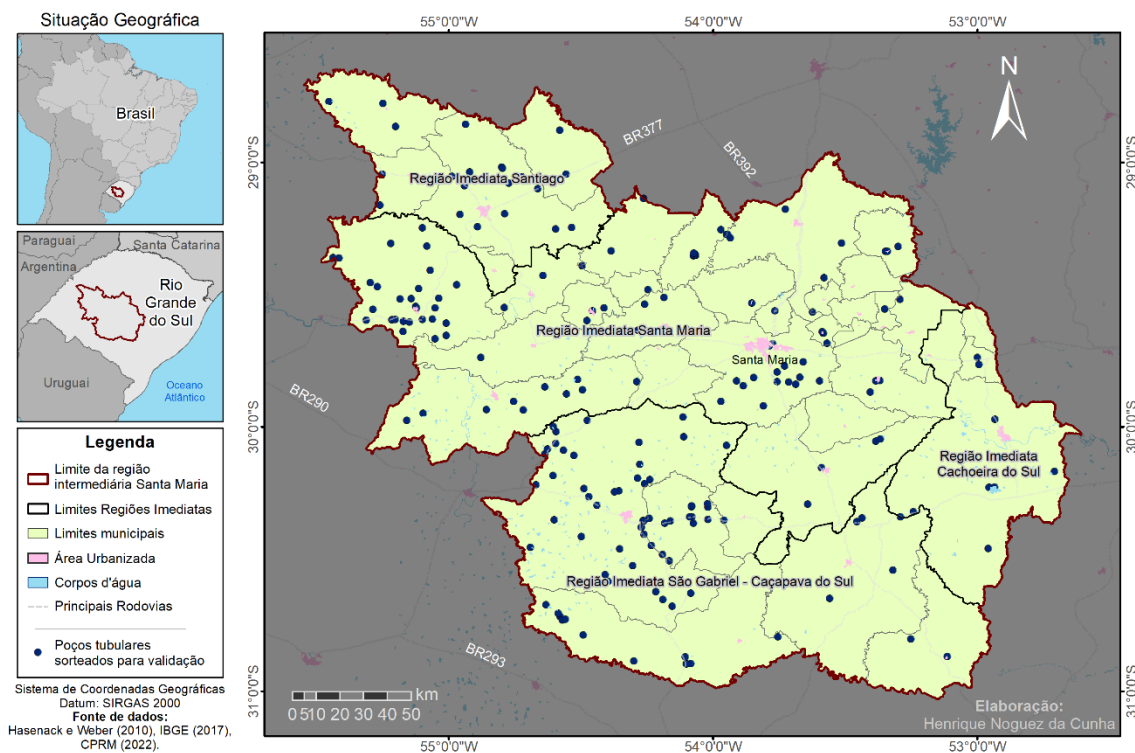


Figura 32. Distribuição geográfica dos poços tubulares utilizados no processo de validação do modelo de profundidade do lençol freático. Elaborado pelo autor.

Inicialmente, cinco pontos, com distância de 30m e variação de profundidade superior a 100m, foram determinados como outlier e desconsiderados da análise, que antes contava com 200 pontos. Em seguida, os dados de profundidade modelada e profundidade dos poços tubulares foram submetidos ao teste de normalidade (p) de Shapiro e Wilk (1965) e apresentaram distribuição não-normal, valor de p menor que 0,05. Assim, ambas tabelas com informações de profundidade foram submetidas aos procedimentos de normalização pelos métodos de *Zscore*, Logaritmo, *Box cox* e Desvio Padrão indicados no estudo de Aboubakar et al. (2021). Como resultado, em todos os métodos de normalização testados, o valor de p se manteve inferior a 0,05 e pode ser indicativo de variações presentes no quantitativo de dados coletados sobre poços tubulares ao longo de décadas e também a grande variação representada ao tamanho da área. Nesse sentido, a evitar a diminuição da amostra e perder informações importantes no processo, foi procedido o teste de correlação de Spearman.

A correlação de Spearman é uma medida de associação utilizada em estatística para avaliar a relação entre duas variáveis. Ela é semelhante à correlação de Pearson, mas é mais adequada para dados que não seguem necessariamente uma distribuição normal. Enquanto a correlação de Pearson mede a relação linear entre duas variáveis, a correlação de Spearman mede a relação monotônica entre elas. Isso significa que, em vez de se concentrar na força da relação linear entre as variáveis, a correlação de Spearman se concentra na presença de qualquer tipo de relação monotônica entre elas, seja crescente ou decrescente (DU; ZHANG, 2021).

4.1.1.3 Determinação das Áreas de Preservação Permanente

A partir dos planos de informações de hidrografia (SEMA, 2018) foi possível avaliar as Áreas de Preservação Permanente (APP) de rios conforme o Novo Código Florestal brasileiro (BRASIL Lei nº 12.651/2012, de 25 de maio de 2012), que define que a mata ciliar tem a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a biodiversidade bem como proteger o solo.

O Plano de informações hidrografia foi importado no *software Google Earth Pro™* (GOOGLE, 2021), onde foram medidos por três amostras a largura do curso d'água em cada segmento da rede de drenagem (figura 33). A informação de largura foi incorporada na tabela de atributos do plano de informações em ambiente SIG ArcMap 10.2.2 (Esri, 2014).

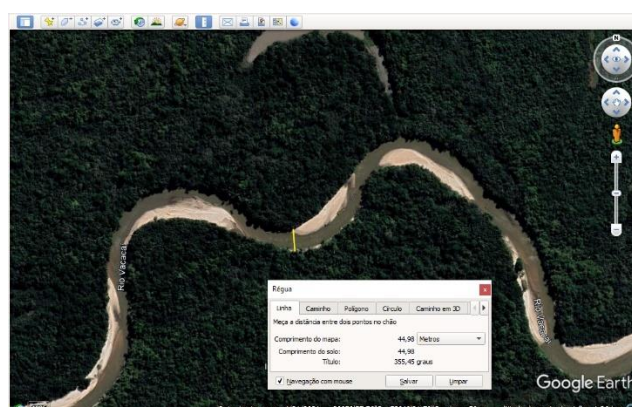


Figura 33. Processo de identificação da largura dos trechos da rede de drenagem no *software Google Earth Pro™*.
Fonte: Google (2021)

Foi gerada uma zona de proximidade (*buffer*) em cada seguimento da rede de drenagem de acordo com a largura do curso hídrico. A distância da zona foi realizada, em regra geral sem considerar o número de módulos fiscais das propriedades, de acordo com as normas presentes no Novo Código Florestal brasileiro (BRASIL, 2012).

Os vértices iniciais da rede de drenagem foram considerados como nascentes/olhos d'água e foi criado um *buffer* com raio de 50 m de acordo com o Novo Código Florestal brasileiro (BRASIL, 2012). Ainda, foram delimitadas as APPs de encostas com base no modelo clinográfico classificado para áreas com declividade superior a 100% (45°). O plano de informações de APPs hídrica e de encosta foram unidos e rotulado como área restrita ao uso de biossólido por APP.

4.1.1.4 Determinação das restrições em Sistema Viário, Unidades de Conservação e área urbanizada

O processo foi realizado pela materialização de uma zona de proximidade de 15 m nas estradas presentes no plano de informações sistema viário (HASENACK E WEBER, 2010) e conferido de forma visual em tela, na interface *GoogleEarth*, quanto a atualização das vias nos dias atuais. Essa zona é estabelecida pela resolução CONAMA 375/06 (CONAMA, 2006) como distância mínima para o uso de biossólido em proximidade com as vias. Esse plano de informação foi exportado e rotulado como restrição viária.

As áreas do plano de informações de uso e cobertura da terra (IBGE, 2016) classificadas como urbanizadas também foram submetidas ao processo de delineamento de uma zona de proximidade, com 100m, definida pela resolução CONAMA 375/06 (CONAMA, 2006) no item V do artigo 15 da seção V. Essa área foi exportada e rotulada como restrição urbana.

O plano de informações com feições poligonais das Unidades de Conservação (SEMA, 2018) foi submetido ao processo de exclusão do atributo Áreas de Proteção Ambiental (APA). Essas áreas não são consideradas restritas

ao uso de biossólido (CONAMA, 2006). As demais áreas foram rotuladas como restrição em unidade de conservação.

4.1.1.5 Integração dos planos de informações quanto às restrições locais previstas na lei

Todos os planos de informações de restrições locais para o uso de biossólido foram associados por união gerando um arquivo com restrições totais em conformidade com o CONAMA (2006). Para fins de avaliação de áreas permitidas ao uso de biossólido se procedeu a inversão do plano de informações de restrições considerando as áreas não restritas ao uso de biossólido (figura 34).

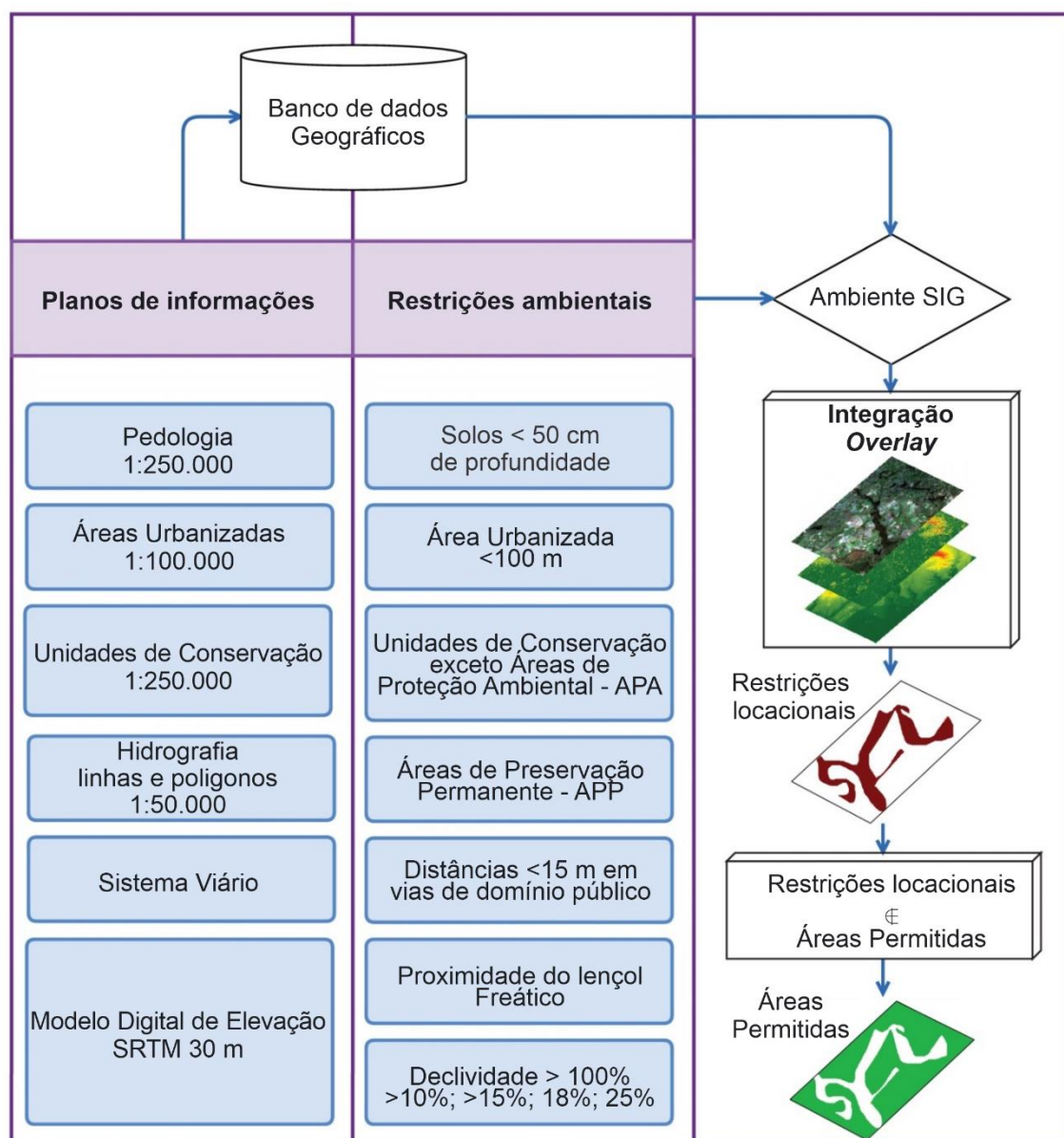


Figura 34. Fluxograma metodológico da identificação de áreas restritas e permitidas na resolução CONAMA 375/2006 (2006).
Fonte: Adaptado de CONAMA (2006).

A importância de estar em conformidade com as normas ambientais, presentes na figura 34, é garantir que as atividades humanas não causem danos ao meio ambiente e à saúde humana. No entanto, também se faz necessária a avaliação da aptidão das terras, pois indica a capacidade de um solo frente ao uso de biossólidos.

4.1.2 Aptidão das terras para a disposição de lodo de esgoto

Com a identificação das áreas legalmente permitidas ao uso de biofóssido, sequencialmente se procedeu a classificação e integração dos planos de informações quanto às aptidões e capacidades de uso do solo. Essa avaliação considerou os parâmetros propostos por Souza et al (1994), que avaliou a “Aptidão das terras do Estado do Paraná para a disposição final de lodo de esgoto”.

Com base nessa metodologia, a caracterização da aptidão do solo para fins de uso de biofóssidos foi determinada, no plano de informações de solos para o Estado do Rio Grande do Sul, em escala 1:250.000 (IBGE, 2021b), de acordo com os parâmetros de profundidade, textura, erosão, relevo, drenagem e declividade (quadro 2). As informações inexistentes no plano de informações pedológicas foram obtidas pelas informações contidas no MDE SRTM.

Quadro 2. Aptidão do solo quanto aos parâmetros descritos por Souza et al. (1994).

FATOR	CRITÉRIO	GRAU DE LIMITAÇÃO
Suscetibilidade à erosão	Solos em relevo plano ou latossolos argilosos em relevo ondulado.	0 - Nulo
	Outros solos em relevo suave ondulado.	1 - Ligeiro
	Solos textura média ou siltosa em relevo suave ondulado. Solos com textura argilosa em relevo ondulado.	2 - Moderado
	Solos de textura média ou arenosa e/ou caráter abrupto em relevo ondulado. Solos de textura muito argilosa em relevo forte ondulado.	3 - Forte
	Solos de textura média em relevo forte ondulado. Relevo montanhoso ou escarpado independente da classe textural.	4 - Muito forte
Drenagem	Solos acentuadamente bem drenados.	0 - Nulo
	Solos fortemente drenados.	1 - Ligeiro
	Solos moderadamente drenados.	2 - Moderado
	Solos imperfeitamente drenados.	3 - Forte
	Solos mal a muito mal drenados.	4 - Muito forte
Relevo	Relevo plano, declividade de 0 a 3%.	0 - Nulo
	Relevo suave ondulado, declividade de 3 a 8%.	1 - Ligeiro
	Relevo ondulado, declividade de 8 a 20%.	2 - Moderado
	Relevo forte ondulado, declividade de 20 a 45%.	3 - Forte

	Relevo montanhoso ou escarpado, declividade superior a 45%.	4 - Muito forte
Pedregosidade	Solos sem fase pedregosa.	0 - Nulo
	Solos com citação de pedregosidade.	4 - Muito forte
Hidromorfismo	Solos sem indicação de hidromorfismo.	0 - Nulo
	Solos com caráter gleico.	2 - Moderado
	Solos hidromórficos.	4 - Muito forte
Fertilidade	Solos distróficos e álicos com horizonte A moderado ou fraco.	0 - Nulo
	Solos com horizonte A proeminente e eutróficos com A moderado.	1 - Ligeiro
	Solos com horizonte A chernozêmico ou antrópico.	2 - Moderado
	Solos com horizonte A húmico.	3 - Forte
	Solos com horizonte turfoso ou solo orgânico.	4 - Muito forte
Profundidade	Latossolos, cambissolos ou argissolos profundos.	0 - Nulo
	Cambissolos ou argissolos pouco profundos.	2 - Moderado
	Neossolos litólicos ou outras unidades de solos rasos.	4 - Muito forte
Textura superficial	Textura argilosa, de 35 a 60% de argila.	0 - Nulo
	Textura muito argilosa, superior a 60% argila.	1 - Ligeiro
	Textura média, de 15 a 35% argila.	2 - Moderado
	Textura siltosa, inferior a 35% de argila e inferior a 15% de areia.	3 - Forte
	Textura arenosa, inferior a 15% de argila.	4 - Muito forte

Fonte: Adaptado de Souza et al. (1994).

A classificação dos graus de limitação foi realizada, seguindo as indicações de Souza et al. (1994) (quadro 2), por agrupamentos de feições de acordo com as informações sobre relevo e declividade a partir do MDE SRTM (NASA, 2015) e características de profundidade, textura, erosão e drenagem presentes na tabela de atributo do plano de informações de solos para o Estado do Rio Grande do Sul, em escala 1:250.000 (IBGE, 2021b).

As classes de aptidão foram avaliadas de acordo com o grau de limitação com base no impedimento mais expressivo ao uso de biossólido. As limitações indicadas por Souza et al. (1994) são relacionadas, principalmente à erosão, à drenagem e ao impedimento a mecanização do solo (tabela 3). Nesse sentido, os parâmetros classificados quanto ao grau de limitação à aplicação de

biossólido foram relacionados a fim de gerar um plano de informações de classes de aptidão. Os procedimentos metodológicos foram realizados em ambiente SIG ArcMAP 10.2.2 (ESRI, 2014).

Na tabela 3 estão listadas as classes de aptidão em relação ao nível de sobreposição dos graus de limitação dos fatores (SOUZA et al. 1994).

Tabela 3. Aptidão dos fatores naturais limitantes.

Fatores de limitação	Graus de limitação	Classe de Aptidão				
		1	2	3	4	5
Profundidade	0-nulo	X	X	X	X	X
	2-moderado			X	X	X
	4- muito forte					X
Textura superficial	0-nulo	X	X	X	X	X
	1-ligeiro		X	X	X	X
	2-moderado			X	X	X
	3-forte				X	X
	4-muito forte					X
Suscetibilidade à erosão	0-nulo	X	X	X	X	X
	1-ligeiro		X	X	X	X
	2-moderado			X	X	X
	3-forte				X	X
	4-muito forte					X
Drenagem	0 nulo	X	X	X	X	X
	1-ligeiro		X	X	X	X
	2-moderado			X	X	X
	3-forte					X
	4-muito forte					X
Relevo	0-nulo	X	X	X	X	X
	1-ligeiro	X	X	X	X	X
	2-moderado			X	X	X
	3-forte				X	X
	4-muito forte				X	X
Pedregosidade	0-nulo	X	X	X	X	X
	4-forte					X
Hidromorfismo	0-nulo	X	X	X	X	X
	2-moderado			X	X	X
	4- muito forte					X
Classe		Apto	Apto	Apto	Com restrição	Inapto

Fonte: Adaptado de Andreoli et al. (2000).

Inicialmente, de acordo com Souza et al. (1994), foram criados e editados os campos da tabela de atributos do plano de informações pedológicas

atribuindo os graus de limitação quanto à profundidade, textura, drenagem, hidromorfismo e presença de pedregosidade no solo. Os níveis atribuídos foram representados por cinco graus de limitação: nulo, ligeiro, moderado, forte e muito forte. Sequencialmente, foi extraído do modelo digital de elevação (MDE) SRTM, o plano de informações de declividade, o mesmo foi reclassificado de acordo com as formas de relevo (DOS SANTOS, 2018). Com base nas informações de relevo, textura e unidade de solo, foi confeccionado o PI de Suscetibilidade à erosão de acordo com Souza et al. (1994). Esses produtos, relevo e suscetibilidade à erosão, foram reclassificados em cinco categorias de forma análoga ao processo anterior. Por meio de álgebra de mapas, os diferentes PIs gerados foram associados e interpretados quanto à capacidade pedológica mais restrita ao uso de bioossólido (Figura 35).

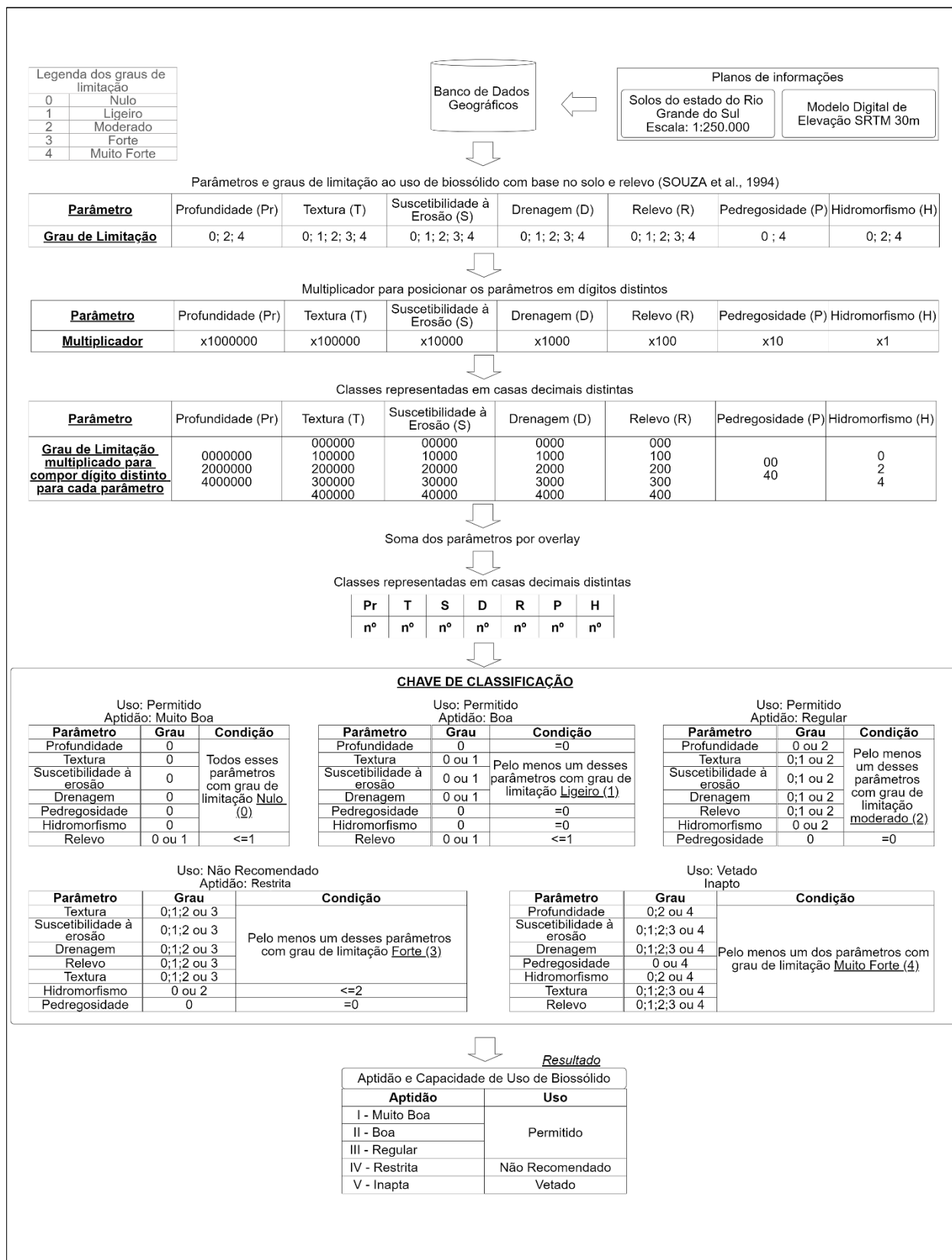


Figura 35. Fluxograma da confecção de informações de limitações pedológicas. Elaborada pelo autor

As chaves de classificação utilizadas para relacionar os elementos de análise propostos por Andreoli et al. (2000) foram estabelecidas para padronizar a linguagem utilizada e descrever os elementos presentes no resultado de cada análise. Essas chaves são importantes porque permitiram que os dados geográficos fossem organizados de forma lógica e consistente, o que facilitou a análise desses dados. O resultado dessa aplicação necessita da integração das áreas permitidas ao uso de bioossólido para indicar a aptidão das terras sobre áreas permitidas.

4.1.3 Integração dos planos de informações quanto às aptidões e capacidades de uso do solo

Os planos de informações de aptidão foram intersectados com os planos de informações sobre áreas permitidas ao uso de bioossólido. Dessa forma, foram eliminadas todas as áreas de aptidão do solo sobre áreas restritas sob parâmetros presentes na resolução CONAMA 375/2006.

O arquivo resultante desse processo conta com a presença de áreas aptas, aptas com restrição e inaptas sobre áreas legalmente permitidas ao uso de bioossólido. Esse resultado torna possível indicar áreas ambientalmente sensíveis ao uso de bioossólidos que, embora não possuam restrições nas normas brasileiras, possuem características pedológicas intoleráveis ao uso.

4.1.4 Identificação de uso cobertura da terra nas áreas permitidas em diferentes classes de aptidão

A identificação e avaliação dos usos e cobertura da terra presentes na Região intermediária Santa Maria foi realizada a partir da intersecção das informações de uso e cobertura da terra com referência no ano de 2019 (MAPBIOMAS, 2019). O plano de informações de uso e cobertura foi intersectado, em ambiente SIG ArcMAP 10.2.2 (ESRI, 2014), ao plano de informações de aptidão sobre áreas permitidas.

Esse processo tornou possível quantificar e agrupar as classes de uso e cobertura da terra para cada tipo de aptidão ao uso de bio-sólido presente em áreas legalmente permitidas. Os dados foram exportados e processados em planilha eletrônica para a representação tabular e gráfica. Quando avaliado de forma integrada com outros elementos, esse resultado possibilita a indicação de áreas prioritárias.

4.1.5 Indicação de áreas prioritárias, com uso agrícola e silvícola em solos com aptidão em áreas legalmente permitidas.

A identificação de áreas agrícolas e silvícolas sobre as diferentes aptidões do solo em áreas legalmente permitidas ao uso de bio-sólido possibilita diagnosticar e indicar áreas prioritárias para o processo de reciclagem e aproveitamento dos diferentes insumos presentes no bio-sólido. A presença da monocultura de *comodities* e reflorestamentos comerciais indicam maior perda de nutrientes no solo (BITTENCOURT et al., 2017).

Esse processo foi realizado pela identificação, na tabela de atributos do arquivo intersectado, e mapeamento das áreas de uso e cobertura agrícola e silvícola (MAPBIOMAS, 2019) nas diferentes aptidões em área legalmente permitida. Assim, foi possível quantificar e agrupar as classes para cada tipo de aptidão ao uso de bio-sólido presente em áreas legalmente permitidas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 LENÇOL FREÁTICO

A confecção do Plano de Informações sobre a estimativa de profundidade do lençol freático resultou em uma distribuição de nível profundo localizado nas regiões da serra e bordas dos planaltos. O nível superficial de profundidade foi estimado nas áreas de planícies fluviais localizadas principalmente nas áreas de depressões e também ao longo da rede hidrográfica. A categoria de nível raso resulta da transição entre os demais níveis (figura 36).

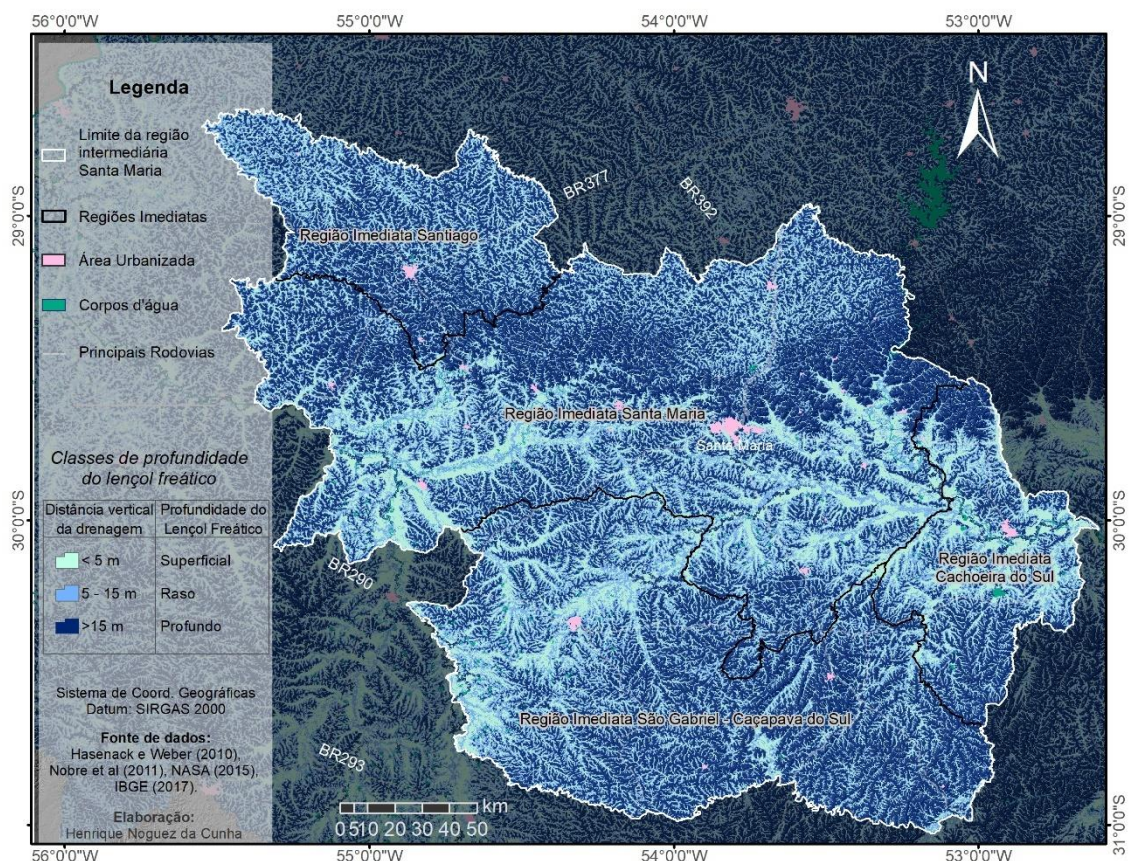


Figura 36. Profundidade estimada do lençol freático na Região Intermediária Santa Maria-RS.

A profundidade superficial, utilizada como parâmetro de restrições indicadas pela resolução CONAMA 375/2006 (CONAMA, 2006) é distribuída principalmente sobre a porção sul da região imediata Santa Maria, noroeste da

região imediata São Gabriel-Caçapava do Sul e predominante na região imediata Cachoeira do Sul. A validação do modelo de profundidade do lençol freático a partir da profundidade dos poços tubulares resultou em uma correlação forte e positiva no coeficiente de *Spearman* ($r = 0.806$) (figura 37).

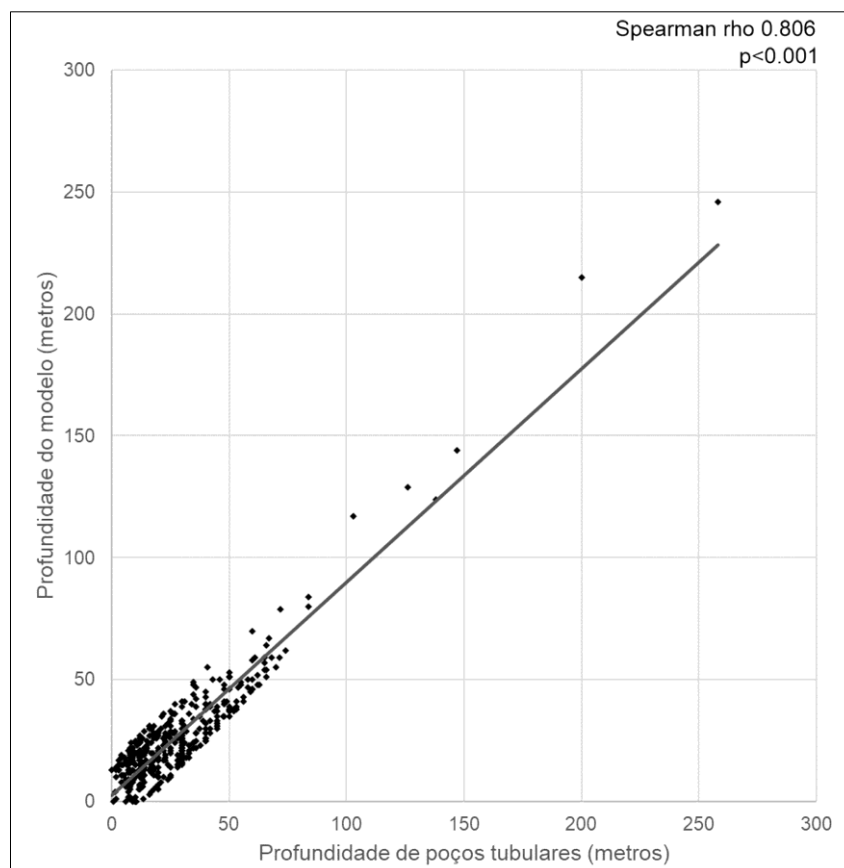


Figura 37. Gráfico de correlação de *Spearman* entre profundidade amostral e modelada.

É possível observar no gráfico da figura 37 que as duas variáveis apresentaram uma relação forte, o que significa que a mudança nos valores de uma variável geralmente leva a uma mudança proporcional nos valores da outra variável. Nesse caso, indicando que os valores entre o modelo e os poços tubulares são diretamente proporcionais por resultarem em um coeficiente positivo.

5.2 RESTRIÇÕES LOCACIONAIS

O resultado da interpretação, com base em CONAMA (2006), dos planos de informações de profundidade dos solos, proximidade do sistema viário e área urbanizada, do lençol freático, unidades de conservação com exceção de áreas de proteção permanente e áreas de preservação permanente são representados na figura 38.

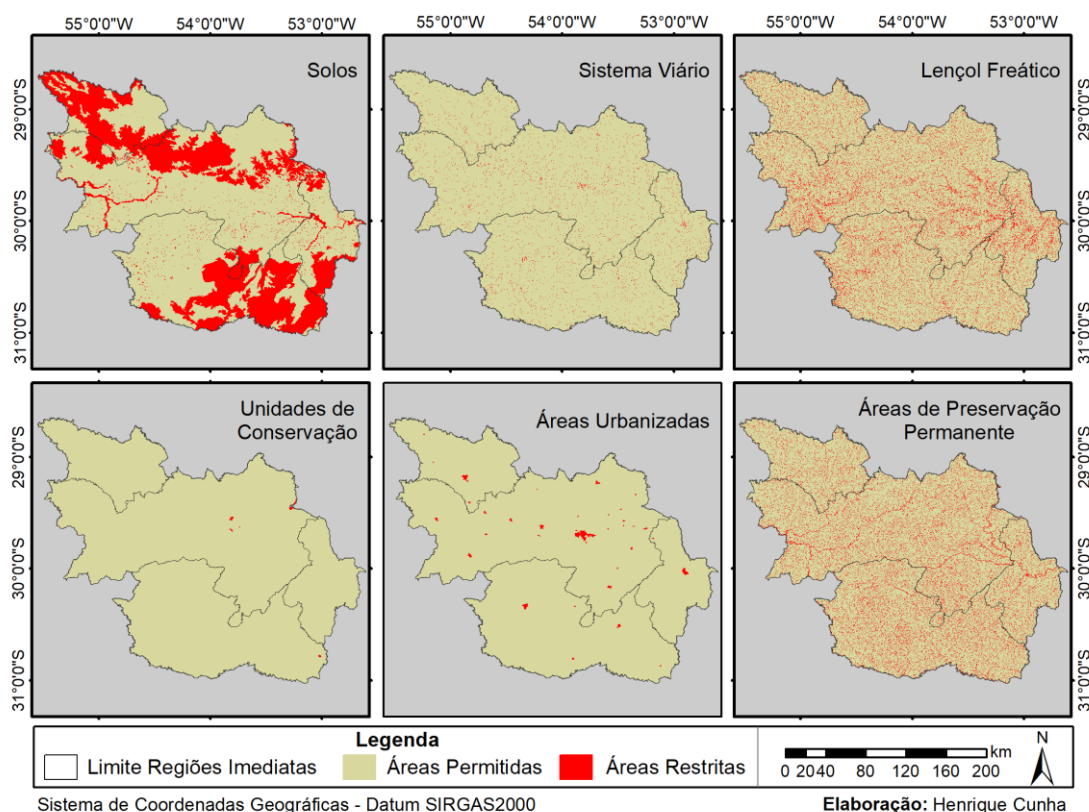


Figura 38. Restrições e permissões locais para o uso de biosólido na Região Intermediária Santa Maria-RS.

As restrições presentes na figura 38 são áreas não permitidas ao uso de biosólido. De acordo com Andreoli et al (2014) e Von Sperling (2014), essas áreas são assim classificadas por representar riscos em caso de possível contaminação gerada pelo uso de lodo de esgoto.

Em geral, as restrições locais se apresentam sob dois grupos característicos: Áreas predominantemente restritas pelas classes de restrições de solos, sistema viário, lençol freático e áreas de preservação permanente e as

áreas com restrições pontuais em raras unidades de conservação e áreas urbanizadas (figura 38).

A figura 39 apresenta a distribuição dessas áreas restritas normalizada por cada uma das quatro regiões imediatas e pela região intermediária Santa Maria. Ressalta-se que a região intermediária Santa Maria é composta e dividida pelas regiões imediatas Santa Maria (46,6%), São Gabriel – Caçapava do Sul (31%), Santiago (12,2%) e Cachoeira do Sul (10,1%) (tabela 1).

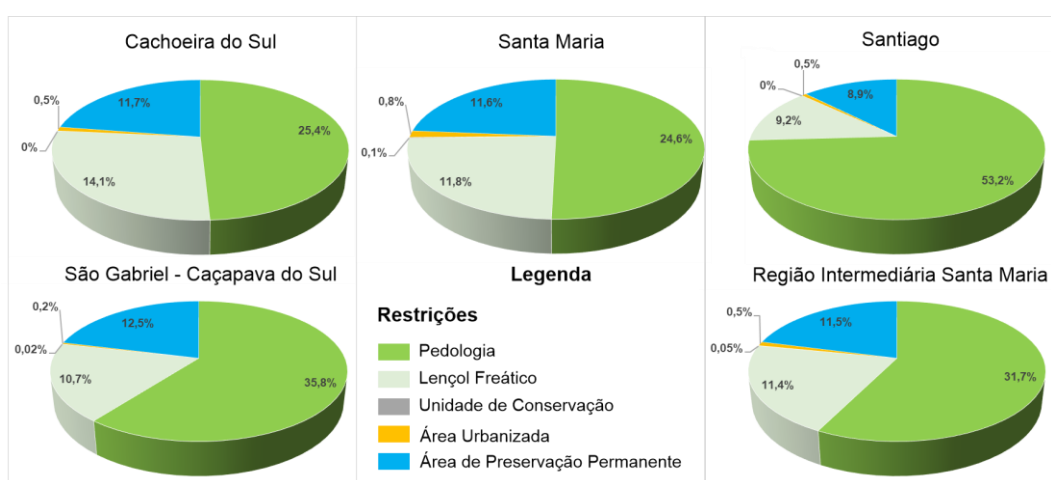


Figura 39. Restrições locais para o uso de biossólido normalizadas por regiões imediatas e região intermediária.

Dentre os planos de informações de restrições locais, discrepante nas figuras 38 e 39, a restrição de profundidade do solo se mostra predominante em todas as regiões imediatas perfazendo mais da metade (53,2%) da região imediata de Santiago, 35,8% da região de São Gabriel e 25,4 e 24,6% das regiões imediatas de Cachoeira do Sul e Santa Maria, respectivamente. A região intermediária de Santa Maria apresenta 31,7% de sua área com uso de biossólido não permitido por essa mesma classe.

As restrições associadas à profundidade do lençol freático mostraram resultados quantitativos médios próximos à 10%. A região intermediária Santa Maria possui 11,4% de sua área ocupada por lençol freático superficial. Essa restrição pode ser relativamente observada na região imediata Santa Maria, com 11,8% de sua área. As regiões imediatas de Santiago e São Gabriel – Caçapava do Sul possuem 9,2% e 10,7% de suas áreas com restrição ao uso,

respectivamente. Por outro lado, a região imediata Cachoeira do Sul possui o maior percentual de área restrita por lençol freático superficial, com 14,1%.

As restrições presentes nas áreas de preservação permanente representam 11,5% da região intermediária Santa Maria. Essas restrições são distribuídas de forma decrescente pelas regiões imediatas São Gabriel – Caçapava do Sul (12,5%), Cachoeira do Sul (11,7%), Santa Maria (11,6%) e Santiago (8,9%).

As demais classes representadas pelas unidades de conservação e áreas urbanizadas são pouco representativas e, juntas, ocupam menos do que 1% de cada região (figura 39).

Os resultados das classes de declividade são apresentados de forma separada das demais classes restritivas, pois foi o último plano de informações que foi submetido ao processo metodológico de *overlay*. Motivo justificado pela definição da resolução CONAMA 375/2006 (CONAMA, 2006) que define diferentes critérios de declividades e restrições para cada tipo de aplicação de biossólido: superficial sem incorporação; superficial com incorporação; subsuperficial e covas (figura 40).

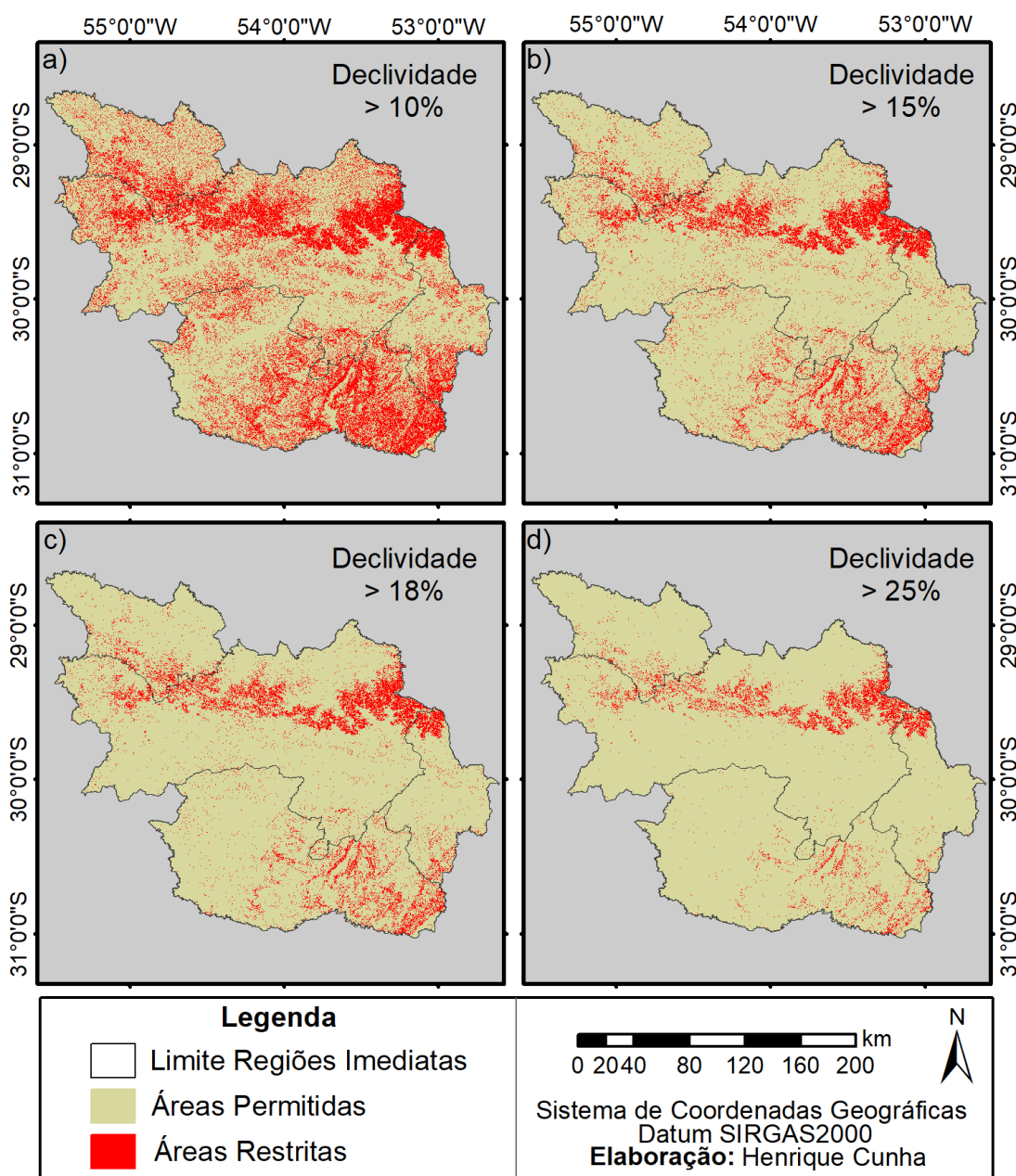


Figura 40. Áreas permitidas e não permitidas pela clinografia: a) aplicação superficial sem incorporação; b) aplicação superficial com incorporação; c) aplicação subsuperficial e em sulcos, e aplicação superficial sem incorporação em produção florestal; d) aplicação em covas.

O uso restrito, assim como resultante nos estudos Souza et al. (2008), é apresentado com maiores quantitativos de áreas para a aplicação superficial sem incorporação (figura 40a). Esse fato ocorre porque esse tipo de aplicação pode permitir a drenagem superficial desse biossólido e dificultar o controle deste nas áreas aplicadas (CONAMA, 2006).

A região intermediária Santa Maria apresenta 27% de sua área sem permissão ao uso de biofósforo se a aplicação for superficial e sem incorporação. As regiões imediatas apresentam resultados relativamente semelhantes, com valores que variam de 23% (Santiago) à 31% (São Gabriel – Caçapava do Sul) (Figura 41).

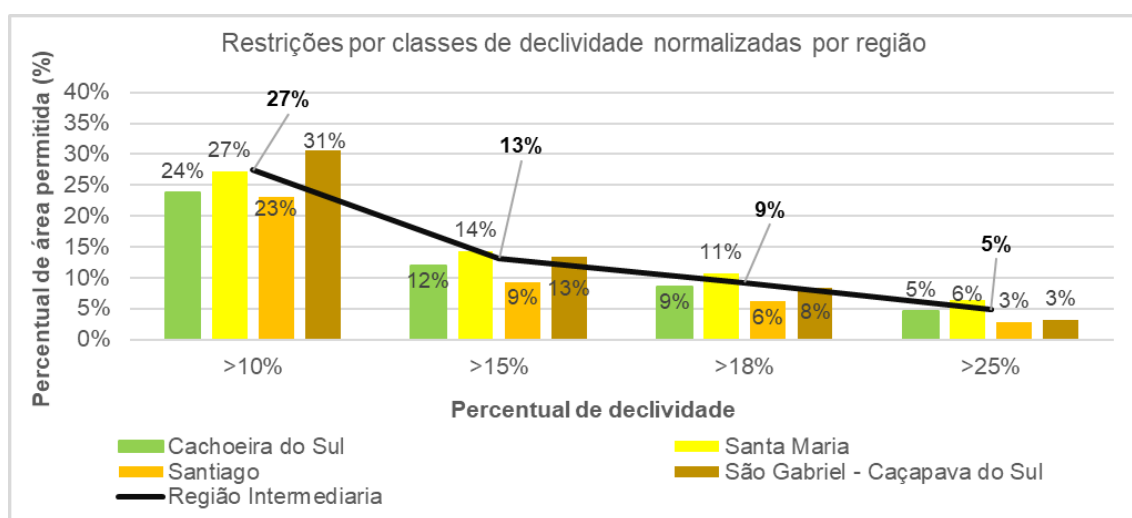


Figura 41. Quantitativos de áreas não permitidas ao uso de biofósforo por restrições clinográficas.

As restrições para o uso de biofósforo por aplicação superficial com incorporação é uma forma de aplicação que também possibilita a perda desse material por erosão superficial. Contudo, é uma forma de aplicação mais segura do que a aplicação sem incorporação no solo (CONAMA, 2006). Assim, essa classe apresenta o segundo quantitativo mais restritivo presente nas regiões. A região intermediária Santa Maria apresenta 13% de sua área com restrição ao uso de biofósforo por esse tipo de aplicação. As regiões imediatas apresentam valores que variam de 9% (Santiago) até 14% (Santa Maria) de suas áreas com tal restrição (figuras 40b e 41).

O terceiro nível de restrições clinográficas se refere a forma de aplicação subsuperficial e em sulcos ou ainda, quando em produção florestal, superficial sem incorporação. A região intermediária Santa Maria conta com 9% de sua área sem permissão para esse tipo de aplicação. Dentre as regiões imediatas, a região Santa Maria possui 11% de área restrita e a região Santiago, 6%. As

demais regiões possuem 9% (Cachoeira do Sul) e 8% (São Gabriel – Caçapava do Sul) (figura 40c e 41).

A forma de uso mais seguro é a partir da aplicação em covas (CONAMA, 2006). Para tal aplicação, apenas 5% da região intermediária Santa Maria possui restrição clinográfica e o percentual de cada região imediata mostrou-se próximo a esse valor (figura 40d e 41).

5.3 INTEGRAÇÃO DOS PLANOS DE INFORMAÇÕES QUANTO ÀS RESTRIÇÕES LOCACIONAIS PREVISTAS NA RESOLUÇÃO CONAMA 375/2006;

A identificação, quantificação e integração dos planos de informações de restrições clinográficas, para os quatro tipos de aplicação, com os planos de informações restritivas da profundidade dos solos e do lençol freático, proximidade do sistema viário e área urbanizada, unidades de conservação com exceção de áreas de proteção permanente e áreas de preservação permanente resultou em quatro produtos de restrições. Os resultados dessas restrições, ou áreas não permitidas de acordo com CONAMA (2006), são apresentados, nas figuras 42a, 42b, 42c e 42d, em forma inversa a tratar agora como áreas permitidas ao uso de biossólido de acordo com o tipo de aplicação.

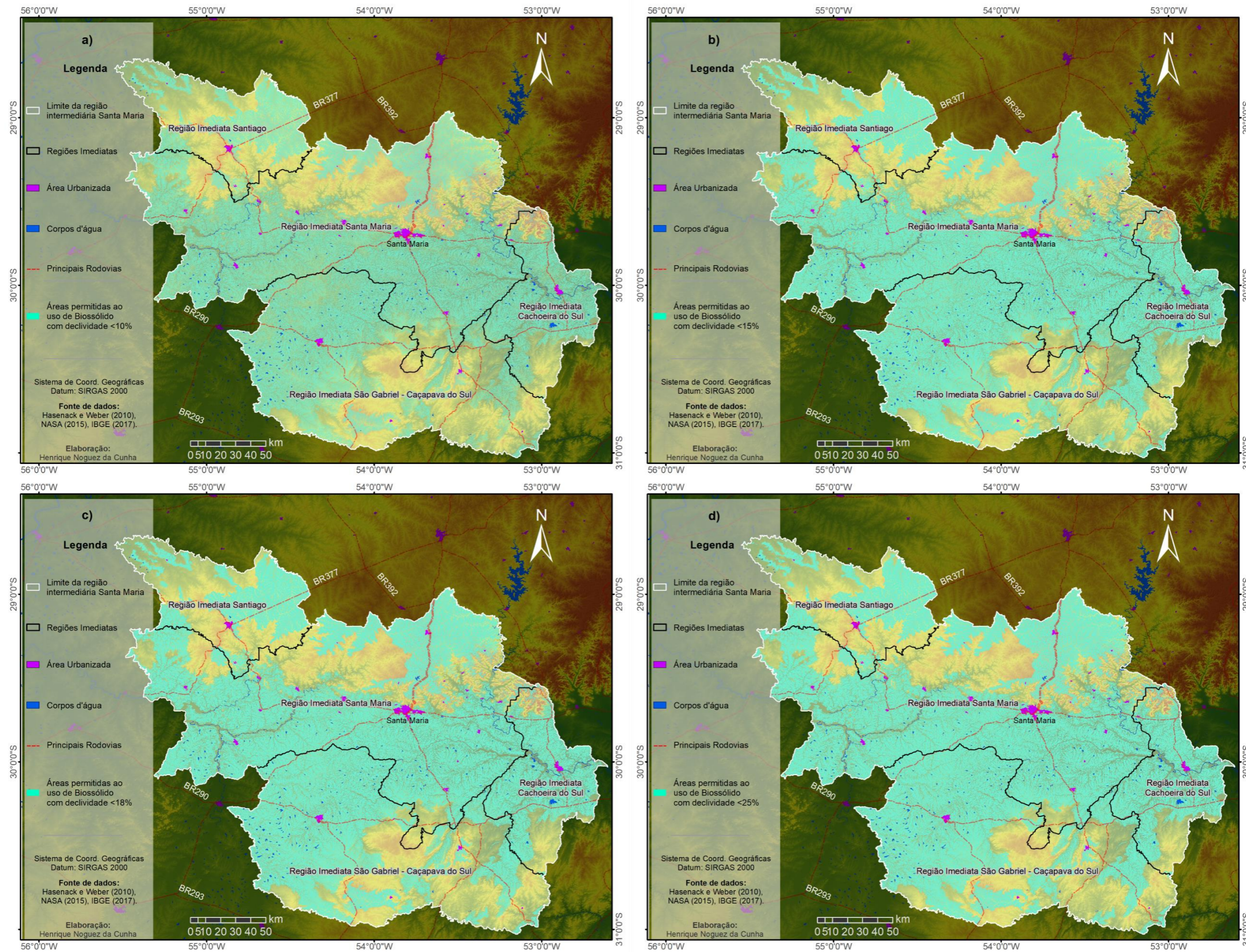


Figura 42. Áreas permitidas ao uso de biossólido para: a) aplicação superficial sem incorporação; b) aplicação superficial com incorporação; c) aplicação subsuperficial e em sulcos, e aplicação superficial sem incorporação em produção florestal; d) aplicação em covas.
Elaborada pelo autor

Na figura 42 são apresentadas as áreas permitidas ao uso de biofóssido para aplicação superficial sem incorporação (figura 42a), aplicação superficial com incorporação (figura 42b), aplicação subsuperficial e em sulcos, e aplicação superficial sem incorporação em produção florestal (figura 42c) e tão somente aplicação em covas (42d).

As regiões imediatas Cachoeira do Sul e Santa Maria apresentaram resultados semelhantes com variação de 2% entre os valores de áreas permitidas, para cada tipo de aplicação, normalizadas para cada região. A primeira classe (<10%) é representada por 46% da área destas regiões; as demais classes de áreas permitidas para a aplicação de biofóssido (<15%, <18% e <25%) perfazem valores entre 54 e 57% (figura 42a, 42b, 42c, 42d e 43).

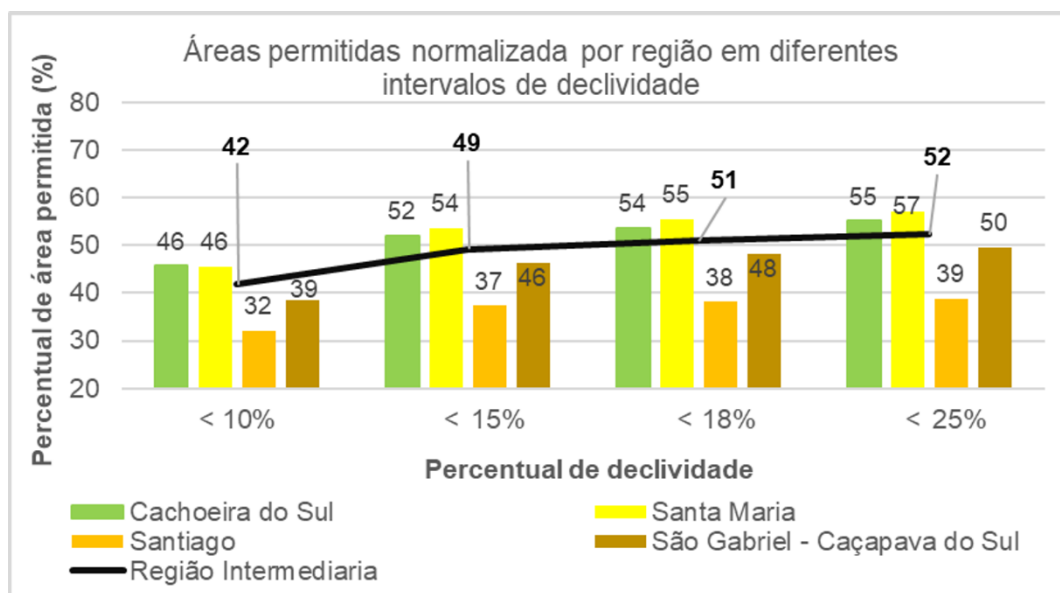


Figura 43. Áreas permitidas ao uso de biofóssido de acordo com o tipo de aplicação nas regiões imediatas e região intermediária Santa Maria.

Por outro lado, as regiões imediatas Santiago e São Gabriel – Caçapava do Sul representam valores próximos de uma menor presença de áreas permitidas ao uso de biofóssido comparadas com as duas primeiras citadas, com valores que variam de 32 a 50% da área. Isso torna possível a definição dessas áreas como mais restritivas dentre as regiões imediatas da região intermediária Santa Maria (figura 42a, 42b, 42c, 42d e 43).

No entanto, por contar com uma maior área de representação, a região imediata Santa Maria atua em tendência aos valores da região intermediária. Os

percentuais da região intermediária variam de 42 a 52% com áreas permitidas ao uso de bioossólido (figura 43).

5.4 CLASSIFICAÇÃO E INTEGRAÇÃO DOS PLANOS DE INFORMAÇÕES QUANTO ÀS APTIDÕES E CAPACIDADES DE USO DO SOLO

O plano de informações de aptidão e capacidade de uso resultou em áreas inaptas com uso vetado distribuídas ao longo da rede de drenagem e em áreas de bordas e planaltos (figura 44).

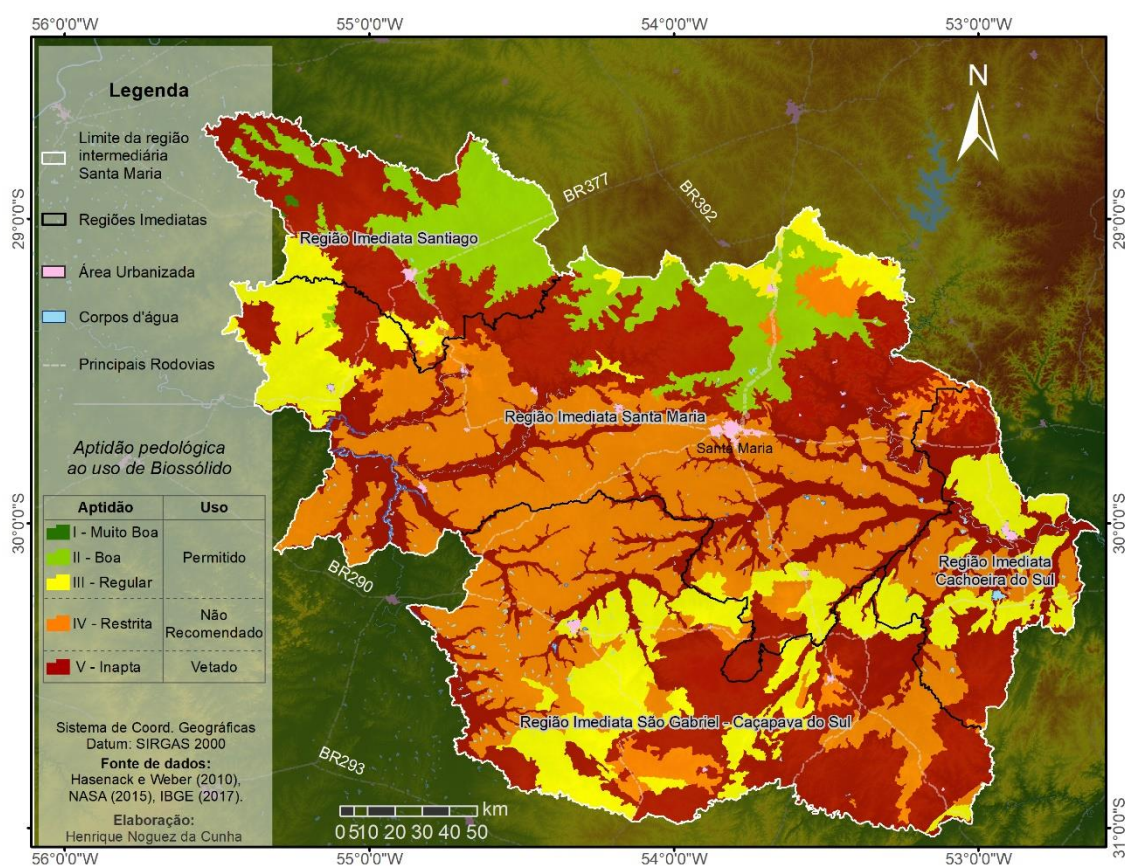


Figura 44. Aptidão e capacidade de uso de bioossólido nas regiões imediatas e região intermediária Santa Maria.

As áreas de aptidão restrita ou uso não recomendado, que dependem da autorização de órgão competente estadual para a permissão ao uso de bioossólido, estão localizadas em áreas de depressão, quase sem representação na região Santiago. Já as aptidões regular, boa e muito boa, com capacidade de uso permitido, são localizadas em áreas limítrofes entre as regiões imediatas Santiago e Santa Maria e porção central das regiões São Gabriel - Caçapava do

Sul e Cachoeira do Sul, assim como na porção norte da região Santa Maria e Santiago. Os valores percentuais de classes de aptidão sem restrições locais podem ser observados na figura 45, com destaque para as classes muito boa, com 0,04% e inapta com 42,1% da região intermediária Santa Maria.

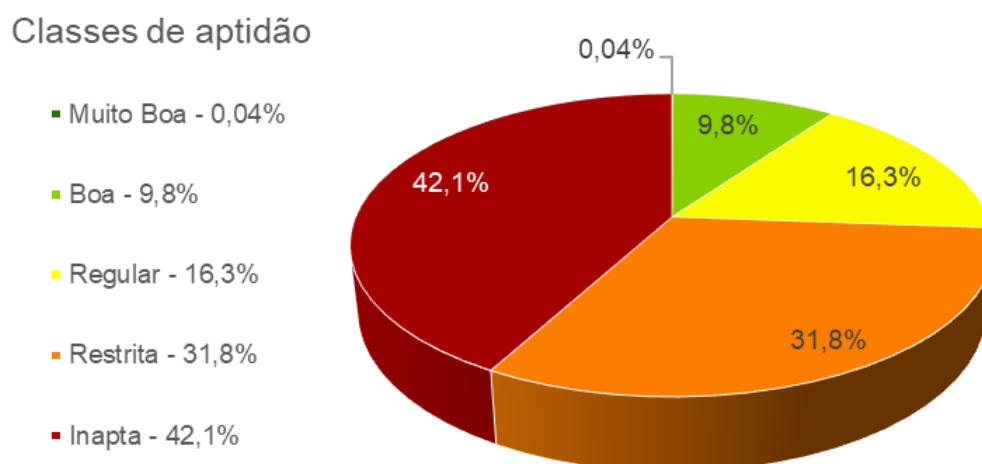


Figura 45. Aptidão e capacidade de uso de biofósforo na região intermediária Santa Maria.

A integração desse plano de informações de aptidões e capacidades de uso de biofósforo, quando analisados somente em áreas legalmente permitidas de acordo com o tipo de aplicação resultou no plano de informações de aptidão e capacidade de uso de biofósforo em áreas permitidas ao uso de biofósforo para aplicação superficial sem incorporação (figura 46a), em aplicação superficial com incorporação (figura 46b), aplicação subsuperficial e em sulcos, e aplicação superficial sem incorporação em produção florestal (figura 46c) e somente em aplicação em covas (figura 46d).

É possível observar que a classe de aptidão restrita é predominante na área de estudo, representando quase a metade das áreas permitidas de acordo com os critérios permissivos da resolução CONAMA 375/2006 para cada tipo de aplicação (CONAMA, 2006) (figuras 46a, 46b, 46c, 46d e 47). Por outro lado, as áreas de aptidão muito boa são raras na área de estudo em todos os tipos de aplicação, localizadas somente na porção oeste da região imediata Santiago, somando menos do que 1% da área da região intermediária (figuras 46a, 46b, 46c, 46d e 47).

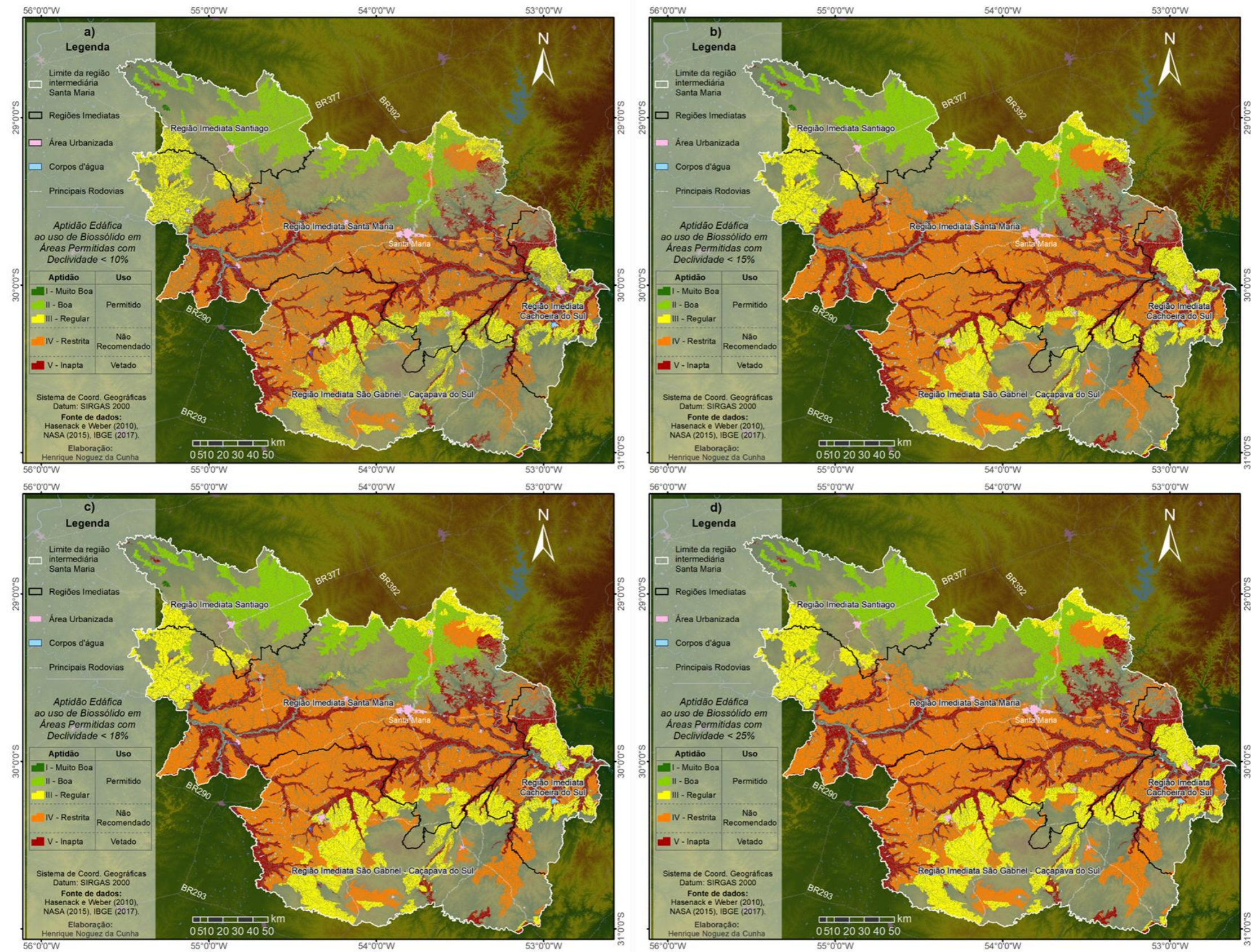


Figura 46. Aptidão e capacidade de uso de biossólido para: a) aplicação superficial sem incorporação; b) aplicação superficial com incorporação; c) aplicação subsuperficial e em sulcos, e aplicação superficial sem incorporação em produção florestal; d) aplicação em covas.

Os diferentes tipos de aplicação pouco influenciaram nos valores relativos das classes de aptidão ao uso de biossólido na região intermediária Santa Maria. Nas figuras 46a, 46b, 46c, 46d e 47, é possível observar a tênue variação entre as classes de aptidão quando comparadas entre as classes de aplicação. Os resultados indicam um valor elevado de áreas restritas, seguido em menor quantitativo de áreas regulares, inaptas e boa.

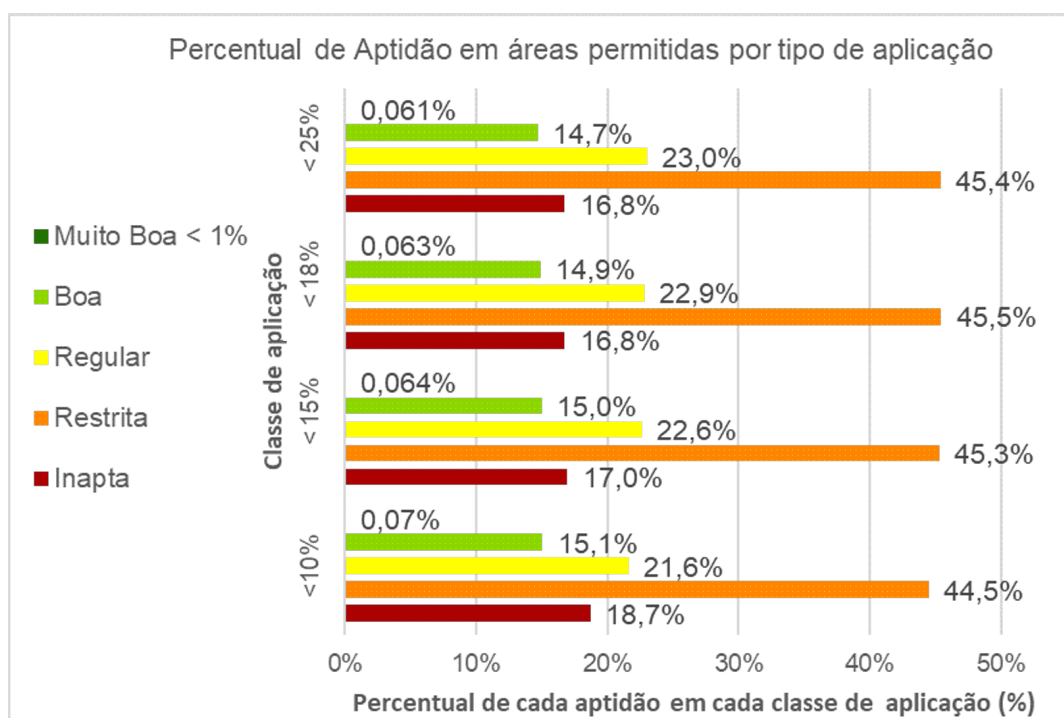


Figura 47. Aptidão para cada tipo de aplicação de biossólido em área permitida.

Quando avaliada a capacidade de uso permitido, as classes de aptidão muito boa, boa e regular são somadas e resultam em 36,7% das áreas menores do que 10% de declividade (figuras 46a e 47); 37,6% em áreas com intervalo clinográfico até 15% (figuras 46b e 47); 37,8 no intervalo até 18% de declividade (figuras 46c e 47) e 37,7 para o uso apenas em covas (<25%).

Esse resultado indica que a classe inapta (figura 45) foi a que mais reduziu, seguida das classes de aptidão regular e boa, quando o plano de informações de aptidão foi submetido ao processo de exclusão das áreas de uso não permitido (CONAMA, 375).

5.5 IDENTIFICAÇÃO DE USO COBERTURA DA TERRA NAS ÁREAS PERMITIDAS EM DIFERENTES CLASSES DE APTIDÃO

As classes de usos e cobertura referente ao ano de 2019 (MAPBIOMAS, 2009) presentes nas áreas permitidas, de acordo com CONAMA (2006), ao uso de biossólido são presentes na figura 48.

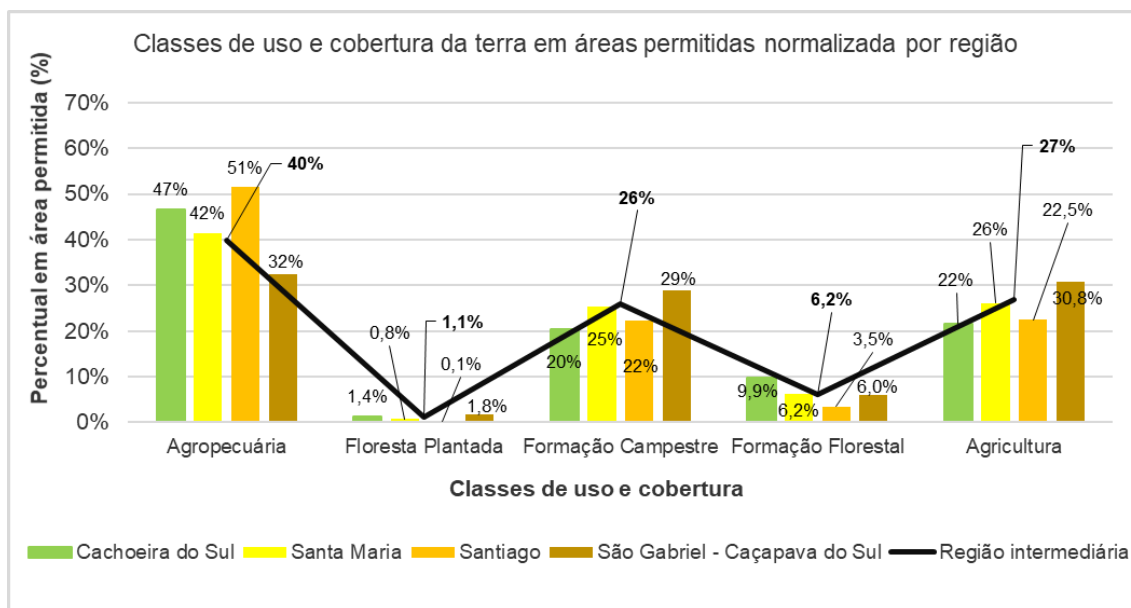


Figura 48. Classes de uso e cobertura das regiões imediatas e intermediária presentes nas áreas de uso permitido pela resolução CONAMA 375/2006.

As classes de área não vegetada (0,3%), Pastagem (0,4%) e Campos alagados e área pantanosa (0,004%) estão presentes, somadas, em menos de 1% da área da região intermediária Santa Maria. As classes agropecuária, formação campestre e agricultura são predominantes em todas as regiões imediatas. As classes de uso agropecuário (40%) e agrícola (27%) totalizam 67% da área permitida ao uso de biossólido (CONAMA, 2006) e a classe de cobertura campestre perfaz 26% desta área. As características do bioma pampa com cobertura campestre e matas de galerias e matorrais corroboram com a maior cobertura campestre em relação a cobertura de formação florestal (6,2%). As áreas de floresta plantada são pouco presentes como uso da terra em áreas de uso permitido ao biossólido da região intermediária, com apenas 1,1% (figuras 48, 49a, 49b, 49c, 49d). As classes, avaliadas em áreas permitidas em diferentes aplicações não resultaram em diferenças significativas (figuras 48, 49a, 49b, 49c, 49d).

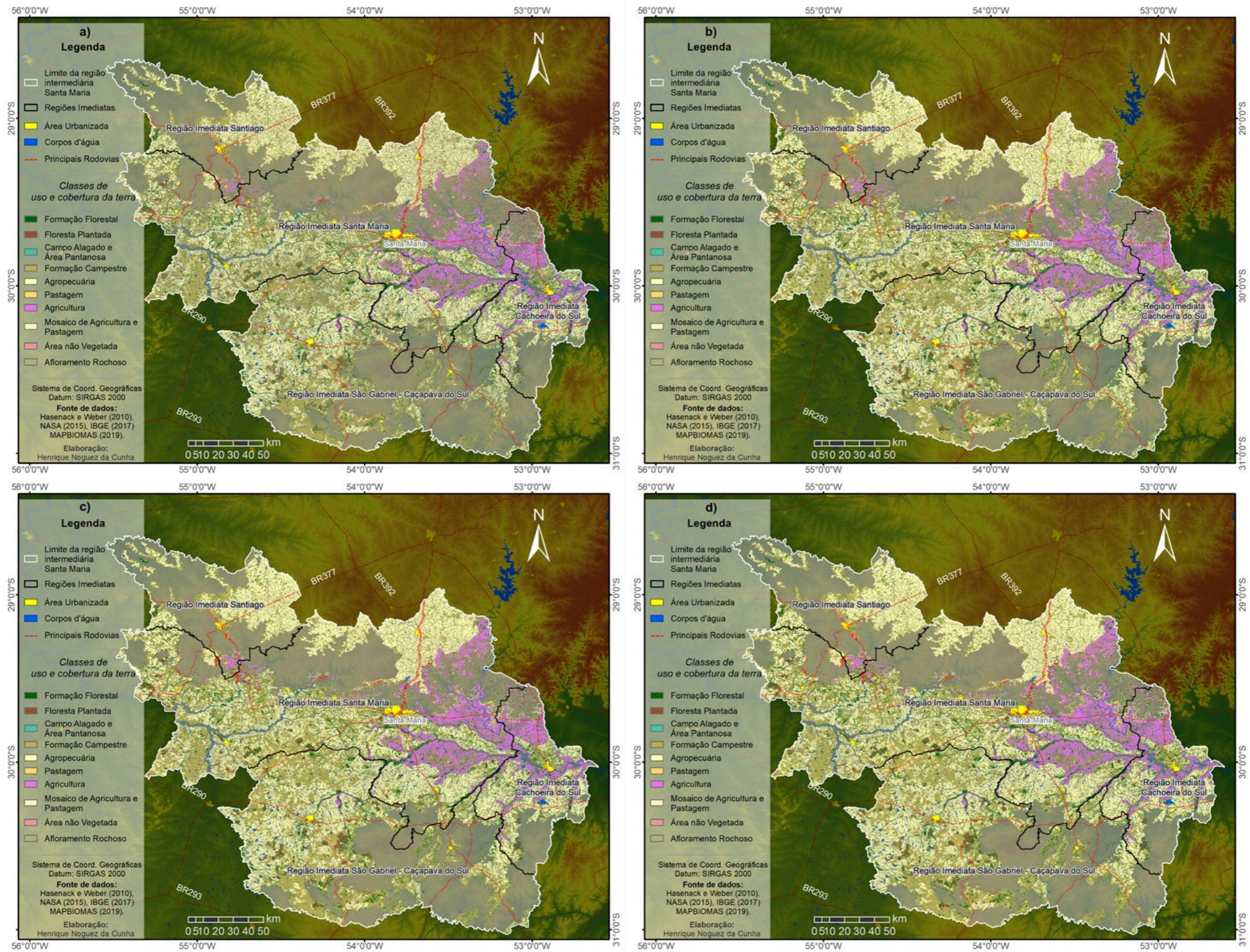


Figura 49. Usos e cobertura da terra em áreas permitidas para: a) aplicação superficial sem incorporação; b) aplicação superficial com incorporação; c) aplicação subsuperficial e em sulcos, e aplicação superficial sem incorporação em produção florestal; d) aplicação em covas.

Considerando que as classes de uso agropecuário e agrícola são presentes em maiores percentuais na região e possuem por característica o uso extensivo do solo, tais classes foram consideradas como prioritárias para a reciclagem de bio-sólido e consequente uso de seus benefícios ao solo (figura 50).

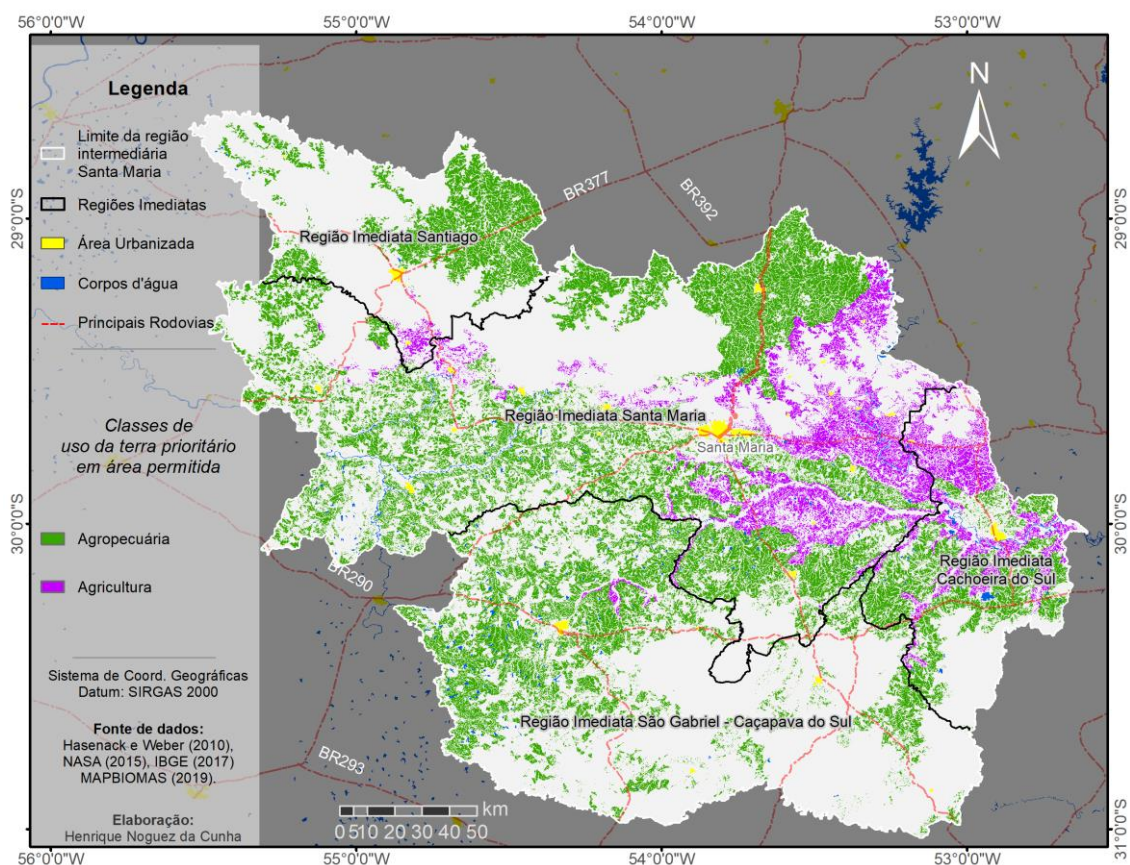


Figura 50. Distribuição das classes prioritárias ao uso de bio-sólido para os usos da terra na região intermediária Santa Maria.

A classe de uso agrícola esteve presente, no ano de 2019, predominantemente em áreas de uso permitido (CONAMA, 2006) situadas na porção leste da região intermediária, sobre as regiões imediatas Santa Maria e Cachoeira do Sul e também ao sul da região Santiago. Nas demais áreas, a classe se mostrou fragmentada e menos representativa (figura 50).

Ainda na figura 50, a distribuição da classe de uso agropecuário foi presente em todas as áreas de uso permitido, com maior presença nas áreas central de depressão e limite norte da região intermediária. Essa última, menos

fragmentada.

A avaliação dessas classes de uso sobre as áreas permitidas em classificação da aptidão do solo para recebimento de biossólido indica que o uso agrícola não foi encontrado na classe de aptidão muito boa e foi presente em 16% das áreas com aptidão boa a regular (figura 51).

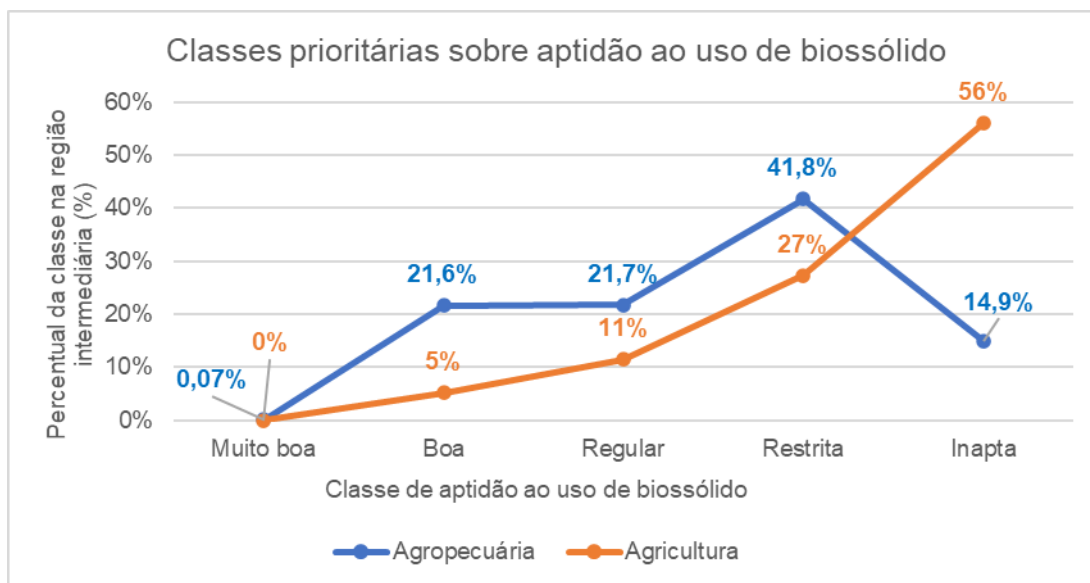


Figura 51. Distribuição das classes prioritárias ao uso de biossólido na região intermediária Santa Maria para cada classe de aptidão. Elaborada pelo autor

A classe agricultura possui 56% de sua área de cultivo sobre área inapta, com uso vetado e 27% em área com aptidão restrita à autorização do órgão estadual competente.

Presente nas três classes de aptidão muito boa, boa e regular, a classe agropecuária conta com 43,37% de sua área apta em uso permitido ao biossólido. Contudo, ocupa 41,8% de área restrita e 14,9% de área inapta.

5.6 INDICAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS, COM USO AGRÍCOLA EM SOLOS COM APTIDÃO EM ÁREAS LEGALMENTE PERMITIDAS

Com o propósito de indicar as áreas prioritárias ao uso de biofóssido, na figura 52 são apresentadas as classes prioritárias sobre áreas de uso permitido em áreas de solo apto, restrito e inapto.

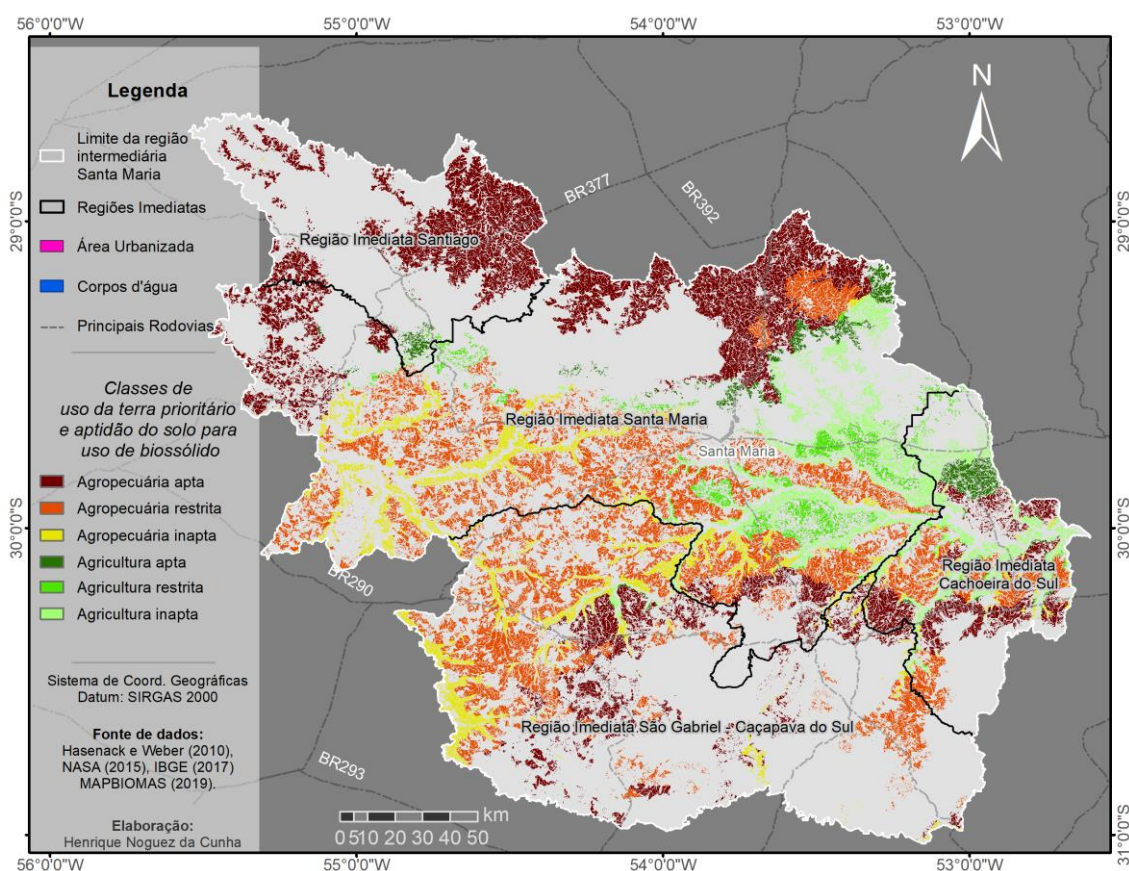


Figura 52. Áreas prioritárias ao uso de biofóssido na região intermediária Santa Maria com destaque para os três níveis de aptidão. Elaborada pelo autor

É possível observar na figura 52, que a distribuição das classes de uso prioritário na reciclagem de biofóssido oriundo do processo de tratamento do esgotamento sanitário indica pequenas áreas prioritárias para o uso do biofóssido na agricultura (374,1km²). Uma vez que essa atividade antrópica está presente em sua maior parte nas áreas de aptidão restrita. Por outro lado, as atividades agropecuárias possuem suas atividades em 4583,1km² sobre áreas

permitidas pela resolução Conama 375 (CONAMA, 2006) com solos aptos ao recebimento de biossólido.

A segurança da reciclagem agrícola do biossólido vem sendo comprovada por diversos estudos que se objetivam na saúde humana e riscos ambientais, tais como os estudos de Andreoli et al. (2000), Zhu et al. (2022) e Husek et al. (2022). O zoneamento resultante desta tese se mostrou seguro, por contar com parâmetros legais e de capacidade edáfica ao uso, e pode ser usado para estabelecer políticas e regulamentações específicas para diferentes áreas, a fim de garantir a segurança e a proteção da população e do meio ambiente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O resultado da pesquisa na presente tese possibilita concluir que a região intermediária de Santa Maria possui áreas aptas legalmente ao recebimento de bio sólido oriundo do tratamento de esgoto sanitário. Foram quantificadas quatro formas de recebimento de bio sólido: (1) aplicação superficial sem incorporação em 42% da área; (2) aplicação superficial com incorporação permitida em 49% da área; (3) aplicação subsuperficial e em sulcos, e aplicação superficial sem incorporação em produção florestal em 51% da área; e (4) aplicação em covas em 52%.

As áreas aptas legalmente ao recebimento de bio sólido oriundo do tratamento de esgoto sanitário estão presentes em maior área nas regiões imediatas Santa Maria (57%) e Cachoeira do Sul (55%). Por outro lado, as regiões imediatas São Gabriel-Caçapava do Sul e Santiago representaram menores áreas permitidas (39% e 32% respectivamente).

A região intermediária Santa Maria conta com 26,1% da sua área com classe de uso de bio sólido permitido sem qualquer restrição pedológica, além de áreas com restrições em 31,8% e áreas com uso vetado em 42,1%. As regiões imediatas Santiago e Santa Maria apresentaram as melhores capacidades de uso de bio sólido, com presença de áreas com uso permitido e aptidão boa e muito boa na porção norte da área de estudo, no entanto, conta também com as demais classes de aptidão. As regiões imediatas São Gabriel-Caçapava do Sul e Cachoeira do Sul apresentam predominância de áreas com aptidão restrita e inapta com uso não recomendado e vetado e a presença da classe de aptidão regular com uso permitido distribuído ao centro dessas regiões.

No cenário do ano de 2019 a classe de uso agrícola contou com 16% de sua área de cultivo sobre área de uso permitido e 27% em área com aptidão restrita à autorização do órgão estadual competente. A classe de uso agropecuário contabilizou 43,37% da sua produção total em áreas permitidas ao uso de bio sólido. Contudo, ocupou 41,8% de área restrita à autorização do órgão estadual competente.

Dessa forma, é possível concluir que a hipótese da presente tese foi confirmada de forma integral. Na qual, de forma comprovada, a região intermediária de Santa Maria possui áreas permitidas para a disposição e reciclagem de biossólidos oriundos de esgotamento sanitário situadas em ambientes que já possuem uso agrícola e a avaliação de aptidão do solo tornou possível indicar essas áreas como prioritárias para a disposição.

Nesse sentido, o presente estudo responde questões sobre a destinação segura e reciclagem dos resíduos oriundos do saneamento básico no estado do Rio Grande do Sul e, a partir de um estudo de caso, avaliando a relação dessas áreas legalmente permitidas com os parâmetros físicos presentes na região intermediária Santa Maria/RS. Esse estudo se mostra como uma técnica importante para auxiliar na tomada de decisão sobre o uso do lodo de esgoto na agricultura, assim como os modelos utilizados nos estudos de Andreoli et al (2000), Passuelo et al. (2012), Bittencourt et al. (2009), Lima (2014), Taques et al. (2015) e Urban e Isaac (2016).

Os resultados desta tese foram apresentados em escala regional com planos de informações de entrada na escala 1:250.000. Para estudo de caso *in loco*, a nível de propriedade, o produto necessita ser elaborado com a utilização de uma escala apropriada com as devidas reambulações. Esse fator é primordial e necessário no processo de identificação das áreas em escalas maiores, pois determina o nível de detalhe e precisão da informação utilizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUBAKAR, A.; DOUAIK, A.; MEWOOU, Y. C. M.; MADONG, R. C. B. A.; DAHCHOUR, A.; EI HAJJAJI, S. Determination of background values and assessment of pollution and ecological risk of heavy metals in urban agricultural soils of Yaoundé, Cameroon. **Journal of Soils and Sediments**, v. 21, n. 3, p. 1437-1454, 2021.

ABREU, A. H. M., MARZOLA, L. B., MELO, L. A., LELES, P. S. DOS S., ABEL, E. L. S., ALONSO, J. M. Urban solid waste in the production of *Lafoensia pacari* seedlings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 83–87, 2017a. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p83-87>

ABREU, A. H. M., LELES, P. S. S., ALONSO, J. M., ABEL, E. L. S., OLIVEIRA, R. R. Characterization of sewage sludge generated in Rio de Janeiro, Brazil, and perspectives for agricultural recycling, **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4, p. 2433 – 2448, 2017b.

ACSELRAD, H. Introdução à questão metodológica. In: IBASE (Instituto Brasileiro de Análises Sociais e Econômicas). **Conflitos sociais e meio ambiente: desafios políticos e conceituais**. Rio de Janeiro: IBASE, p. 107-114, 1995.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Regiões Hidrográficas do Brasil**. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias>. Acesso em: 12 nov. 2019.

ALTHAUS, D.; SILVA, K. J.; FELISBERTO, R.; TEDESCO, M. J.; BISSANI, C. A.; GIANELLO, C. **Teores naturais de metais pesados em solos do Estado do Rio Grande do Sul**. In: Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo; 2013; Florianópolis. Florianópolis: Epagri, SBCS; 2014. p. 5264-6.

ANDREOLI, C. V. PEGORINI, E. S.; FREGADOLLI, P.; CASTRO, L. D. Diagnóstico do potencial dos solos da região de Maringá para disposição final do lodo gerado pelos sistemas de tratamento de esgoto do município. **Revista Técnica da SANEPAR**, v. 13, n. 13, p. 40-50, 2000.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 2. Ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 6, p. 444. 2014.

ANDREOLI, C. V.; PINTO, M. A. T. **Introdução**. In: ANDREOLI, C. V. (org). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001a.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: Tratamento e disposição final**. Rio de Janeiro: Editora ABES, 2001b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Fórum Nacional de Normatização: **NBR-10.004 – Resíduos Sólidos - Classificação**. Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004a. 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Fórum Nacional de Normatização: **NBR-10.005 – Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos**. Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Fórum Nacional de Normatização: **NBR-10.006 – Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos**. Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c. 3p.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola**. Embrapa, 2006.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos, SP: EESC/USP, 1999.

BITTENCOURT, S.; VITÓRIO ANDREOLI, C.; ALCEU MOCHIDA, G.; MARIN DE SOUZA, L. M. K. Uso agrícola de lodo de esgoto, estudo de caso da Região Metropolitana de Curitiba. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica**, v. 2, n. 1, p. 1-11, 2009.

BITTENCOURT, Simone; AISSE, Miguel Mansur; SERRAT, Beatriz Monte. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, p. 1129-1139, 2017.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C; MONTANARI, R. Lodo de Esgoto e Adubação Mineral na Recuperação de Atributos Químicos de Solo Degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.4, p. 388-393, 2015.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. Oficina de textos, 2008.

BOURIOUG, M.; GIMBERT, F.; ALAOUI-SEHMER, L.; et al. Sewage sludge application in a plantation: Effects on trace metal transfer in soil – plant – snail continuum. **Science of the Total Environment**, v. 502, p. 309-314, 2015.

BRASIL, Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 25 maio 2012. Seção 1, p. 37.

BRASIL. **Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e

aplicação, e dá outras providências. Disponível em:
<www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: 20 mar. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305/2010, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em:
<www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 20 mar. 2022.

BRASIL. **Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965**. Instituiu o código florestal brasileiro. Brasília, DF, 1965. Disponível em:
<www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L4771.htm>. Acesso em: 20 mar. 2022.

CABREIRA, G. V., LELES, P. S. DOS S., ALONSO, J. M., DE ABREU, A. H. M., LOPES, N. F., AND DOS SANTOS, G. R. Biossólido como componente de substrato para produção de mudas florestais. **Floresta**, v. 47, n. 2, p. 165–176, 2017.

CERA, J. C.; FERRAZ, S. E. T. Variações climáticas na precipitação no sul do Brasil no clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 81-88, 2015.

CHRISTODOULOU, A.; STAMATELATOU, K. Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 3, p. 453 – 462, 2016.

CIEŚLIK, M. B., NAMIEŚNIK, J., KONIECZKA, P.: Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. **Journal Clean Production**, v. 90, n.1, p. 1–15, 2015.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 375/2006**, de 29/8/2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Disponível em:
<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>> Acesso em 02 set. 2018.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 460/2013**, de 30/12/2013. Altera a Resolução no 420, de 28 de dezembro de 2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências. Disponível em:
<www.mma.gov.br/port/conama> Acesso em 02 fev. 2020.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 498/2020** de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n. 161, p. 265-273.

CORSAN. **RS Mais Saneamento aborda a universalização da água e duplicação do esgoto tratado**. 2012. Disponível em: <<http://www.corsan.com.br/node/844>>. Acesso em 25 ago. 2021.

CPRM Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Sistema de informações de águas subterrâneas (SIAGAS)**. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/>. Acesso em: 04 out. 2022.

DEE - Departamento de Economia e Estatística. **Índice de Desenvolvimento Socioeconômico (IDESE) do Estado do Rio Grande do Sul e de suas regionalizações**. 2019. Disponível em: <http://dee.planejamento.rs.gov.br/>. Acesso em: 04 out. 2022.

DOS SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., revisada e ampliada. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

Du, Y.; Zhang, Z. Research on poverty alleviation performance evaluation method based on Spearman correlation coefficient and entropy weight method. **Financial Engineering and Risk Management**, v. 4, n. 2, p. 32-35, 2021.

DUARTE, A. C. L. **Incorporação de lodo de esgoto na massa cerâmica para a fabricação de tijolos maciços: uma alternativa para a disposição final do resíduo**. Dissertação (Mestre em Engenharia Sanitária) na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

EGLE, L.; RECHBERGER, H.; ZESSNER, M. **Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater Resources, Conservation and recycling**. 2015 Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.016>> Acesso em 21 de junho de 2020.

ENVIROMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS Desktop 10.2.2 Redlands (CA)**, 2014.1 CD-ROM.

EUROSTAT – European Comission of Estatistic – **Sewage sludge production and disposal from urban wastewater**, Ano 2015. Disponível em <<http://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>>. Acesso em 28 de maio de 2020.

FEE - FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA. **Índice de Desenvolvimento Socioeconômico (IDESE)**. 2014. Disponível em: <<http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/capa/index>>. Acesso em: 13 out. 2022

FEPAM. FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER. **Portaria FEPAM nº 85/2014**. Disponível em: <www.fepam.rs.gov.br/legislacao/>. Acesso em 29 mar. 2020.

FERNANDES, F.; PIERRO, A. C.; YAMAMOTO, R. Y. Produção de fertilizante orgânico por compostagem do lodo gerado por estações de tratamento de esgotos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 5, p. 567 – 574, 1993.

GALINDO, V.; ALMEIDA, V. T. B. SILVICULTURA E SEUS IMPACTOS. **Guia Universitário de Informações Ambientais**, v. 2, n. 2, p. 39-40, 2021.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOOGLE. **Google Earth Pro** (Ver. 7.3.4.8248) [Software]. Mountain View (CA), 2021. Disponível em: <<http://www.google.com.br/intl/pt-PT/earth/>>. Acesso em: 05.02.2021.

GUERRA, A. J. T. Geomorfologia e Planejamento ambiental—conceitos e aplicações. **Revista de Geografia** (Recife), v. 35, n. 4, p. 269-287, 2018.

GUERRINI, I.A., CROCE, C.G.G., BUENO, O. DE C., JACON, C.P.R.P., NOGUEIRA, T.A.R., FERNANDES, D.M., GANGA, A., AND CAPRA, G.F. Composted sewage sludge and steel mill slag as potential amendments for urban soils involved in afforestation programs. **Urban Forestry and Urban Greening**, v.22, p. 93–104, 2017.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.) **Base cartográfica vetorial continua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000**. Porto Alegre: UFRGS/Centro de Ecologia. 2010.1 DVD-ROM (Série Geoprocessamento, 3).

HENDGES, L.; HENDGES, L. T.; REINHER, R. C. R.; LEICHTWEIS, J.; FERNANDES, É. J.; TONES, A. R. M. DISPOSIÇÃO FINAL DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E DE ESGOTO: UMA REVISÃO. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, n. 2, 2017.

HUSEK, M.; MOSKO, J.; POHORELÝ, M. Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: Current state-of-the-art. **Journal of Environmental Management**, v. 315, p. 115090, 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250 000**. IBGE, Rio de Janeiro, 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Divisão Regional em Regiões Geográficas Intermediárias e Imediatas**. IBGE, Rio de Janeiro, 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapeamento de recurso naturais do Brasil escala 1:250.000: Geomorfologia**. IBGE, Rio de Janeiro, 2021a.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapeamento de recurso naturais do brasil escala 1:250.000: Solos.** IBGE, Rio de Janeiro, 2021b.

IBGE. **Cobertura e uso da terra do Estado do Rio Grande do Sul.** Rio de Janeiro: IBGE, 2016. Escala: 1:100.000. Disponível em: ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/uso_da_terra/. Acesso em: 23 ago. 2021.

INSTITUTO TRATA BRASIL – **Saneamento é Saude. Saneamento. Principais estatísticas: Esgoto.** 2019. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/esgoto>>. Acesso em: 14 out. 2020.

IWAKI, G. Destinação Final de Lodos de ETAs e ETEs. **Portal Tratamento de Água.** Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-finalde-lodos-de-et-as-e-etes/>> Acesso em: 30 de maio de 2021.

KACPRZAK, M., NECZAJ, E., FIJAŁKOWSKI, K., GROBELAK, A., GROSSER, A., WORWAG, M., RORAT, A., BRATTEBO, H., ALMÅS, Å., AND SINGH, B.R. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. **Environmental Research**, v. 156, p. 39–46, 2017.

KOMINKO, H., GORAZDA, K., WZOREK, Z. The possibility of Organo-mineral fertilizer production from sewage sludge. **Waste and Biomass Valorization**. v. 1, n. 1, p. 1 – 11, 2017.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**, v. 3, 1992.

LeBLANC, R.; MATTHEWS, P.; ROLAND, P. Global Atlas of Excreta Wastewater Sludge, and Biosolids Management: **Moving Forward the Sustainable and Welcome Uses of a Global Resource.** UN-Habitat, Nairobi, p. 31 – 46, 2008).

LEFEBVRE, H. Prefácio: a produção do espaço. **Estudos avançados**, v. 27, p. 123-132, 2013.

LEPSCH, I. F. **Manual para levantamento utilitário de meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso: 4º aproximação.** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. 175p.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3ª Edição. Campinas, SP: **Editora Atomo**, 2010

LIMA, F. A. **Determinação de áreas potenciais à aplicação de lodo de esgoto como insumo agrícola utilizando geoprocessamento.** 2014. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais.

LU, Q.; HE, Z. L.; STOFFELLA, P. J. Land Application of Biosolids in the USA: a Review. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2012, p. 1 - 11, 2012.

MAPBIOMAS – **Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**, 2019. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/download>> Acesso em 02 set. 2021.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBİYAMA, M. Mapeamento de risco de desastres naturais do estado de Santa Catarina. **Caminhos de Geografia**, v. 7, n. 17, 2006.

MARRON, N. Agronomic and environmental effects of land application of residues in short-rotation tree plantations: A literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 378 – 400, 2015.

MATTE, A. Mudanças produtivas no Pampa brasileiro: impactos, vulnerabilidade e estratégias de reação. **Transições produtivas, agroecológicas e culturais no campo brasileiro**. 1ed. São Paulo: FFLCH/USP, v. 1, p. 93-123, 2019.

MELLO, J. W. V.; ABRAHÃO, W.A.P. Valores de referência de qualidade para elementos traço nos solos de Minas Gerais e Espírito Santo: os bastidores de uma experiência. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 12-17, 2013.

MENDONÇA, F. A. Geografia Socioambiental. **Terra Livre**, n. 16, p. 113-132, 2001.

MILARE, E. **Direito do Ambiente - a Gestão Ambiental em Foco - 7ª Ed.** Editora Revista dos Tribunais. São Paulo, 2011.

MINGOTI, R. **Efeitos da espacialização da cobertura florestal e da profundidade dos solos na produção de água de uma bacia hidrográfica**. 2012. 170p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MINGOTI, R.; SPADOTTO, C. A.; MORAES, D. A. DE C. Suscetibilidade à contaminação da água subterrânea em função de propriedades dos solos no Cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1252-1260, 2016.

MININNI, G.; BLANCH, A. R.; LUCENA, F.; BERSELLI, S. EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. **Environmental Science Pollution**. Res, v. 22, p. 7361 – 7374, 2015.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. **USGS Global Visualization Viewer**. 2015. Disponível em: ><http://glovis.usgs.gov> < Acesso em: 15 out. 2021.

NASCIMENTO, A. L.; SAMPAIO, R.A.; ZUBA JUNIO, G.R.; FERNANDES, L.A.; CRUZ, S.F.; CARNEIRO, J.P.; BARBOSA, C.F.; LIMA, N.N. de. Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. **Bioscience Journal**, v.30, p.146-153, 2014.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L.A.; HODNETT, M.G.; RENNÓ, C.D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model. **Jornal of Hydrology**, v. 404, p.13-29, 2011. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.051.

ORELLANA, M. M. P. **A Geomorfologia no Contexto Social**. In: Geografia e Planejamento. São Paulo: IG/USP, 1981. N.34. p. 1-25.

OUIMET, R.; PION, A. P.; HÉBERT, M. Long-term response of forest plantation productivity and soils to a single application of municipal biosolids. **Canadian Journal Soil Science**, v. 95, p. 187 – 199, 2015.

PASSUELLO, A.; CADIACH, O.; PEREZ, Y.; SCHUHMACHER, M. A spatial multicriteria decision making tool to define the best agricultural areas for sewage sludge amendment. **Environment International**. 2012, vol. 38, p. 1-9.

PERS. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul – PERS/RS**. SEMA, 2015, n 2034. Porto Alegre, 2015. Disponível em: <www.sema.rs.gov.br/>. Acesso em: 10 ago 2017.

QUINTANA, N. R. G.; CARMO, M. S. do; MELO, W. J. de. Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. **Nucleus**, v.8, n.1, 2011.

RAMGRAB, G.E., WILDNER, W., LOPES, R.C., FAVILLA, C.A.C., SILVA, M.A.S., SACHS, L.L.B., SILVA, V.A., BATISTA, I.H., 2004. Folha SH.22-Porto Alegre. In: SCHOBENHAUS, C., GONÇALVES, J.H., SANTOS, J.O.S., ABRAM, M.B., LEÃO NETO, R., MATOS, G.M.M., VIDOTTI, R.M, RAMOS, M.A.B., JESUS, J.D.A. de. (eds.). **Carta Geológica do Brasil, Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil**. CPRM, Brasília. CD-ROM

RECESA - Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. **Transversal: Lodo gerado durante o tratamento de água e esgoto. Guia do profissional em treinamento**. Nível 2. p. 90. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). ± Brasília. Ministério das Cidades, 2008.

REN, J.; LIANG, H.; DONG, L.; GAO, Z.; HE, C.; PAN, M.; SUN, L. Sustainable development of sewage sludge-to-energy in China: Barriers identification and technologies prioritization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 67, n. 10, p. 384 – 396, 2017.

RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTMDEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazônia. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p. 3469-3481, 2008.

ROSSATO. M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. 2011. 253 f.: Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SAMPAIO, A. Afinal, queremos ou não viabilizar o uso agrícola do lodo produzido em estações de esgoto sanitário? Uma avaliação crítica da Resolução CONAMA 375. **Revista DAE**, n. 193, p. 16-27, 2013.

SAMPAIO, T. F., GUERRINI, I. A., OTERO, X. L., VAZQUEZ, F. M., BOGIANI, J. C., OLIVEIRA, F. C., HARRISON, R. B. The Impact of Biosolid Application on Soil and Native Plants in a Degraded Brazilian Atlantic Rainforest Soil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 227, n. 1, 2016.

SAMPAIO, T. F.; GUERRINI, I. A.; BACKES, C.; HELIODORO, J. C. A.; RONCHI, H. S.; TANGANELLI, K. M.; CARVALHO, N. C.; OLIVEIRA, F. C. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.5, p. 1637-1645, 2012.

SANTOS, R. F. DOS; THOMAZIELLO, S.; WEILL, M. DE A. M. **Planejamento da paisagem**. In: SANTOS, R. F. dos (org.) Vulnerabilidade Ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos? Brasília: MMA, 192p, 2007.

SEMA - RS. **Base Cartográfica do Estado do Rio Grande do Sul, escala 1:25.000** – BCRS25: versão 1.0. Porto Alegre, 2018.

SEMA - Secretaria do Meio Ambiente. **PERS / RS: Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SEMA, 2015. 559 p. Disponível em: <<http://www.pers.rs.gov.br/arquivos/ENGB-SEMA-PERS-RS-40-Final-rev01.pdf>> Acesso em: 10 ago 2018.

SHAPIRO, S. S.; M. B. WILK. An Analysis of Variance Test for Normality. **Biometrika Trust**, London, v. 52, p. 591–609, 1965.

SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Produção Agrícola, Extração da Silvicultura e Pesquisa da Pecuária Municipal**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 12 set. 2022.

SILVA, M.A.S., FAVILLA, C.A.C., WILDNER, W., RAMGRAB, G.E., LOPES, R.C., SACHS, L.L.B., SILVA, V.A., BATISTA, I.H., 2004. Folha SH.21-Uruguaiana. In: SCHOBENHAUS, C., GONÇALVES, J.H., SANTOS, J.O.S., ABRAM, M.B., LEÃO NETO, R., MATOS, G.M.M., VIDOTTI, R.M, RAMOS, M.A.B., JESUS, J.D.A. de. (eds.). **Carta Geológica do Brasil, Sistema de**

Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Índice Municipal de Atendimento Total de Esgoto no RS – 2018.** Disponível em: www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/. Acesso em: 10 ago 2020.

SOUZA, M. D. P.; RIBEIRO, A. N.; ANDREOLI, C. V.; SOUZA, L. C. P.; BITTENCOURT, S. Aptidão das terras do Estado do Paraná para a disposição final de lodo de esgoto. **Revista DAE**, v. 177, p. 20-29, 2008.

SOUZA, M. L. P.; ANDREOLI, C. V.; PAULETTI, V. et al. Desenvolvimento de um sistema de classificação de terras para disposição final do lodo de esgoto. In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (4: 1994: Florianópolis). **Anais...** Florianópolis: ABES/APRH. V. 1, p. 403 – 419, 1994.

SPIERING, V.; CUNHA, H. N.; SIQUEIRA, R. D. O.; MIURA, A., COUTO, O.; de SOUSA, L. P.; GUARINO, E. **Determinação de áreas potenciais para instalação de unidades de gerenciamento de lodo nas superintendências da Corsan.** 2020. Disponível em: infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc. Acesso em: 10.02.2021.

SPSS. **SPSS Statistics 17.0: Command Syntax Reference.** Chicago, IL: SPSS Inc. 2008.

SUERTEGARAY, D. M. A. Geografia e ambiente: desafios ou novos olhares. **Revista Mato-Grossense de Geografia**, v. 17, n. 1, 2014.

TAQUES, R. C. **Áreas potenciais do Estado do Espírito Santo para aplicação do lodo de esgoto na agricultura.** 2015.

TORRI, S. I.; CORRÊA, R. S.; RENELLA, G. Biosolid Application to Agricultural Land—a Contribution to Global Phosphorus Recycle: A Review. **Pedosphere**. v. 27, n. 1, p. 1 – 16, 2017.

TORRI, S. I.; CORRÊA, R. S.; RENELLA, G.; VADECANTOS, A.; PERELOMOV, L. Biosolids soil application: Why a new special on old issue?. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2012, p. 1 – 3, 2012.

TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; REIS, E. F.; SILVA, A. G. Produção de mudas de *Tectona grandis* em substratos formulados com biossólido. **Cerne**, Lavras, v.20, n.2, p. 293 – 302, 2014.

URBAN, R C.; ISAAC, R. de L. Land feasibility map for sewage sludge application: watershed of the Piracicaba, Capivari and Jundiaí Rivers-Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 1, p. 125-134, 2016.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Guidelines for Water Reuse**. Washington, DC: EPA, 2004.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 1995.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 4. **Ed. Belo Horizonte**: UFMG, v. 1, p. 472, 2014.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. **Lodo de esgotos: características e produção**. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6). cap. 2, p. 17-67.

WALLACE, B. M., KRZIC, M., NEWMAN, R. F., FORGE, T. A., BROERSMA, K. NEILSEN, G. Soil Aggregate Dynamics and Plant Community Response after Biosolids Application in a Semiarid Grassland. **Journal of Environment Quality**. v. 45, n.5, p. 1663 – 1671, 2016.

YADA, M. M.; MELO, W. J.; MINGOTE, F. L. C.; MELO, V. P.; MELO, G. M. P. Chemical and biochemical properties of Oxisols after sewage sludge application for 16 years. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 30, p. 1302 – 1310, 2015.

ZHU, X.; XU, Y.; ZHEN, G.; LU, X.; XU, S.; ZHANG, J.; WU, Z. Effective multipurpose sewage sludge and food waste reduction strategies: A focus on recent advances and future perspectives. **Chemosphere**, p. 136670, 2022.

ZVEIBIL, V. Z. O Programa LIXÃO ZERO: estratégias, limitações e desafios. **Rev. Adm. Munic**, p. 15-24, 2015.