

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

TESE DE DOUTORADO

**SERVIÇOS AMBIENTAIS HÍDRICOS DA ARENIZAÇÃO**

Jean Carlo Gessi Caneppele

Orientador: Prof. Dr. Roberto Verdum

Coorientadora: Profa. Dra. Lucimar de Fátima dos Santos Vieira

Porto Alegre, abril de 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

TESE DE DOUTORADO

**SERVIÇOS AMBIENTAIS HÍDRICOS DA ARENIZAÇÃO**

Jean Carlo Gessi Caneppele

Orientador: Prof. Dr. Roberto Verdum

Coorientadora: Profa. Dra. Lucimar de Fátima dos Santos Vieira

Tese apresentada no Programa de Pós-Graduação  
em Geografia como requisito para obtenção do  
título de Doutor em Geografia.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Andrey Binda

Prof. Dr. Pedro Antonio Roehle Reginato

Prof. Dr. Sidnei Bohn Gass

Porto Alegre, abril de 2023.

### CIP - Catalogação na Publicação

Caneppele, Jean Carlo Gessi  
Serviços Ambientais Hídricos da Arenização / Jean  
Carlo Gessi Caneppele. -- 2023.  
160 f.  
Orientador: Roberto Verdum.

Coorientadora: Lucimar de Fátima dos Santos Vieira.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de  
Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Areais. 2. Favorabilidade de Recarga. 3.  
Infiltração. 4. TEEB. I. Verdum, Roberto, orient. II.  
Vieira, Lucimar de Fátima dos Santos, coorient. III.  
Título.

### **Dedicatória**

Dedico esta tese aos 60.345.999 milhões de brasileiros que combateram o fascismo.

## **Agradecimentos**

Inicialmente gostaria de agradecer a população brasileira que paga os seus impostos permitindo a realização do doutorado de forma gratuita e em uma universidade pública, de excelência e sem balbúrdia.

Dentro da universidade, pude conhecer, conviver, trabalhar e produzir ciência com meus amigos e orientadores Roberto Verdum e Lucimar de Fátima dos Santos Vieira, os quais devo agradecer por toda a caminhada traçada, acompanhada de sorrisos e conhecimento, 12 anos ao lado do professor Verdum e 8 anos em conjunto com a Lucimar. Bons exemplos foram e continuam sendo.

Na caminhada da tese, agradeço aos professores que participaram da banca de qualificação e aos professores da banca final, contribuindo para enriquecer e melhorar o trabalho.

Além disso, agradeço ao biólogo Jackson Muller por acreditar no trabalho de um geógrafo e pelas bibliografias repassadas, a Giovanna Papi e Neemias da Silva pelo auxílio no mapeamento da arenização e aos amigos Hugo Kraemer e André Barreto Senna pelo suporte linguístico e pela amizade.

Tenho que agradecer a minha família, meus irmãos Bianca, Augusto e Carlos, minhas cunhadas Géssica e Valerie, meu pai Vanildo e, sobretudo a minha mãe Vera, que com seu exemplo de professora e mulher sempre me inspirou a estudar e a buscar conhecimento.

Por fim, agradeço do fundo do coração, a minha esposa Amanda Elizalde Martins que esteve do meu lado durante todo o percurso, me incentivando sempre, mesmo em momentos em que tive que me concentrar no trabalho e a Nina, nosso gato que contribuiu trazendo alegria e momentos de entretenimento.

## RESUMO

A arenização consiste em um processo natural que pode ser intensificado pelo inadequado manejo da terra, dando origem às feições erosivas de areais, ravinas e voçorocas. Dentro deste contexto, o processo foi e é visto como um problema ambiental, a tal ponto que as políticas públicas foram e, até hoje, são voltadas ao seu combate. Contudo, o Grupo de Pesquisas em Arenização/Desertificação: questões ambientais, UFRGS/CNPq, contrapõe essas concepções e práticas, demonstrando, ao longo de mais 35 anos de pesquisa, que a arenização é um processo único, um ecossistema com fauna e flora características associadas a esta, devendo o processo natural ser valorizado e não combatido, uma vez que é um prestador de serviços ambientais. Nesse sentido, destaca-se a relação locacional que a arenização possui com as áreas de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), funcionando como pontos de infiltração, filtragem e recarga no sudoeste do Rio Grande do Sul, prestando um importante serviço ambiental hídrico. Sendo assim, o objetivo do trabalho consistiu em valorar estes serviços, utilizando para isso a metodologia TEEB (*The Economics of Ecosystems and Biodiversity*), que consiste em calcular os custos necessários para a substituição do serviço por tecnologia. Para isso, foram identificados os serviços ambientais hídricos de favorecimento da infiltração, da recarga do aquífero e da filtragem de água, através da identificação de que a condutividade hidráulica nos areais é muito rápida e do mapeamento da favorabilidade da recarga, que cruzou as informações do meio que a favorecem e como estas estão relacionadas às feições erosivas, ressaltando que os areais, as ravinas e os ravinamentos foram caracterizados como pontos de recarga, enquanto as voçorocas como pontos de descarga. Dentro deste contexto, foi mapeada uma área de 4.884,28 ha de areais, além de 1.330,95 ha de ravinas e ravinamentos e 333,45 ha de voçorocas, bem como foram mapeadas três classes de favorabilidade à recarga nas áreas suscetíveis a arenização, sendo 40,06% classificadas como de muito alta favorabilidade, 23,44 % como de alta favorabilidade e 36,60% como de baixa favorabilidade. Nesse sentido, identificou-se que 54,7% dos focos de arenização se encontram nas áreas definidas como de muito alta favorabilidade de recarga e 22,9% como de alta favorabilidade. Além disso, foi estimada uma recarga de 14,37% da precipitação nas áreas suscetíveis à arenização, que variam de 1.400 mm a 1.900 mm/ano. Por fim, foi levantado o custo com tratamento de água de R\$ 0,85202/l. Estes dados serviram de base para valorar os serviços ambientais hídricos da arenização em R\$ 8,3 milhões/ano, considerando a precipitação anual de 1.400mm e R\$ 11,3 milhões/ano para uma precipitação de 1.900mm, através da multiplicação da área de arenização que recarrega, pelo valor estimado de recarga e pelo custo de tratamento. Estes valores demonstram a importância da preservação e da conservação da arenização, em função dos serviços ambientais prestados, destacando ainda, que outros serviços podem ser valorados, quando associados à biodiversidade e à beleza cênica da paisagem dos areais. Além disso, essa valoração traz subsídios para que possam ser traçadas e elaboradas políticas públicas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), promovendo acesso à renda aos produtores rurais, sobretudo os pequenos, que auxiliarem na proteção dos areais e dos elementos da natureza que os compõem.

**Palavras-Chave:** Areais, Favorabilidade de Recarga, Infiltração, TEEB.

## ABSTRACT

The *arenização* consists in a natural process that may be intensified by an inappropriate management of land, giving origin to erosive features called as *areais*, *ravinas e voçorocas*. The process was and has been seen as an environmental problem, with public political that were, and still are today focus on his combat. However, the group of research *Arenização/Desertificação: questões ambientais, UFRGS/CNPq*, oppose these conceptions and practices, demonstrating throughout over than 35 years of research, that *arenização* is a single process, an ecosystem with fauna and flora associated of them. The natural process must be valued and do not fought, once that is a provider of environmental services. The location of *arenização* is related as the places were happen the recharge of *Sistema Aquífero Guarani (SAG)*, functioning as infiltration points, as filter and recharge in southwest of *Rio Grande do Sul*, providing important hydric environmental services. The objective of work consisted in value these services by using the TEEB methodology (*The Economics of Ecosystems and Biodiversity*), which consists in calculate the costs needs to replace the service with technology. For that, has been identified the hydric environmental services as favoring of infiltration, aquifer recharge and water filter, through the hydraulic conductivity identification on the *areais* as very fast and the mapping of potential recharge, which crossed the information of geology, geomorphology and pedology which favor recharge and how those are related to erosive feature, emphasizing that the *areais*, *ravinas e ravinamentos*, were defined as recharge points, as the *voçorocas* as discharge points. Was mapped an area of 4.884,28 ha with *areais*, beyond 1.330,95 ha de *ravinas/ravinamentos* e 333,45 de *voçorocas* and also was mapped three class of potential recharge on susceptible areas of *arenização*, with 40,06% defined as higher potential of recharge, 23,44% as high potential and 36,60% as low potential. It was identified that 54,7% of *focos de arenização* are located in areas defined as higher potential of recharge and 22,9% as high potential. Besides that, has been estimated a recharge of 14,37% of precipitation on susceptible areas of sandzation, which range between 1.400 mm and 1.900 mm/year, as well. Also, was raised the cost of water treatment of R\$ 0,85202/l. These data served as the basis to value the hydric environmental services of *Arenização* in R\$ 8,3 million/year, considering the 1.400 mm annual precipitation and R\$ 11,3 million/year pour the 1.900 mm precipitation, through the multiplication of *arenização* areas that recharge by the value estimated of recharge and by the treatment cost. These values demonstrate an importance of sandzation preservation and conservation, in function of environmental services provides. It also highlights those others services may be valued, associated with biodiversity and landscape scenic beauty of *areais*. Besides that, the valuation provides subsidies so that they can be traced and elaborated publics political of Payment to Environmental Services, promoting access to income into the rural producer, in special, the little ones, who help in protect of *areais* and in elements of nature that compose.

**Keywords:** *Areais*, Recharge Potential, Infiltration, TEEB.

## RESUMÉ

*Arenização* agit d'un processus naturel qui peut être intensifié pour l'aménagement inapproprié de la terre, qui origine les entités érosives de tache de sable, des ravines et des ravins. Dans ce contexte, le processus fut et est traité comme un fléau environnemental, au point que les politiques publiques étaient, et y sont toujours, pour son combat. Cependant, le Group de Recherche em *Arenização/Desertificação: questões ambientais*, UFRGS/CNPq, s'oppose à cette pratique, en démontrant, sur plus de 35 ans de recherche, que la *arenização* est un processus unique, un écosystème avec la faune et la flore qui lui sont associées. Donc, ce processus doit être valorisé et n'est pas combattu, puis il est un fournisseur de services environnementaux. Il est souligné la relation entre la localisation de la *arenização* avec les zones de remplissage du Système Aquifère Guarani (SAG), en fonctionnant comme un point d'infiltration, filtration et remplissage dans le sud-ouest du Rio Grande do Sul, en y fournissant un important service environnemental hydrique. L'objectif du travail consistait à évaluer ces services en utilisant la méthodologie TEEB (*The Economics of Ecosystems and Biodiversity*), qui consiste à calculer les coûts nécessaires au remplacement du service par la technologie. Pour y aboutir, on a identifié les services environnementaux hydriques qui favorisent l'infiltration, le remplissage de l'aquifère et la filtration de l'eau, par l'identification de la conductivité hydraulique dans les taches de sable est trop rapide et par la cartographie de la favorabilité de leur remplissage, qui a croisé les informations sur le milieu qui les favorise et comme celle-ci est connectée aux entités érosives, soulignant que les taches de sable, les ravines et le ravinement ont été caractérisés comme point de remplissage, pendant que le ravin comme point de vidange. Dans ce contexte, a été cartographié une surface de 4.884,28 ha avec les taches de sable, plus 1.330,95 ha de ravines et 333,45 ha de ravin. Aussi, trois classes de favorabilité au sein des zones susceptibles à l'*arenização* ont été cartographiées, étant que 40,06% classifiées comme très grande favorabilité, 23,44% comme grande favorabilité et 36,60% comme de basse favorabilité. Nous avons identifié que 54,7% des taches de sable ont été localisées sur la classe très grande favorabilité de remplissage et 22,9% dans la classe grande favorabilité. En outre, ont été estimés un remplissage de 14,37% de la précipitation dans les zones susceptibles à l'*arenização*, dont les chiffres peuvent varier de 1.400 mm à 1.900 mm/an. À la fin, on a identifié le coût avec le traitement de l'eau en R\$ 0,85202/l. Ces données servent de base pour calculer les services environnementaux hydriques d'*arenização* en R\$ 8,3 million/an, avec la précipitation annuelle de 1.400 mm, et R\$ 11,3 million/an, avec la précipitation de 1.900 mm, par la multiplication de la surface de conservation de la *arenização* qui est remplie, pour la valeur estimée de remplissage et pour le coût de traitement. Ces valeurs montrent l'importance de la préservation et de la conservation de la *arenização*, surtout pour les services environnementaux fournis. On met en relief qu'il y a d'autres services qui peuvent être mis en valeur, quand associées à la biodiversité et à la beauté paysagère de la tache de sable. En outre, cette valorisation apporte des informations qui aident à élaborer des politiques publiques de paiement des services environnementaux en promouvant une source de revenu aux propriétaires ruraux, surtout les petits, qui aident à protéger les taches de sable et les éléments naturels qui y composent.

**Mots-clés:** Tache de Sable, Favorabilité de Remplissage, Infiltration, TEEB.



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1 Arenização .....	22
2.2 Serviços Ecossistêmicos e Ambientais .....	28
2.2.1 Valoração de serviços ambientais .....	31
2.3 Arenização: Processo natural de valorização dos serviços ambientais e ecossistêmicos.....	38
2.4 Relação Locacional entre a Arenização e as Áreas de Recarga do SAG.....	47
2.5 Recarga: Infiltração, Estimativas e Identificação de áreas de recarga.....	51
2.5.1 Infiltração .....	52
2.5.2 Recarga.....	54
2.5.3 Mapeamento de Áreas de Recarga .....	59
2.6 Aspectos geomorfológicos relacionados à recarga e arenização .....	62
2.7 Aspectos lito-estruturais relacionados à recarga do aquífero e arenização.....	64
2.8 Aspectos pedológicos relacionados à recarga do aquífero e arenização.....	67
2.9 Dinâmicas pluviométricas associadas à infiltração e recarga. ....	69
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	76
3.1 Mapeamento das feições arenosas. ....	76
3.2 Cálculo da condutividade hidráulica em Neossolos Quartzarênicos órticos .....	78
3.3 Estimativa da recarga em unidades hidroestratigráficas do Sistema Aquífero Guarani.....	81
3.4 Mapeamento das áreas favoráveis à recarga no SAG na área de ocorrência da arenização; .....	83
3.5 Aplicação da metodologia TEEB .....	86
4 RESULTADOS .....	87
4.1 Espacialização da Arenização.....	87
4.2 Condutividade Hidráulica nos Neossolos Quartzarênicos órticos .....	89
4.3 Estimativa de recarga nas áreas suscetíveis à arenização .....	96
4.4 Mapeamento da Favorabilidade à recarga na área de ocorrência da arenização. ....	112
4.5 Valoração dos Serviços Ambientais Hídricos da arenização.....	130
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	134
6. REFERÊNCIAS .....	139

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Municípios com mais efetivo de bovinos em cabeça de gado do Rio Grande do Sul. Em Sublinhado aqueles com focos de arenização.....	24
Figura 2 – Ravinamento em plantio de Eucalipto – São Francisco de Assis/RS .....	26
Figura 3 - Casos de Serviços Ambientais relacionados a água analisados por Landell-Mills e Porras (2002) .....	32
Figura 4 - Avaliação de serviços ecossistêmicos prestados pelas florestas tropicais a partir da metodologia TEEB.....	36
Figura 5 - Mapa dos municípios com focos de arenização.....	38
Figura 6 - Areais como portadores de belezas cênicas.....	45
Figura 7 - Sistema Aquífero Guarani (SAG) Confinado e Aflorante.....	48
Figura 8 - Mapa de Contorno Estrutural do Topo do Sistema Aquífero Guarani. ....	49
Figura 9 - Relação locacional entre as áreas de recarga e os focos de arenização. ....	51
Figura 10 – Sugestão de valores para o parâmetro $a^*$ , conforme estrutura e textura do solo .....	54
Figura 11 - Mecanismos de Recarga. ....	55
Figura 12 - Exemplo hipotético da elevação do nível d'água em resposta à precipitação. ....	57
Figura 13 - Poços da Rimas no Rio Grande do Sul em relação à possibilidade para águas subterrâneas. ....	58
Figura 14 - Bibliografia utilizada por Simon (2014) para definir o $S_y$ para a bacia hidrográfica do rio Ibicuí.....	59
Figura 15 - Distribuição da área do sistema aquífero Guarani, por estado. ....	59
Figura 16 - Classes de potencialidade a recarga do SAG.....	61
Figura 17 - Exemplo de Notas e Pesos atribuídos para determinar favorabilidade de recarga. ....	61
Figura 18 - Exemplo de Notas e Pesos atribuídos para determinar favorabilidade de recarga. ....	62
Figura 19 - Tipos climáticos na área de ocorrência da arenização.....	70
Figura 20 - Débitos climáticos e sua resposta nos reservatórios subterrâneos.....	73
Figura 21 – Hidrossistema da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu .....	74
Figura 22 - Fluxograma dos Procedimentos Metodológicos realizados.....	76
Figura 23 – Feições erosivas mapeadas: (A) Ravina; (B) Ravinamento; (C) Areal; (D) Voçoroca.....	78

Figura 24 - Modelo esquemático do procedimento realizado em campo.....	79
Figura 25 - Exemplo da determinação de $\Delta h$ realizado nos poços escolhidos.....	82
Figura 26 – Localização da arenização.....	88
Figura 27 - Áreas escolhidas para aplicação dos ensaios de infiltração.....	89
Figura 28 - Fotografia panorâmica do local em que foram realizados os ensaios, com destaque ao cerro Batovi na direita da fotografia. ....	90
Figura 29 - Areal (Redondo), onde foi realizado o ensaio de infiltração. ....	90
Figura 30 - Anel inserido no solo, com o primeiro tempo estimado, sendo posteriormente inserido mais 8 cm no solo para a segunda tomada de tempo.....	91
Figura 31 - Distribuição dos valores de umidade atual do solo, antes da medição da condutividade hidráulica, em solo sob pastagem e sem cobertura (Areal), em São Francisco de Assis - RS.....	93
Figura 32 - Distribuição dos valores de densidade do solo ( $D_s$ ) em solo sob pastagem e sem cobertura (areal), em São Francisco de Assis/RS. ....	94
Figura 33 - Distribuição dos valores da condutividade hidráulica do solo saturado ( $k_{sat}$ ) em solo sob pastagem e sem cobertura, em São Francisco de Assis - RS .....	95
Figura 34 - Localização dos Poços de Monitoramento nas Áreas suscetíveis à arenização. ....	96
Figura 35 - Perfis geológicos dos poços de monitoramento nas áreas suscetíveis a arenização. ....	98
Figura 36 - Distribuição da precipitação na área de ocorrência da arenização e das estações pluviométricas. ....	99
Figura 37 - Cruzamento de dados para o mapa de favorabilidade de recarga.....	112
Figura 38 – Formas de Relevo no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul. ....	114
Figura 39 – Formas de Relevo no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul. ....	116
Figura 40 - Litologia no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul. ....	118
Figura 41 - Hidrogeologia no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul.....	120
Figura 42 – Características dos Sistemas Aquíferos no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul.....	121
Figura 43 - Solos na área de ocorrência da arenização.....	123
Figura 44 - Rede hidrográfica.....	124
Figura 45 - Áreas elevadas em relação às nascentes. ....	125
Figura 46 - Favorabilidade a recarga nas áreas suscetíveis a arenização, a partir das variáveis do meio pedológico, geomorfológico e geológico. ....	127

Figura 47 - Favorabilidade a recarga nas áreas suscetíveis a arenização. ....	129
Figura 48 - Custo pela água por estado. ....	131
Figura 49 – Custos com água nas regiões brasileiras entre 2013 e 2017 .....	131

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fases de intervenção no processo de arenização .....	27
Quadro 2 - Categorias de Serviços Ecossistêmicos.....	29
Quadro 3 - Serviços Hidrológicos definidos por Brauman <i>et al.</i> , (2007).....	30
Quadro 4- Autores e temas estudados acerca da arenização. ....	41
Quadro 5 - Características do Tremoço.....	43
Quadro 6 - Funções dos Aquíferos .....	46
Quadro 7 - Trabalhos que utilizaram o método VNA. ....	56
Quadro 8 - Tipos de Clima da área de ocorrência da arenização e Pluviometria Anual.	71
Quadro 9 - Pluviometrias anuais identificadas por autores na área de ocorrência da arenização. ....	75
Quadro 10 - Informações coletadas durante o trabalho de campo. ....	79
Quadro 11 - Informações tabuladas em laboratório. ....	80
Quadro 12 - Classificação dos Valores de Ksat, de acordo com Reichardt (1978).....	81
Quadro 13 – Condicionantes geológicos e hidrogeológicos do meio associados à recarga do aquífero.....	84
Quadro 14 – Condicionantes geomorfológicos do meio associados à recarga do aquífero .....	85
Quadro 15 – Condicionantes pedológicos do meio associados à recarga do aquífero... 85	
Quadro 16 – Classes de Favorabilidade à recarga a partir do cruzamento das informações do meio .....	86
Quadro 17 - Informações coletadas durante os ensaios de infiltração realizados em campo, 27/08/2021. ....	92
Quadro 18 - Características dos poços de monitoramento (PMs) do estudo.....	97
Quadro 19 - Informações das estações pluviométricas próximas aos PMs.....	98
Quadro 20 - Poços de Monitoramento e intervalo de tempo analisados. ....	99
Quadro 21 - Resultados do cálculo de recarga para o PM Puitã. ....	103
Quadro 22 - Resultados do cálculo de recarga para o PM Puitã. ....	105
Quadro 23 - Resultados do cálculo de recarga para o PM São Carlos. ....	107
Quadro 24 - Resultados do cálculo de recarga para o PM Estação Agrícola. ....	109
Quadro 25 - Resultados do cálculo de recarga para o PM Passo do Meio. ....	111
Quadro 26 - Resumo das estimativas de recarga nos poços monitorados na área de ocorrência da arenização. ....	111
Quadro 27 - Mês e estação em que houve recarga nos poços monitorados. ....	112

Quadro 28 - Formas de Relevo no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul.....	113
Quadro 29 – Área em hectares de acordo com a feição erosiva, sua porcentagem em relação ao total e sua localização frente às classes de favorabilidade de recarga. ....	126
Quadro 30 - Área em hectares de acordo com a feição erosiva, sua porcentagem em relação ao total e sua localização frente às classes de favorabilidade de recarga e descarga. ....	128
Quadro 31 - Custos com água por litro e por m <sup>3</sup> . ....	132

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Flutuação Mensal no PM Miracatu (dezembro/2018 a março/2022) x precipitação mensal da estação Ponte Miracatu .....	100
Gráfico 2 - Flutuação do PM Reservatório da Corsan (abril de 2016 a julho de 2018) x precipitação mensal da estação Jacaquá. ....	101
Gráfico 3 - Flutuação do PM Reservatório da Corsan (dezembro de 2020 a março de 2022) x precipitação mensal da estação Jacaquá. ....	101
Gráfico 4 - Flutuação do PM Puitã (outubro de 2010 a setembro de 2015) x precipitação mensal da estação Cachoeira Santa Cecília. ....	102
Gráfico 5 - Flutuação do PM Puitã (abril de 2019 a março 2022) x precipitação mensal da estação Cachoeira Santa Cecília .....	104
Gráfico 6 - Flutuação do PM São Carlos (abril de 2011 a agosto de 2015) x precipitação mensal da estação São Carlos. ....	106
Gráfico 7 - Flutuação do PM Estação Agrícola (junho de 2012 a dezembro de 2017) x precipitação mensal da estação São João. ....	108
Gráfico 8 - Flutuação do PM Passo do Meio (dezembro de 2015 a agosto de 2018) x precipitação mensal da estação Caty. ....	110

## LISTA DE SIGLAS

BHAM – Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu  
CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  
COFECUB – Comitê Francês de Avaliação da Cooperação Universitária com o Brasil  
CPRM – Serviço Geológico do Brasil  
ESO – *Laboratoire Espace Société* – Le Mans Université – França  
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto  
FEPAGRO – Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, Rio Grande do Sul  
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada  
QUALPROSUL – Qualidades dos Produtos da Territorialização no Rio Grande do Sul  
MDE – Modelo Digital de Elevação  
NE – Nível Estático  
PSAH – *Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos*  
POSGEA – Programa de Pós-graduação em Geografia  
PM – Poço de Monitoramento  
PSA – Pagamento por Serviços Ambientais  
RIMAS – Rede Integrada de Monitoramento de Água Subterrânea  
SA – Serviços Ambientais  
SAG – Sistema Aquífero Guarani  
SIG – Sistema de Informações Geográficas  
SPF – *Simplified falling-head*  
TEEB – *The Economics of Ecosystems and. Biodiversity*  
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
VNA – Variação do Nível de Água  
WTF – *Water Table Fluctuation*



# 1 INTRODUÇÃO

O processo de arenização é estudado há mais de 35 anos pelo grupo de pesquisa Arenização/desertificação – questões ambientais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – (UFRGS), com destaque para a tese de Suertegaray (1987) que conceitua a arenização associada a uma gênese natural, desmistificando o mito da existência da desertificação. Além dessa, a tese de Verdum (1997) que identifica a intensidade das áreas hidrometeorológicas e o processo sendo intensificado pelo inadequado manejo agrícola, em função das fragilidades do meio.

No início da década de 1970, as manchas de areia (areais) encontradas no oeste e sudoeste do estado do Rio Grande do Sul foram conceituadas como desertificação, com o pensamento de que os processos erosivos foram gerados a partir da entrada do maquinário para o cultivo de soja e de trigo, porém, este conceito foi e continua sendo refutado pelo grupo de pesquisa. Os estudos iniciados por Suertegaray (1987) e Verdum (1997), assim como os trabalhos que os seguiram na temática, demonstraram que a arenização consiste em um processo natural que pode ser gerado e intensificado pela sucessão de modelos de exploração agrícola, pelas diversas sociedades humanas que se instalaram e produziram nesse espaço.

O processo não pode ser considerado como desertificação, pois o fenômeno que ocorre na região não se enquadra na classificação climática de áreas de risco à desertificação, em função das altas pluviosidades registradas (SUERTEGARAY, 1987; VERDUM, 1997; SANCHES, 2013; BINDA, 2016). Além disso, os areais se constituem em ecossistemas testemunhos de um passado climático recente, com registros arqueológicos que demonstram que populações nativas coabitaram com os areais (BELLANCA, 2002), portanto, o seu surgimento não está vinculado inicialmente as dinâmicas sociais, mas sim às dinâmicas geológicas recentes que geraram formações superficiais arenosas que se constituem no substrato básico da arenização.

Segundo Suertegaray (2012) as feições da arenização possuem um padrão de localização, associadas às cabeceiras de drenagem e às rampas arenosas ancoradas em relevos testemunhos, característicos da região de ocorrência da arenização. Os solos característicos são os Neossolos Quartzarênicos órticos, que se constituem em solos novos e rasos, bem drenados e que possuem altas taxas de infiltração, com elevada condutividade hidráulica, facilitando a lixiviação. Este solo possui um potencial e um

limitante que determina a vegetação herbáceo-arbustiva, predominante no e do Bioma Pampa.

Nesse sentido, cabe ressaltar que historicamente a área onde ocorre o processo de arenização é essencialmente pastoril, inserida no Bioma Pampa e que, segundo Teixeira Filho e Winkler (2020), possui potenciais e fragilidades, tais como: as áreas de arenização, o afastamento do ser humano do campo, e no campo, com a inserção de monocultivos arbóreos sobre áreas dos agricultores ou comprando terras; além da inserção de monocultivos agrícolas em lavouras temporárias, sobretudo, o cultivo da soja.

A estrutura fundiária da região é baseada em grandes propriedades rurais – acima de 500 ha – e atividade de criação extensiva. Segundo Verdum (2012), após a década de 1970, ocorre a entrada de cultivos temporários, principalmente os monocultivos de trigo, de milho e de soja, além da mecanização do cultivo de arroz existente desde a década de 1920. A soja, o trigo e o milho foram introduzidos nas coxilhas<sup>1</sup>, com a conversão dos campos em áreas de lavoura, enquanto o arroz foi e é plantado em detrimento das matas galerias localizadas nas planícies aluviais.

A partir da década de 1980, a área destinada ao uso histórico da pecuária vem paulatinamente diminuindo. Já na última década (2010 a 2020), uma nova mudança no uso e na ocupação da terra tem chamado a atenção do grupo de pesquisa, causada pela chegada de um tipo de produtor advindo de municípios do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul. Estes novos produtores compram ou arrendam terras para o cultivo, sobretudo da soja, além de diversificar a produção nas propriedades e inserir novas técnicas como a irrigação, a partir de pivôs centrais e de controle de processos erosivos, seguindo também a lógica de combate à arenização, implicando com isso em modificações na paisagem. Estas dinâmicas também vêm causando uma modificação no perfil dos produtores rurais, seja através da saída dos produtores pecuaristas tradicionais e entrada destes novos produtores, seja através da venda das propriedades para plantio de eucalipto, com a respectiva mudança do espaço rural na região (SUERTEGARAY *et al.*, 2001; DE NARDIN, 2009; SUERTEGARAY *et al.*, 2012; OKIDO, 2016).

A partir da década de 2000, verifica-se a implantação de monocultivos arbóreos, capitaneados pela empresa sueco-finlandesa *Stora Enzo*, sobretudo em áreas com focos

---

<sup>1</sup> Denominação local para Colinas.

de arenização que são tratadas como “problemas ambientais”, enquanto a silvicultura é vista como a solução técnica para estes “problemas” (RIBEIRO e VERDUM, 2017).

Nesse sentido, ressalta-se que desde a década de 1970, os processos erosivos são vistos como áreas não produtivas, do ponto de vista econômico, e técnicas de combate a estes foram inseridas na tentativa de reaproveitamento produtivo destas áreas, principalmente através da inserção do monocultivo arbóreo de eucalipto em escala comercial, balizados por políticas públicas que encontram forte respaldo no discurso de “combate” à arenização (SUERTEGARAY, 1987; VERDUM, 1997; RIBEIRO, 2015).

Nesse contexto, o grupo de pesquisa buscou técnicas que não visavam o “combate” à arenização, mas sim o controle de sua expansão e/ou a sua recuperação, através de trabalhos como os de Suertegaray *et al.*, (1989), Suertegaray (1994), Verdum (2001), que utilizaram anteparos físicos, telas e barreiras vegetais para controle do escoamento hídrico, a cobertura do solo com restos de vegetais e o plantio de espécies florestais. Trindade (2003) e Freitas (2006) indicam a exclusão do gado no entorno dos areais, o que pode ser uma alternativa eficaz para a revegetação por espécies naturais do entorno. Rovedder (2007) utilizou a espécie *Lupinus albus* (Tremoço), identificando-a como uma importante incorporadora de Nitrogênio ao solo, efetuando a ciclagem de nutrientes e a produção de matéria seca, funcionando como uma espécie pioneira. Vieira (2012), Vieira *et al.*, (2016) e Vieira (2018) utilizaram de técnicas mecânico-vegetativas levando à criação de um banco de sementes de espécies vegetais com potencial de colonização da arenização, além da utilização de técnicas de restauração ecológica, como galharia, transposição de solo, utilização de mantas biotêxteis, assim como o plantio de espécies exóticas (Capim Vetiver).

Considerando que a arenização é um processo natural, podem ser buscadas alternativas que permitam a manutenção dos areais e a sua valorização enquanto patrimônio natural (contexto pedológico, geológico, geomorfológico, paisagístico e de flora e fauna) e, não necessariamente o seu combate. Dentro deste contexto, destaca-se a relação de localização entre os focos da arenização e as áreas de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), uma vez que ambos estão associados às formações Botucatu e Guará, que se constituem em estruturas de cunho sedimentar e como tal, são importantes reservatórios hídricos, em quantidade e qualidade da água. Além disso, os areais são subprodutos do intemperismo dessas formações e se mantêm em plena dinâmica erosiva-deposicional, associadas às altas pluviosidades na região. Ao mesmo

tempo se tornam importantes pontos de recarga em superfície e em subsuperfície (VERDUM, 1997; MACHADO, 2005; CPRM, 2006; CPRM, 2012.).

A relação das áreas de recarga do SAG com a arenização pode ser utilizada na busca de subsídios para a valorização e a manutenção dos areais ou focos de arenização (ravinas e voçorocas), considerando-as como pontos de recarga e filtragem de água. Portanto, o presente trabalho está inserido em uma nova temática, com a mudança do discurso de combate, utilizando um paradigma que mantém os areais como sendo de origem de processos naturais, passíveis de serem conservados, a partir dos serviços ambientais/ecossistêmicos que eles prestam. Propõem-se, assim, a valorização dos serviços ambientais hídricos prestados pela arenização, funcionando como áreas de recarga de água do SAG e possibilitando a infiltração que não contamine ou que atenua a contaminação dessa importante riqueza natural<sup>2</sup>.

A inserção dos Serviços Ambientais no âmbito da arenização é decorrente do fato desta pesquisa estar inserida no convênio de parceria CAPES/COFECUB, entre o PPG de Geografia (POSGEA-UFRGS) e o *Laboratoire Espace e Société (ESO), Le Mans Université*, denominado: *Qualidades dos Produtos da Territorialização no Rio Grande do Sul – QUALPROSUL*. O referido projeto possui três eixos de pesquisa, sendo que um deles é o de Serviços Ecossistêmicos. Neste eixo, busca-se 1) mapear as fragilidades pedo-vegetais, 2) identificar as áreas protegidas no Pampa e o que elas são atualmente, 3) responder sobre as questões acerca da cobertura vegetal: pasto “nativo” e pastagens “exóticas” e 4) trabalhar na relação entre o uso, e a cobertura da terra e a gestão da água, o qual o presente trabalho se vincula.

Nesse sentido, cabe nos perguntar: Quais são os serviços ambientais prestados pela arenização? Se esses serviços ambientais podem ser identificados ou até mesmo quantificados? Quais parâmetros podem ser utilizados para a mensuração dos serviços ambientais? Quais mecanismos ou instrumentos podem ser utilizados para possibilitar a conservação/preservação da arenização e assim entendê-los como espaços de recarga hídrica de interesse quali-quantitativo?

Portanto, na presente tese se objetiva valorar os Serviços Ambientais Hídricos prestados pela arenização, com suas feições correlatas que se constituem em pontos de recarga hídrica, em superfície e como filtradores em subsuperfície, no contexto espacial do SAG.

---

<sup>2</sup> Assim como Rodrigues (2005), utiliza-se no texto o termo “riquezas naturais” e não “recursos naturais”, pois este caracteriza a natureza como mercadoria.

Os objetivos específicos consistem em 1) Compreender a dinâmica locacional do processo de arenização e a prestação de serviços ambientais de forma contínua; 2) Identificar serviços ambientais de filtragem da água a partir do cálculo da condutividade hidráulica; 3) Reconhecer a relação da recarga do SAG e a área de ocorrência da arenização; 4) Relacionar as áreas de recarga e a área da arenização; 5) Identificar os Serviços Ambientais hídricos da arenização.

A tese está dividida em três capítulos, iniciando com o referencial teórico construído em nove subcapítulos, visando à estruturação dos procedimentos metodológicos que consistem no segundo capítulo do trabalho. O terceiro capítulo apresenta o debate e os resultados do trabalho, dando destaque aos Serviços Ambientais Hídricos valorados e associados aos areais.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O referencial teórico inicia com o subcapítulo 1) acerca do processo de arenização; 2) O segundo subcapítulo trata da temática de serviços ambientais/ecossistêmicos; 3) O terceiro subcapítulo discorre sobre os potenciais serviços ambientais/ecossistêmicos da arenização; 4) O quarto subcapítulo trata da relação locacional entre a arenização e as áreas de recarga do SAG. Posteriormente, foram tratados em cinco subcapítulos; 5) Recarga: Infiltração, Estimativa e Área de Recarga; 6, 7 e 8) Os fatores do meio relacionados à infiltração e à recarga; 9) As dinâmicas pluviométricas associadas à recarga hídrica;

### **2.1 Arenização**

Os debates associados à arenização/desertificação iniciam na década de 1970, e ganham destaque, sobretudo através do trabalho de Souto (1985) e do impacto da mídia que contribuiu com o mito da desertificação, propagando a ideia de que as manchas de areias que existiam no oeste e sudoeste do Rio Grande do Sul avançariam pelo Rio Grande do Sul, associadas à localização da formação Botucatu, transformando-se em um grande deserto. Vincularam-se, na época, os areais à existência de desertos e da desertificação. Segundo Suertegaray (2020, p. 119):

Nesse período, difundem-se trabalhos e reportagens, que tratam do fenômeno visualizado como deserto e do processo, como desertificação, associando os referidos processos às atividades humanas, seja à pecuária, através do sobrepastoreio, seja à agricultura, através da expansão da lavoura de soja e da chegada da mecanização.

Dentro deste contexto, o trabalho de Suertegaray (1987) se torna pioneiro, uma vez que contrapõe o conceito de desertificação e cria o conceito de arenização consistindo no “retrabalhamento de depósitos arenosos pouco ou nada consolidados e que promove, nessas áreas, uma dificuldade de fixação da vegetação devido à constante mobilidade dos sedimentos” (SUERTEGARAY, 1987 p.112). Suertegaray e Verdum (2008) ampliaram o conceito, como:

“O retrabalhamento desses depósitos, no caso de formações superficiais, provavelmente quaternárias, resultou de uma dinâmica morfogenética onde os processos hídricos superficiais, particularmente o escoamento concentrado do tipo ravina ou voçoroca, associados às chuvas torrenciais, expõe, transporta e deposita areia, dando origem à formação de areais que, em contato com o vento, tendem a uma constante remoção.” (SUERTEGARAY, VERDUM 2008).

Os areais, são, portanto, superfícies arenosas, sem ou com baixa cobertura vegetal, possuindo origem natural, podendo ser gerado ou intensificado pelas atividades humanas, sejam agrícolas, sejam pastoris (SUERTEGARAY, 1987, SUERTEGARAY, 2020.)

As principais técnicas que acarretaram a intensificação dos processos erosivos consistem na entrada de maquinário para os cultivos de soja, de trigo e de milho e no sobrepastoreio do gado, a partir do aumento/manutenção do número de cabeças de gado e da diminuição da área destinada ao pastejo. A intensificação desses cultivos é acompanhada por pressões sobre as riquezas hídricas e sobre os solos, que são particularmente sensíveis à erosão (CORBONNOIS *et al.*, 2014).

Segundo Verdum (2012) 70% das coxilhas são cobertas por vegetação herbácea e as sociedades ali instaladas agem sobre a cobertura vegetal, através de três formas características: a supressão da vegetação campestre, o sobrepastoreio e um sistema de cultivos. Estas ações nem sempre são favoráveis à conservação dos solos (Verdum 2012, p. 44).

A entrada do maquinário decorre da mudança da matriz produtiva, através da inserção de diferentes cultivos no bioma Pampa, sendo uma das principais consequências de sua alteração e supressão. Iniciada a partir da década de 1970, a agricultura tem nos monocultivos de soja, trigo e milho as principais causas de conversão de áreas de pecuária em áreas destinadas à agricultura, muito em função dos espaços abertos que permitiam a exploração extensiva, através do maquinário pesado (SUERTEGARAY *et al.*, 2001; MÓSENA, 2006; DE NARDIN, 2009; VERDUM, 2012).

O aumento da área destinada aos cultivos temporários está associado à mecanização das práticas agrícolas e políticas governamentais de estímulo à exportação, com a introdução dos cultivos do trigo e da soja e a modernização do cultivo de arroz. Com isso, ocorreu um aumento da produção agrícola, principalmente entre 1950 e 1985, identificado por Suertegaray *et al.*, (2001), culminando no aumento dos processos erosivos.

A inserção dos cultivos temporários se deu e ainda ocorre, principalmente sobre as áreas que antes eram utilizadas pela pecuária extensiva, em áreas de campo nativo ou de pastagens artificiais. Cabe ressaltar que a pecuária extensiva segue como o uso mais representativo na região, mas com área total diminuindo ao longo dos últimos anos, em

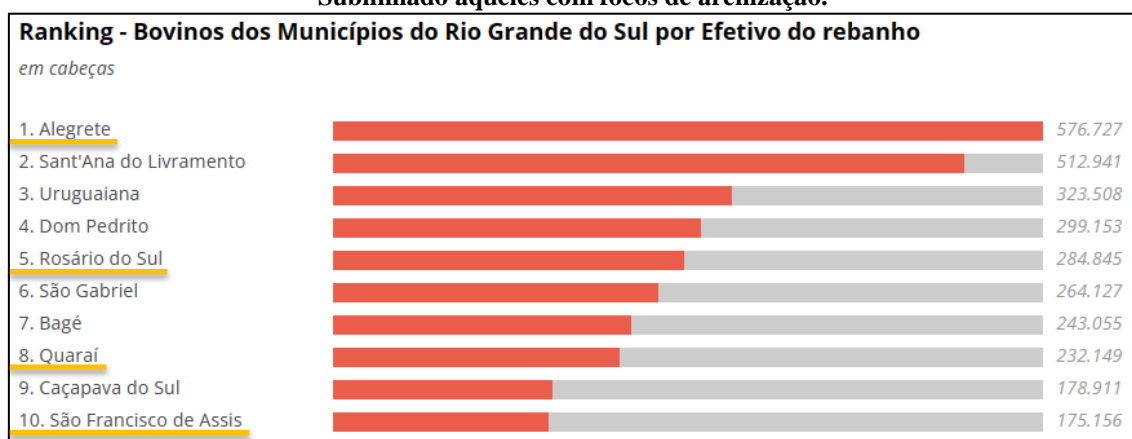
contraponto com o aumento das áreas destinadas à lavoura (SUERTEGARAY *et al.*, 2001; DE NARDIN, 2009; OKIDO, 2016; IBGE, 2017).

De acordo com Silva (2017) a conversão gradativa dos campos em outro tipo de uso da terra gera a perda de habitats e a redução das espécies de fauna e flora, associadas à contaminação do solo, da água (superficial e subterrânea) e dos alimentos, resultantes da utilização de insumos agroquímicos.

A mecanização foi facilitada pelo relevo suave das coxilhas, associado aos solos arenosos que são facilmente arados. A introdução das técnicas com maquinaria pesada deu-se principalmente por “novos exploradores” vindos do norte do Pampa, isto é, do Planalto Meridional do estado do Rio Grande do Sul, através do arrendamento ou compra de propriedades, acentuando a pressão sobre os solos frágeis e a vegetação herbáceo-arbustiva (VERDUM, 2012). Por utilizar maquinaria pesada, em sua maioria, criam-se sulcos e canais preferenciais que condicionam o escoamento, o que poderá dar início ao processo de ravinamento. Além disso, reduz-se a área de pecuária, mas não se reduz o contingente de animais, elevando-se assim a pressão sobre os campos, através do sobrepastoreio (VERDUM, 1997; SUERTEGARAY *et al.*, 2001; VERDUM 2012.).

O sobrepastoreio é caracterizado pelo aumento da densidade de bovinos por hectare (em uma relação de aumento do número de cabeças de gado e da diminuição da área destinada à pecuária) que ocorre devido ao aumento da superfície destinada aos cultivos temporários, em áreas que antes eram utilizadas pela pecuária. Nesse sentido, destacam-se os resultados do Censo Agropecuário de 2017 que colocam quatro municípios com focos de arenização entre os possuidores dos 10 maiores rebanhos entre os 497 municípios do Rio Grande do Sul.

**Figura 1 - Municípios com mais efetivo de bovinos em cabeça de gado do Rio Grande do Sul. Em Sublinhado aqueles com focos de arenização.**



Fonte: IBGE (2017)



Paralelamente ao sobrepastoreio, ocorre a inserção de espécies de pasto artificiais com a gestão das pastagens, ocorrendo através da prática de queimada. Segundo Verdum (2012) em sua maneira tradicional, a pecuária utiliza as técnicas de queimada, limpeza e rebrote do campo, o que reduz a biomassa e aumenta a exposição dos solos aos efeitos da torrencialidade, isto é, das chuvas concentradas, e dos efeitos morfogenéticos.

Acompanhado ao conceito de desertificação, veio o discurso de combate aos areais, vistos também como desertos e áreas degradadas, sobretudo através do plantio de exóticas. Dentro deste contexto, segundo Ribeiro e Verdum (2013) a arenização é apontada como principal processo de degradação ambiental do Sudoeste do Rio Grande do Sul, enquanto a silvicultura foi privilegiada como a solução técnica nas políticas ambientais públicas e privadas.

Além disso, o mito da desertificação é criado, com a sua difusão associada às diferentes fases do processo, descritas por Mainguet (1994). A fase um (1) consiste na percepção exagerada do processo; a fase dois (2) consiste no mito do crescimento dos desertos em qualquer área do mundo, inclusive no Rio Grande do Sul.

Dentro deste contexto, destaca-se o já citado trabalho de Souto (1985) que, pelo alarmismo dado à questão de expansão das manchas arenosas, propôs a sua mitigação através do plantio de eucalipto, sendo ele o responsável pelo Plano Piloto no Deserto São João em Alegrete. O Plano é executado com vistas ao combate aos “desertos”, sobretudo em relação à urgência dada pela Conferência das Nações Unidas sobre Desertificação.

O referido plano consistiu na instalação de quebra-ventos e o plantio de espécies arbóreas e arbustivas, leguminosas e gramíneas, tendo como a principal conclusão de que o eucalipto é a melhor espécie a se desenvolver sobre os areais (RIBEIRO E VERDUM, 2013; RIBEIRO E VERDUM, 2017).

Entre os anos de 1980 e 1990, novas tentativas de inserção da silvicultura nos areais são realizadas, com o plantio de acácia-negra e eucalipto, com o discurso pautado no combate aos “desertos”, sendo distribuídas mudas de eucalipto pela Secretaria Estadual de Agricultura e Emater. Durante este período, são fortalecidas as estruturas estaduais e privadas no “combate” aos então chamados “desertos”, com a adoção do paradigma criado pelo Plano Piloto de Alegrete, preconizando o plantio de eucalipto nas áreas com arenização (RIBEIRO e VERDUM, 2013; RIBEIRO E VERDUM, 2017).

Na década de 2000, inicia-se a inserção do cultivo de espécies arbórea no oeste e sudoeste do Rio Grande do Sul, capitaneada pela empresa sueco-finlandesa *Stora Enso*<sup>3</sup>. A implantação do monocultivo arbóreo, principalmente do Eucalipto *sp*, é decorrente de políticas públicas que encontram forte respaldo no discurso de recuperação de áreas degradadas e de aproveitamento financeiro desses locais, uma vez que, eles têm baixo preço de aquisição e foram compradas ou arrendadas pela empresa (MORELLI, 2011; RIBEIRO, 2015). Essa inserção ocorre, “não com o propósito de recuperar as áreas, mas inseri-las em uma nova matriz econômica com a introdução da silvicultura para fins industriais” (RIBEIRO, 2015, p.14).

O cultivo de eucalipto encontra respaldo nas políticas públicas, entretanto, não possui real eficácia no “combate” a arenização, principalmente em relação ao escoamento concentrado, especialmente os ravinamentos, bem como não são sustentáveis do ponto de vista ecológico. O plantio sobre areais não impede o processo de escoamento difuso, concentrado e a mobilização de sedimentos (CANEPPELE, 2017). Na Figura 2 é possível visualizar um ravinamento que existia anteriormente ao plantio de eucalipto e mesmo após cerca de três anos do plantio, não teve seus efeitos reduzidos.

**Figura 2 – Ravinamento em plantio de Eucalipto – São Francisco de Assis/RS**



**Fonte: Caneppele, 2017.**

---

<sup>3</sup> Segundo Morelli (2011) a empresa investiu na aquisição de aproximadamente 100.000 hectares de terras para implantação de suas bases florestais.

Além disso, destaca-se neste período, a proliferação de sistemas agrossilvipastoris, com a silvicultura não fazendo parte única da solução, mas sim de um sistema agrícola adaptado aos solos frágeis e a tradição pecuarista (RIBEIRO e VERDUM 2017).

Por fim, Ribeiro e Verdum (2017) destacam que, após a década de 2000, preconizou-se o plantio de eucalipto como técnica de controle aos processos da arenização, baseadas em recomendações de que esta seria a única alternativa viável para o estabelecimento de cobertura vegetal, estabilizando núcleos de arenização e controlando processos erosivos (VIEIRA, 2018).

Em sua tese de doutorado, Ribeiro (2015) demonstrou que nas políticas públicas acerca da arenização, consolidou-se um ideário favorável aos interesses privados, sobretudo da silvicultura. Através da Teoria da Análise do Discurso demonstrou as diferentes fases de intervenção no processo de arenização, conforme Quadro 1.

**Quadro 1 – Fases de intervenção no processo de arenização**

<b>Fase</b>	<b>Período</b>	<b>Características</b>
I	1975-1987	Caracterizada pelo fatalismo e pela percepção exagerada em relação ao processo de arenização.
II	1987-1992	Protagonismo da Iniciativa Privada nas políticas voltadas à arenização.
III	1992-2003	Busca pelo conhecimento acerca dos areais e ausência de intervenções no processo.
IV	2003-atual	Consolidação de bases florestais na região de ocorrência dos areais.

**Fonte: Adaptado de Ribeiro (2015).**

A implantação de monocultivos arbóreos fomenta a discussão na área ambiental, pautada de um lado pelo viés agrônomo de implantação do cultivo para posterior utilização industrial. Ignora-se, inclusive, a vegetação herbáceo-arbustiva natural, numa visão conservacionista do Pampa e os areais como relictos de climas passados, com fauna e flora endêmica a eles associados.

Nesse sentido, as políticas públicas adotaram um viés naturalista/científico que caracteriza a arenização como uma anomalia ambiental e a partir de um discurso pseudo-conservador da necessidade de preservação do solo, sob pretexto de recuperar a

natureza. Conserva-se, assim, apenas a sua capacidade econômica e não as suas reais funções ecológicas.

## 2.2 Serviços Ecosistêmicos e Ambientais

O conceito de Serviços Ecosistêmicos surgiu a partir do movimento ambientalista estadunidense e foi utilizado pela primeira vez na década de 1960 por Helliwell (1969), além disso, em 1977 surge a ideia de Serviços da Natureza como o valor social dos benefícios fornecidos pelos ecossistemas. Na década de 1970 surge o conceito de Capital Natural, considerado o estoque natural que gera um fluxo de bens e serviços úteis ou rentáveis à sociedade ao longo do tempo (WESTMAN, 1977; HERMANN *et al.*, 2011; CAMPANHA *et al.*, 2019; MULLER, 2022).

Nesse sentido, dentro da temática dos serviços prestados pela natureza, que são apropriados pelas sociedades humanas, existem quatro principais definições: serviços ambientais, serviços ecosistêmicos, serviços ecológicos, serviços naturais ou capital natural. O termo **capital natural** é vinculado aos economistas, tratando a natureza como recurso e estoque, se tornando capital natural apenas se for utilizado pelas sociedades humanas.

Os **serviços ecológicos** são definidos por Bensusan (2008, p. 229) como “[...] os processos de transferência da natureza para um processamento humano posterior de matéria, energia e informação, que proporcionam condições para a manutenção de nossa espécie.” Argumenta ainda que os serviços “[...] não possuem etiqueta de preço, mas são extremamente valiosos e caros”. Ao definir serviços ecológicos, ocorre a crítica à valoração da natureza, porém, nesse trabalho não será considerado a natureza como algo a ser valorado, mas sim o trabalho de conservá-la.

Os **Serviços Ecosistêmicos** são elencados a partir das funções ecosistêmicas que possuem valor para a sociedade, que são fundamentalmente diferentes das riquezas naturais, pois só para os serviços ecosistêmicos é possível estipular taxas (MATTOS *et al.*, 2009). Os **Serviços Ambientais** estariam mais focados nos benefícios percebidos pelo ser humano, condicionados às atividades humanas, tais como recuperar, manter ou melhorar a produção dos Serviços Ecosistêmicos, que estariam mais focados nos processos que os produzem, tais como: água limpa, madeira, habitat para peixes e polinização de plantas nativas e cultivadas (RUDOLF *et al.*, 2002; ANA, 2019).

A Avaliação Ecosistêmica do Milênio (2005) definiu quatro categorias de serviços ecosistêmicos, elencados no Quadro 2, dando destaque aos serviços de

regulação, vinculados à água e às áreas úmidas, em locais que oferecem abastecimento, regulação, purificação e reposição de águas subterrâneas, bem como tratamento de águas residuais (VÖRÖSMARTY *et al.*, 2010; BRINK *et al.*, 2013).

**Quadro 2 - Categorias de Serviços Ecossistêmicos.**

<b>Serviços de Provisão/Produção/Aprovisionamento/Abastecimento</b>	Alimentos, fibras, recursos genéticos, produtos bioquímicos, remédios naturais, produtos farmacêuticos, água e recursos genéticos.
<b>Serviços de Regulação</b>	Filtração de poluentes pelas áreas úmidas, regulação climática, da qualidade do ar, climática, hídrica, da erosão, de doenças, de pragas, purificação da água e tratamento de resíduos, polinização e proteção contra desastres.
<b>Serviços Culturais</b>	Recreação, valores espirituais, religiosos, estéticos, educação, patrimônio e ecoturismo.
<b>Serviços de Suporte</b>	Formação de solo, fotossíntese e ciclagem de nutrientes.

**Fonte: Avaliação Ecossistêmica do Milênio (2005).**

O conceito utilizado nesse trabalho é o de Serviços Ambientais compreendidos como os benefícios diretos e indiretos, gerados pelos ecossistemas, envolvendo a capacidade da natureza continuar reproduzindo e mantendo as condições ambientais, que dão base para a sustentação, bem como a infraestrutura, recuperação e manutenção da vida no planeta e para todas as espécies nele existentes (DAILY, 1997; BORN E TALOCCHI, 2002; MERICO, 2009).

Os **Serviços Ambientais** podem ser prestados através da educação ambiental, do reflorestamento nativo, da recuperação da mata ciliar, da construção de fossas sépticas e de redes de esgoto, da permanência da população no campo, do correto manejo nas áreas rurais, da preservação e da proteção da biodiversidade, da agricultura orgânica, da manutenção de funções hidrológicas (conservação da água e do solo), da reciclagem de nutrientes, da regulação atmosférica, da polinização das culturas, do controle de pragas, da dispersão de sementes e dos benefícios cênicos da paisagem (BORN E TALOCCHIO, 2002; WHATELY e HERCOWITZ, 2008; BENSUSAN, 2008; MERICO, 2009).

Dentro deste contexto, destacam-se os **Serviços Ambientais** vinculados às áreas produtoras de água que prestam os serviços de regulação hídrica, purificação d'água, suporte aos processos ecológicos aquáticos e a água como um bem, assim como aqueles que sofrem influência ou que influenciam a qualidade destas áreas, como a regulação climática, recursos genéticos, controle de doenças, serviços culturais, controle de enchentes, controle de erosão, manutenção da biodiversidade, sequestro de CO<sup>2</sup>, produção de alimentos, produção florestal (WHATELY e HERCOWITZ (2008).

Sendo assim, conceitua-se os **Serviços Hidrológicos** através de Brauman *et al.*, (2007) como “os benefícios recebidos pelos seres humanos que são produzidos pela ação dos ecossistemas sobre as águas continentais, isto é, os corpos hídricos interiores ao continente, não oceânicos”. Nesse sentido, alguns serviços prestados podem ser visualizados no Quadro 3.

**Quadro 3 - Serviços Hidrológicos definidos por Brauman *et al.*, (2007).**

<b>Suprimento de água para usos extrativos diversos</b>	Refere-se à água destinada ao abastecimento público, agricultura, indústria, comércio, termoelétricas, por exemplo.
<b>Suprimento de água <i>in situ</i></b>	Relaciona-se à produção de água nos corpos hídricos propriamente, que possibilita serviços como produção de energia hidrelétrica, recreação, transporte, pesca e outros produtos do ambiente aquático em que não há consumo de água, em oposição à categoria anterior.
<b>Mitigação de danos relacionados à água</b>	Refere-se à redução de danos, como cheias, salinização de solos em regiões áridas, intrusões salinas, assoreamento de corpos hídricos (rios, lagoas, reservatórios) e eutrofização de sistemas aquáticos.
<b>Serviços culturais relacionados à água</b>	Relacionados a valores estéticos, espirituais, históricos, educacionais e turísticos.
<b>Serviços hidrológicos de suporte ao ecossistema</b>	Possibilitam a geração de serviços das outras categorias, e compreendem, por exemplo, a provisão de água e de nutrientes essenciais para o crescimento da vegetação e a formação de habitat de organismos aquáticos. Entre os tipos de habitat, destacam-se as regiões estuarinas, como áreas de transição entre um rio e as águas oceânicas, caracterizadas por intensa troca entre os sistemas e alta biodiversidade e produtividade.

**Fonte: Brauman *et al.*, (2007).**

Dentro dos Serviços Hidrológicos, Fidalgo *et al.*, (2017) traz os Serviços Ambientais Hídricos como aqueles relacionados aos processos hidrológicos, cuja provisão pode ser garantida, mantida ou mesmo recuperada por intervenções humanas de proteção e conservação desses processos, garantindo assim a segurança hídrica e a produção de água, diminuindo a erosão e a poluição hídrica que afeta estes serviços.

Nesse sentido, os serviços ambientais hídricos podem ser aqueles de purificação da água, diminuição do risco de cheias, recarga de aquíferos, minimização da erosão, controle da poluição hídrica, melhoramento da qualidade da água, favorecimento da infiltração de água no solo e da recarga dos aquíferos, controle no transporte de sedimentos, regulação do fluxo hídrico, proteção de nascentes, proteção de áreas de preservação permanente, adoção de medidas para a conservação de bacias hidrográficas BENNETT *et al.*, (2013) e FIDALGO *et al.*, (2017).

### 2.2.1 Valoração de serviços ambientais

Um dos primeiros trabalhos que realizou valoração ambiental, foi o de Costanza *et al.*, (1997) que valoraram que dezessete tipos de serviços ecossistêmicos, inseridos em 16 Biomas do planeta, prestavam o equivalente a US\$ 33 trilhões de dólares em serviços ambientais, enquanto as economias mundiais somavam em torno de US\$ 18 trilhões de dólares. Destacam-se os serviços relacionados 1) à regulação da água, através do uso pela agricultura e indústria, 2) ao suprimento de água, 3) aos aquíferos e 4) ao controle de erosão, prevenindo a perda pelo vento e pelo escoamento superficial (COSTANZA *et al.*, 1997).

A discussão acerca da valoração de serviços ambientais é recente no Brasil, com o primeiro caso de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) sendo instaurado no ano de 2006, no município de Extrema, no estado de Minas Gerais. Porém, os métodos para a valoração foram desenvolvidos anteriormente e muitos deles compilados no Manual para Valoração Econômica de Recursos Ambientais, elaborado pelo Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA), onde se ressalta que a adoção deles deve ser específica para cada caso, com a sua escolha sendo justificada e referenciada. Cada método possui a sua fundamentação teórica, o seu viés estimativo e as suas orientações para uso.

Whately e Hercowitz (2008) elencaram os principais casos de pagamentos por serviços ambientais relacionados à água, dentre os 287 casos analisados por Landell-Mills e Porras (2002), conforme Figura 3.

**Figura 3 - Casos de Serviços Ambientais relacionados a água analisados por Landell-Mills e Porras (2002)**

Country	Project/Community (2002)
Australia (New South Wales)	Macquarie River Basin – transpiration credits
	Salinity credit trading
	Salinity-friendly products
Bolivia, Argentina	Bermejo River – watershed protection contracts
Brazil (Sao Paulo)	SEMAE – watershed restoration contract
Chile	Water share trading and payments for watershed protection
China	Watershed protection contracts (Guangdong Province)
	Miyun Reservoir restoration and maintenance scheme (Hebei Province)
	Xingguo County – watershed protection contracts (Jiangxi Province)
	Mini-watershed restoration schemes (Northwest)
	Yao County watershed protection contracts (Shiangxi Province)
Colombia	Valle del Cauca – land acquisition and land management contracts
	National watershed management contracts
	Compoalegre Users Association – land acquisition
Costa Rica	Heredia Public Service Enterprise – national park protection
	Energia Global payments, Central Plateau
	River Plataniar, San Carlos
	Monte Verde Cloud Forests
	San Jose watershed fund
Ecuador	Water Conservation Fund in Quito
	Cuenca City – Land acquisition & watershed protection
El Salvador	El Imposible National Park – protected area contract
Guatemala	Montagua River, Sierras las Minas
India	MYRADA – land management contracts (Gulbarga, Karnataka)
	Inter-state watershed protection contract (Himachel Pradesh)
	Water harvesting in the Arvari catchment – reduce siltation and water table regulation (Rajasthan)
	Tradable water rights system and user fees (Sukhomajri)
Indonesia	Sumber Jaya Lampung – land management contracts
	Payments for improved water quality (West Lombok)
Jamaica	Watershed protection contracts & fees
Malawi	Escom – watershed protection contracts
	Water Boards – watershed protection contracts
	Water Boards – protected area contracts
Pakistan	Mangla Dam – watershed protection contracts
Panama	Darien: Committee for saving the Filo del Tallo hills
	Chagres watershed payments scheme
Philippines	Makiling Forest Reserve – protected area contracts
	National Power Corporation Watershed rehabilitation fee
Romania	Paying for improved water quality
South Africa	Stream flow reduction licenses (SFRL)



Country	Project/ commodity
USA	Ecolotree – soil contaminant removal
	Boulder Creek Riparian Enhancement Project (Colorado)
	Long Island Sound sediment compensation fund (Connecticut)
	Lower Boise River Effluent Trading System – Reduction Credit Certificates (Idaho)
	Portland Water District water quality scheme – land acquisition and planting contracts (Maine)
	Rahr Malting Company – pollution reduction credits worth 1 lb CBOD/ day equivalent. (Minnesota)
	Cannon River Watershed Partnership – land management contracts (Minnesota)
	Leases for forested aquatic environments (mostly in Maine)
	NYC Watershed Programme – land acquisition, conservation easements, forest and land management contracts (New York)
	Tar-Pamlico Basin – nutrient pollution credits (North Carolina)
	Tar-Pamlico Basin – nutrient pollution credits (North Carolina)
	Salem Public Works Department – land management contract (Oregon)
	Model watersheds programme – land management contracts (Oregon)
	Little Butte Creek – salmon habitat restoration contract (Oregon)
	The Deschutes Basin Land Trust – land and water rights acquisition (Oregon)
	Salmon Safe certified agricultural produce (Pacific Northwest)
	Salmon habitat credits (Pacific Northwest)
	Chester Water Authority – Land management contracts (Pennsylvania)
	Salt Lake City Corporation – land acquisition & conservation easements (Utah)
	Seattle Public Utilities water quality improvement scheme – land acquisition (Washington)
	Rock River Basin – Phosphorus credits (Wisconsin)
	Vietnam
Zimbabwe	Integrated Catchment Management in Dryland Areas – watershed protection contracts

**Fonte: Whately e Hercowitz (2008)**

Além disso, destacam-se os programas governamentais de PSA no México que auxiliam na preservação dos aquíferos e na conservação das florestas e na Costa Rica, que auxiliam na proteção dos aquíferos, da biodiversidade, no sequestro de carbono e na proteção da paisagem (CANEPPELE, 2016).

Para valorar os benefícios dos serviços ambientais podem ser utilizados indicadores para determinar os fluxos dos serviços ecossistêmicos, a partir da retenção da água no solo e o número de pessoas que se beneficiam pela água limpa armazenada pelos ecossistemas. Nesse sentido, a cartografia, relacionando os ecossistemas e as populações, é de fundamental importância para conhecer a interdependência desses fatores (BRINK *et al.*, 2013).

No presente trabalho se destaca a metodologia da Economia dos Ecossistemas e da Biodiversidade (*The Economics of Ecosystems and Biodiversity* - TEEB), que busca valorar a partir de um método comparativo. Basicamente, deve ser calculada a equivalência entre o serviço prestado pela natureza e aquele utilizado pela sociedade, ou seja, quanto custaria replicar o serviço ambiental com tecnologia.

A metodologia TEEB busca ser o elo entre a biodiversidade e a arena das políticas nacionais e internacionais, além das práticas governamentais e econômicas, consistindo-se assim, em um auxílio para acelerar o desenvolvimento de uma nova economia. A referida metodologia se estrutura, inicialmente, a partir do reconhecimento do valor de ecossistemas, das paisagens ou de outros aspectos da biodiversidade, para então demonstrar o valor em termos econômicos, se tornando útil para os tomadores de decisão. Ressalta-se que a metodologia está inserida na busca de trazer à tona as consequências de mudanças nas alternativas de gestão e não na tentativa de valorar ecossistemas e a biodiversidade, assim como, não se constitui em um único processo de valoração, porém estabelece um conjunto de três passos gerais (TEEB, 2010).

O primeiro passo é o de **Identificar e Avaliar** todos os serviços ecossistêmicos afetados e as implicações para os diferentes grupos na sociedade. O segundo passo é o de **Estimar e Demonstrar** o valor dos ecossistemas, analisando as relações de espaço e tempo e por último, **Capturar** o valor dos serviços ecossistêmicos e buscar soluções para superar a não valoração ou subvaloração dos mesmos, através de ferramentas como o PSA (TEEB, 2010).

Dentro deste contexto, o valor dos ecossistemas pode ser expresso como 1) **Valor reconhecido**, envolvendo valores culturais e estéticos até mesmo em termos não monetários; 2) **Valor capturado** onde existe um mercado que determina um valor; 3)

**Valor demonstrado**, onde é possível calcular um custo potencial de substituição em termos monetários. Por exemplo, um banhado<sup>4</sup> é considerado um “purificador” de água, portanto, pode ser equiparado a construção de um sistema de tratamento de esgoto. Sendo assim, ao calcular a capacidade de filtração do banhado poderá ser calculado o quanto seria gasto na construção de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) com as mesmas capacidades (TEEB, 2010).

Alguns autores já aplicaram a metodologia TEEB em diversas temáticas e serão apresentados nos parágrafos posteriores, iniciando com Souza (1999) que aponta a decomposição de lixo orgânico gerado pelas sociedades, pelos animais domésticos e pelo processamento das colheitas, como um dos principais serviços biológicos executados pela natureza de forma “gratuita”, sendo calculados na quantia de mais de US\$ 760 bilhões de dólares/ano.

Segundo TEEB (2010), ao reduzir as taxas de desmatamento seriam evitados danos resultantes das mudanças climáticas em mais de US\$ 3,7 trilhões de dólares. Os serviços ecossistêmicos prestados pelas florestas são os mais avaliados e com maior número de trabalhos com a aplicação da metodologia TEEB, conforme pode ser visualizado na Figura 4, inclusive com um caso de recarga de águas subterrâneas.

---

<sup>4</sup> Termo regional utilizado no estado do Rio Grande do Sul para designar área úmida.

**Figura 4 - Avaliação de serviços ecossistêmicos prestados pelas florestas tropicais a partir da metodologia TEEB.**

Serviço Ecossistêmico	Valor
Alimentos, madeira e combustível	Lescuyer (2007) valorou os serviços de provisão das florestas de Camarões em US\$ 560 por tora de madeira, US\$ 61 por lenha para combustível, e US\$ 41-70 para produtos florestais não-madeireiros (valores por hectare por ano).
Regulação do clima	Lescuyer (2007) valorou a regulação do clima pelas florestas tropicais em Camarões em US\$ 842, 2.265 por hectare por ano.
Regulação da água	Yaron (2001) valorou a proteção das florestas tropicais contra enchentes em US\$ 24 por hectare por ano em Camarões. Van Beukering et al. (2003) estimou o Valor Presente Líquido do fornecimento de água pelo Ecossistema de Leuser (que inclui aproximadamente 25.000 km <sup>2</sup> de floresta tropical) em US\$ 2,42 bilhões.
Recarga de águas subterrâneas	Kaiser e Roumasset (2002) valorou os benefícios indiretos dos 40.000 hectares da bacia hidrográfica de Ko'olau, Havaí, em US\$ 1.42-2.63 bilhões.
Polinização	Priess et al. (2007) valorou os serviços fornecidos pelas florestas de Sulawesi, Indonésia, em 46 Euros por hectare. Estima-se que a atual conversão da floresta reduza os serviços de polinização e as plantações de café em até 18% e as receitas líquidas por hectare em 14% nas próximas duas décadas.
→ Valor de existência	Horton et al. (2003) usaram a valoração contingente para estimar a →disposição de famílias no Reino Unido e Itália a pagar pelas áreas protegidas na Amazônia Brasileira. Chegaram ao valor de US\$ 46 por hectare por ano. Mallawaarachchi et al. (2001) utilizaram o modelo de escolha para valorar as florestas naturais do rio Herbert, no Distrito de North Queensland, Austrália, em AU\$ 18 por hectare por ano.

Fonte: TEEB (2010).

A polinização de insetos pelo mundo foi estimada em € 153 bilhões no ano de 2006, com vegetais e frutas valorados € 100 bilhões/ano, mesmo com o declínio da polinização decorrente da conversão de terras para a agricultura. Além disso, esse valor é equivalente a 9,5% do valor da produção agrícola mundial (GALLAI *et al.*, 2009).

Com o objetivo de regular o microclima, reduzir a poluição e sequestrar Carbono, foram plantadas 400.000 árvores em Camberra, na Austrália em 2002, podendo gerar um benefício calculado em US\$ 20-67 milhões, entre os anos de 2008 e 2012 (BRACK, 2002).

Os recifes de corais do Havaí prestam um serviço ambiental de cerca de US\$ 360 milhões por ano, através da proteção natural contra a erosão das ondas, da pesca e do turismo, além da importância da biodiversidade, contribuindo para a pesquisa e para a educação. O arquipélago do Havaí possui 1.660 km e um potencial para a formação de recifes, sendo estimado assim em US\$ 10 bilhões em Serviços Ambientais (CESAR e VAN BEUKERING, 2004).

O caso da valoração de áreas úmidas em Kampala, na Uganda, ilustra a metodologia TEEB, efetuando uma comparação entre o custo para instalação de um sistema de tratamento de água ou barragens para contenção de enchentes e os serviços fornecidos pelas áreas úmidas no tratamento de resíduos humanos e controles de enchentes. O Pântano Nakivubo que liga a capital Kampala ao Lago Vitória prestava um serviço ambiental estimado entre US\$ 1 e 1,75 milhão de dólares, para o ano de 1999, em função da purificação dos efluentes da cidade.

Além disso, o valor da conservação das áreas úmidas na cidade de Vientiane - Laos, que protegem a cidade contra as enchentes, foi estimado em US\$ 5 milhões/ano, enquanto em Bangladesh, a proteção das áreas úmidas aumentou em mais de 80% a pesca (EMERTON *et al.*, 1999; TEEB, 2010).

Em um estudo de caso efetuado pela FEPAGRO, no município de Hulha Negra/RS, foram avaliados os estoques de Carbono no solo em áreas de pastagem nativa e solo sob sistemas tradicionais (fumo e milho). Concluiu-se no estudo que a manutenção do campo nativo corresponderia a um valor que varia de US\$ 38,9 a US\$ 60,2 por hectare. Nesse sentido, os campos sulinos foram valorados por Tornquist e Bayer, (2009), entre US\$ 249 e 385 milhões, apenas quanto ao provisionamento de carbono.

Em relação ao escopo deste trabalho, que trata das áreas de recarga, Muñoz-Piña *et al.*, (2008) ressaltam um intenso desmatamento ocorrendo no México, associado a uma superexploração dos aquíferos. Nesse contexto, os autores trazem a necessidade do Pagamento Hidrológico por Serviços Ambientais (*Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos – PSAH*) que busca, através de incentivos econômicos, evitar o contínuo desmatamento e com isso proteger as áreas de recarga. No intervalo entre 2003 e 2005 o PSAH dispendeu entre 10% e 25% dos recursos para as áreas de recarga, sendo que destes recursos 7% foram dispendidos para os Aquíferos com maior exploração (MUÑOZ PINÁ *et al.*, 2008)

Além disso, em 1997 em Nova York, as autoridades locais optaram por investir na conservação de florestas e terras úmidas na bacia hidrográfica, em vez de construir uma nova estação de tratamento e filtragem de água, que custaria cerca de US\$ 6 bilhões, mais US\$ 200 milhões e US\$ 300 milhões por ano para operação e manutenção, não sendo esta estação executada. Com isso, foram economizados cerca de 2 bilhões de dólares que foram utilizados para pagar os proprietários rurais locais que conservassem as matas ciliares, disponibilizar assistência técnica e recursos para a

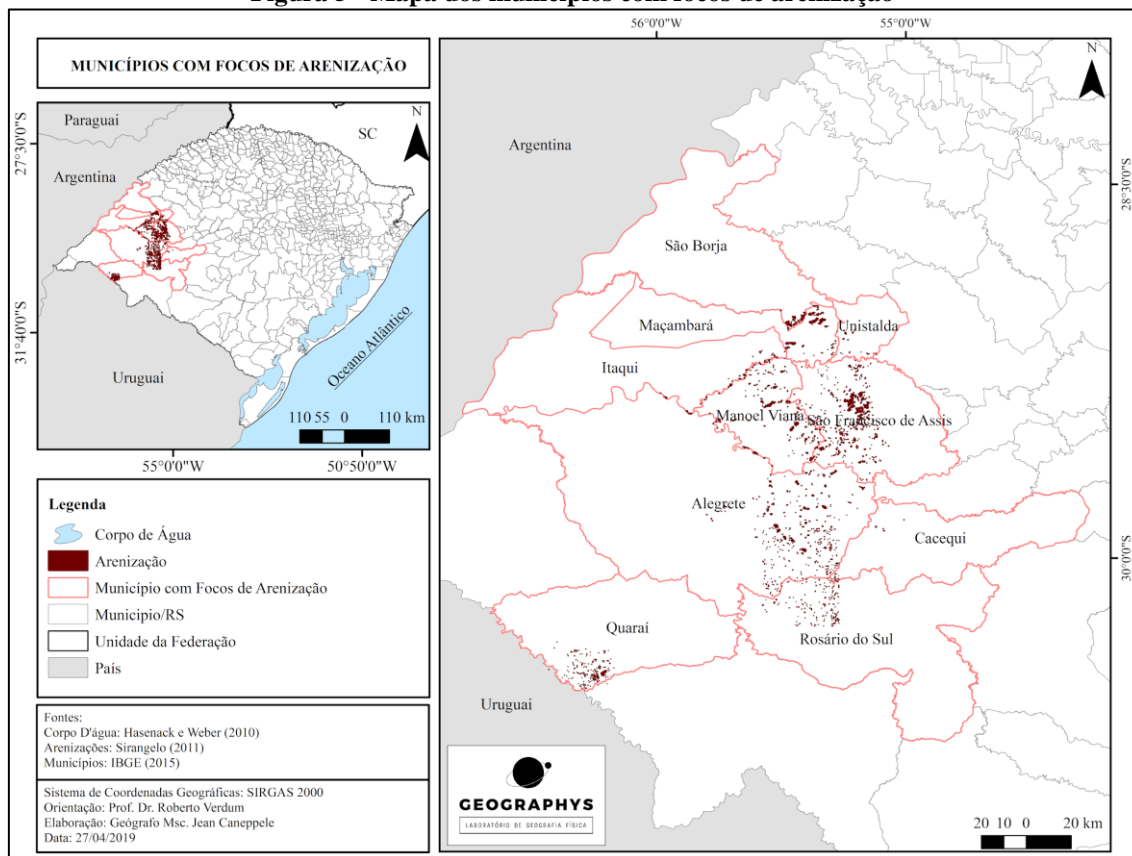
adoção de práticas conservacionistas e compatíveis com a manutenção da qualidade hídrica (WHATELY E HERCOWITZ, 2008; PÓLIS, 2008; TORNQUIST e BAYER, 2009).

Sendo assim, busca-se na presente tese seguir as premissas que permitam efetuar uma equivalência entre o serviço prestado e o custo para replicá-lo com tecnologia. Neste sentido, é levado em consideração o fato de que as áreas com arenização se constituem em um filtro de água para o SAG, sendo que se pode tomar como base o custo que as empresas de tratamento e distribuição de água têm para efetuar o mesmo procedimento de filtragem.

### 2.3 Arenização: Processo natural de valorização dos serviços ambientais e ecossistêmicos

Parte-se do princípio de que a arenização é caracterizada, em sua gênese, como sendo um processo natural, que pode ser intensificado pelo inadequado uso e manejo da terra. As feições erosivas do processo (ravinas, voçorocas e areais), podem ser encontradas em dez municípios do oeste e sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, o que pode ser visualizado no mapa da Figura 5.

Figura 5 - Mapa dos municípios com focos de arenização



Fonte: Elaborado por Caneppele, J., 2019.

Os areais possuem padrão de localização, associados às coxilhas e as rampas arenosas, em contato com os cerros, estando também relacionados às cabeceiras de drenagem (SUERTEGARAY *et al.*, 2001; GUASSELLI, 2012). Além disso, a localização das feições erosivas está vinculada às formações superficiais, identificadas por Suertegaray (1987), provenientes do retrabalhamento dos arenitos das Formações Botucatu e Guará, durante o Quaternário. Estes arenitos também estão vinculados às áreas de recarga do SAG, fator que se constitui em um importante subsídio para a concepção desta tese, a partir da proposição de manutenção dos areais como áreas naturais. Dentro deste contexto, a correta identificação e localização das feições erosivas, através de ferramentas de geoprocessamento e mapeamentos, assume um papel fundamental na valorização dos serviços ambientais prestados pela arenização.

Segundo Guasselli (2012) os mapeamentos efetuados pelo grupo de pesquisa auxiliaram na análise acerca da localização, distribuição, quantificação, investigação das formas, relação com o substrato rochoso e gênese da arenização. Nesse sentido, estas análises se constituem em produtos vinculados à relação entre a arenização e as áreas de recarga do SAG.

O primeiro mapeamento da arenização foi realizado por Suertegaray (1987) utilizando imagens analógicas. Este primeiro mapeamento auxiliou no entendimento da gênese da arenização. Os mapeamentos posteriores de Suertegaray *et al.*, (1993) e Suertegaray *et al.*, (1994), o segundo já com imagens em formato digital do ano de 1989, permitiram uma análise da distribuição e quantificação da arenização.

A partir do mapeamento efetuado por Guasselli *et al.*, (2005) foram possíveis a correlação temporal e a verificação da dinâmica de aumento ou decréscimo das áreas com arenização, com a identificação de uma área de 3,67 km<sup>2</sup>. Apesar de a arenização possuir uma dinâmica de evolução, a sua área total não possui variação espacial significativa ao longo dos anos, mantendo-se a área, entre os anos de 1989 e 2004/2005 (GUASSELLI, 2012). Cabe ressaltar que no último mapeamento, do ano de 2010<sup>5</sup>, identificou-se uma maior área de arenização, em função de se utilizar imagens de satélites com maior resolução espacial, em relação às aquelas dos anos 1980.

Os areais são encontrados nas rampas em contato com os relevos testemunhos ou em cabeceiras de drenagem, enquanto as ravinas ora são encontradas isoladas, ora encontradas alimentando e/ou formando os areias. Em relação às voçorocas, elas estão

---

<sup>5</sup> Sirangelo, (2010).

localizadas, no contato entre as várzeas e as rampas arenosas e/ou coxilhas, estando conectadas às redes de drenagem, seja em superfície seja em subsuperfície, em função de sua dinâmica de formação estar associada ao lençol freático aflorante.

Como assinalado, anteriormente, as feições erosivas dos areais, mapeadas pelo grupo de pesquisa desde o ano de 1989, não possuíram variações em sua área ou localização (GUASSELLI, 2012). Nesse sentido afirma-se que os areais e os focos de arenização prestam **serviços ambientais (SAs)** de forma contínua e histórica, em muitos casos, na mesma área em que se formaram, há no mínimo 35 anos, quando do início dos registros espaciais da arenização.

Embora as pesquisas ainda sejam poucas na temática de serviços ambientais da arenização, fazendo com que haja um desconhecimento das suas funções ecológicas e ambientais, destaca-se que os estudos já produzidos permitem vislumbrar os areais não só como algo que deva ser combatido, ainda mais quando se reconhece a sua estabilidade em termos espaciais. Um exemplo disso é a interpretação destes no Zoneamento Ambiental do Rio Grande do Sul (CONSEMA, 2010), considerados como patrimônios naturais passíveis de preservação, uma vez que para o entorno dos areais consolidados<sup>6</sup>, preconiza-se:

Identificar as áreas de areais consolidados na UPN PC3 com base no Atlas elaborado pela UFRGS, que representam ecossistemas diferenciados originados por processo natural, e estabelecer uma faixa de proteção com largura definida em projeto técnico visando a conservação da fauna, da flora e da paisagem. (CONSEMA, 2010).

Dentro deste contexto, destacam-se os trabalhos que trazem elementos de destaque aos areais e à arenização e que dão subsídios para identificar e valorar os serviços ambientais e ecossistêmicos prestados, e que estão elencados no Quadro 4.

---

<sup>6</sup> Aqueles identificados durante levantamento do Atlas da Arenização.



**Quadro 4- Autores e temas estudados acerca da arenização.**

<b>Autor</b>	<b>Tema</b>
Suertegaray; Guasselli; Verdum, 2001 Suertegaray; Guasselli; Pires da Silva, 2012; Pires da Silva <i>et al.</i> , 2021;	Estudos acerca da arenização
Bellanca, 2002; Bellanca e Suertegaray, 2003.	Arqueologia
Trindade, 2003; Freitas, 2006 e 2010; Rovedder, 2007; Pires da Silva, 2008;	Biodiversidade
Verdum, 1997; Scopel <i>et al.</i> , 2012; Binda, 2016.	Dinâmicas Específicas do Meio
Silva, 2009; Sanchez, 2013, Rossato, 2012.	Clima
Vieira, 2014; Vieira e Verdum, 2017;	Paisagem
Gass <i>et al.</i> , 2019; Vieira <i>et al.</i> , 2021	Patrimônio Geomorfológico
Scopel, 2012; Vieira, 2018	Solos

Segundo a FAO (2007), existe uma crescente demanda e disponibilidade em pagar pelos serviços ambientais, principalmente nos eixos de **Sequestro de Carbono**, **Biodiversidade e Qualidade da Água**. Além disso, Tejeiro *et al.*, (2014) destacam a **Beleza Cênica** como um dos eixos de Serviço Ambiental.

O primeiro eixo, Sequestro de Carbono, não possui estudos específicos na arenização ou vegetação associada a ela, contudo destaca-se que as plantas do grupo C4 armazenam CO<sup>2</sup> durante o dia e principalmente à noite, uma vez que essa estratégia economiza água (SILVA, 2009).

O metabolismo C4 favorece a adaptação das espécies que vivem sob condições ambientais severas, indicando a adaptação às condições climáticas extremas como luz intensa, calor e déficit hídrico. Essas características são comuns nas áreas arenizadas, que possuem altas temperaturas e condições de baixa disponibilidade de água (LARCHER, 2000; KERBAUY, 2008).

Sendo assim, considerando que as plantas do grupo C4 contribuem com o armazenamento de CO<sup>2</sup>, interpreta-se que elas prestem um serviço ecossistêmico, cuja valoração e quantificação deve ser realizada com estudos específicos que não adentram ao escopo desse trabalho, mas demonstram o potencial destas áreas em prestar serviços ecossistêmicos e ambientais, uma vez que, segundo Freitas (2010), foram registradas 59 espécies vegetais em áreas arenizadas. Além do número significativo de espécies C4, a contribuição delas no percentual de cobertura do solo atingiu índices acima de 60% nas três áreas amostradas por Freitas (2010), no município de São Francisco de Assis/RS.

No segundo eixo, Biodiversidade, podem ser destacados os trabalhos de Trindade (2003), Pires da Silva (2008) e Freitas (2006 e 2010) que caracterizam as espécies nativas associadas aos areais, uma vez que se encontram adaptadas às dinâmicas do meio. Os campos de areia destacam-se por espécies **endêmicas** como *Paspalum leptum*, *Axonopus argentinus* e *Elionurus sp*, **adaptadas** ao estresse hídrico com adaptações foliares e órgãos subterrâneos desenvolvidos, uma vez que são estratégias observadas em espécies relacionadas aos ambientes xeromórficos como *Cereus hildmannianus* (K. Schuman) e *Parodia ottonis* (Lehm, N. P. Taylor), bem como espécies **com potencial ornamental** (HASENACK *et al.*, 2010; VIEIRA, 2018).

Para Trindade (2003), as espécies *Elyonurus SP* (Capim Limão) e *Butia lalemanti* (Butiá Anão) estão relacionadas ao processo de arenização, surgindo inclusive anteriormente aos areais, demonstrando um potencial adaptativo da vegetação natural. As referidas espécies preveem o surgimento ou a expansão dos areais.

O Butiá Anão é adaptado ao estresse hídrico, sendo encontrado comumente em áreas próximas a arenização, uma vez que está relacionado às características do solo. Segundo Pires da Silva (2012):

Com raízes pouco profundas e muito ramificadas, contribui para a minimização da erosão laminar provocada pelas enxurradas. As folhas penadas do butiazeiro-anão, posicionadas na parte terminal e próximas ao solo, em consequência do curte caule do tipo estirpe, oferecem uma oportuna adaptação aos estresses hídricos, próprios de alguns períodos nos areais. (PIRES DA SILVA, 2012, p. 321).

Outra espécie que chama atenção é o Tremoço - *Lupinus albescens*, caracterizado por Rovedder (2007) como propício à recuperação de áreas arenizadas, conforme síntese apresentada no Quadro 5.

**Quadro 5 - Características do Tremoço.**

<b>Característica</b>
Atua como colonizadora natural, uma vez que não é utilizada como alimento pelos animais, favorecendo a revegetação por sobre os areais.
Contribui para elevada produção de massa seca, protegendo o solo contra a erosão, reduzindo a umidade, amenizando a temperatura, incrementando o solo com matéria orgânica e ciclando os nutrientes.
Ausência de efeito alelopático.
Reduz o efeito da erosão eólica.
É excelente cicladora de Nitrogênio.

**Fonte: Adaptado de Rovedder (2007).**

Freitas (2006) e Freitas *et al.*, (2010) identificaram 343 espécies, das quais 20 possuem ocupação restrita aos campos de areia, 07 são exclusivas e 16 encontram-se ameaçadas de extinção. Foram identificadas espécies novas, inclusive em processo de adaptação climática, sobretudo às condições de estresse, bem como espécies endêmicas e/ou relacionadas aos areais como: *Alternanthera Hirtula* (Amaranthaceae), *Alternanthera praelonga* (Amaranthaceae), *Gomphrena graminea* (Amaranthaceae), *Pfaffia gnaphaloides* (Amaranthaceae), *Butia Lallemandii* (Arecaceae), *Calea clematidea* (Asteraceae), *Eupatorium angusticeps* (Asteraceae), *Gochnatia cordata* (Asteraceae), *Dickya vicentensis* (Bromeliaceae) e *Hochreutinera hasslerana* (Malvaceae). Estas espécies constam na Lista Vermelha de espécies de flora ameaçada, conforme Decreto nº 42.099 em janeiro de 2003. Freitas *et al.*, (2009) e Freitas (2010) confirmaram elevada riqueza de espécies vegetais, mesmo em áreas com processos erosivos, no entanto esta varia e diminui, consideravelmente, onde o processo está mais avançado.

Silva (2009) identificou que o ambiente dos areais está adequado à fixação da espécie *Cereus*, sobretudo pela presença da avifauna e mamíferos que disseminam as sementes. Além disso, identificou as espécies de cactáceas *Echinopsis oxygona* (Link.) Zucc. e *Parodia ottonis* (Lehmann) N.P. Taylor em seu estudo, sendo que estas estão incluídas na lista de espécies em extinção.

Especificamente em relação às morfologias de rampas arenosas, vinculadas aos cerros (morros testemunhos), estas apresentam uma diversidade biológica com vegetais de porte arbóreo, arbustivo, rupícola, trepadeira, cactáceas, bromeliáceas, associados a

insolação solar, ao substrato pedogeológico e a dinâmica pluviométrica. Os processos erosivos da arenização também estão associados a este meio, apresentando no seu entorno um banco de sementes de significativa diversidade florística, sobretudo nos taludes das ravinas, ao longo dos canais das voçorocas e na camada superficial junto ao solo (FREITAS, 2010, VIEIRA, 2017 e VERDUM *et al.*, 2020).

Este banco de sementes se torna importante, uma vez que é a partir dele que a arenização pode ser desconsiderada como degradação ambiental, pois o seu fator limitante é a mobilização dos sedimentos pela erosão hídrica e eólica e não pela falta de resiliência (VIEIRA, 2018).

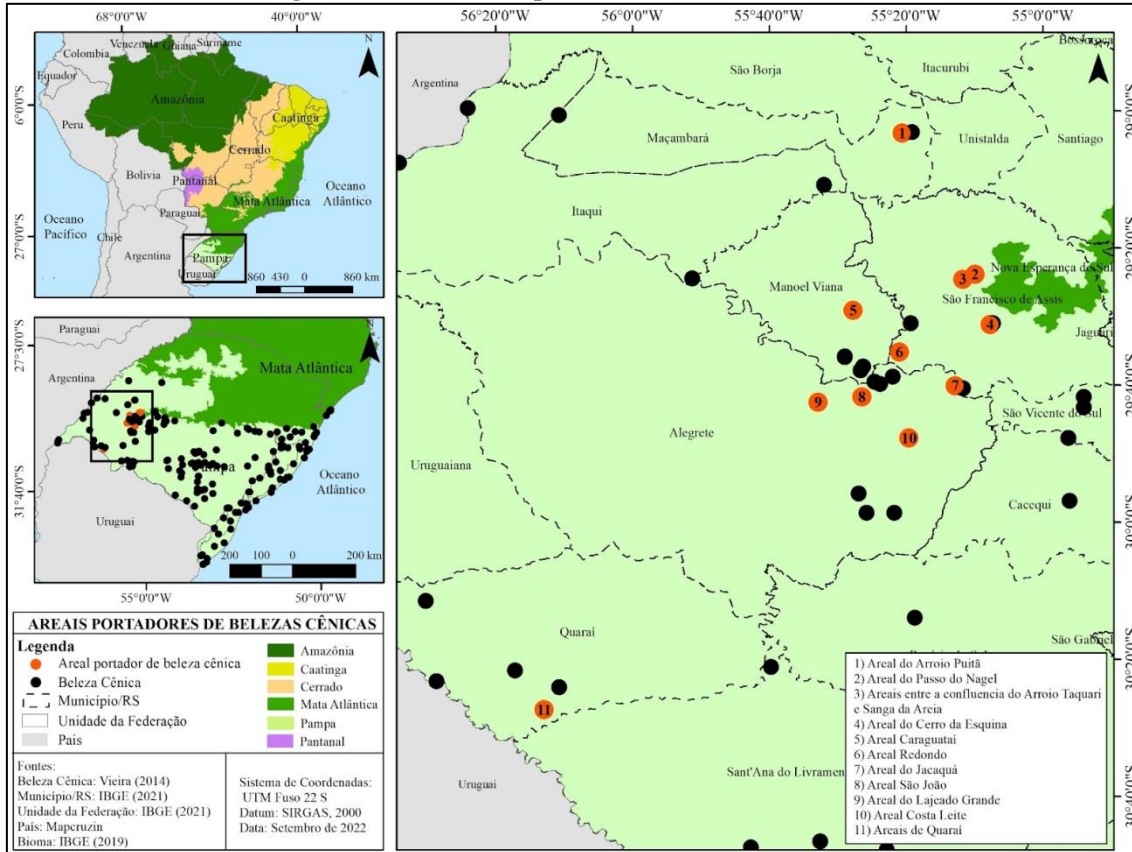
Dentro deste contexto, a tese de Vieira (2018) buscou verificar se uma área com ocorrência de focos de arenização e processos de erosão hídrica corresponde, efetivamente, a uma área degradada pela ação humana e zoógena. No referido estudo comprovou-se que havia potencial de resiliência no polígono de arenização estudado, não se configurando como uma área degradada com perda de potencial biológico.

Também, Pillar *et al.*, (2015) afirmam que toda essa diversidade presta serviços ecossistêmicos uma vez que se constituem em recurso genético valioso, além de possibilitar a exploração econômica e sustentável de espécies, favorecendo a sua preservação, trazendo retornos financeiros aos moradores locais (SILVA *et al.*, 2013; KAUFFMANN *et al.*, 2017a; KAUFFMANN *et al.*, 2017b; KAUFFMANN *et al.*, 2017c; KUHN *et al.*, 2019).

Dentro deste contexto, ressalta-se o potencial de uso e conservação das plantas associadas aos areais, através do seu uso medicinal, alimentício, ornamental, aromático, condimentar e biotécnico, inclusive para a recuperação de áreas degradadas. Entretanto, os seus benefícios ainda necessitam ser estudados, inclusive associando a valoração ambiental e a geração de renda aos produtores rurais.

Quanto ao eixo das belezas cênicas, destaca-se que a indicação de paisagens portadoras de belezas cênicas é importante para preservar, para conservar e para restaurar os patrimônios cultural e natural, além de trazer benefícios econômicos e sociais (VIEIRA e VERDUM, 2019). Sendo assim, destacam-se os 11 areais que foram citados na tese de Vieira (2014) como portadores de belezas cênicas, conforme mapa da Figura 6.

**Figura 6 - Areais como portadores de belezas cênicas.**



Fonte: Elaborado por Caneppele, J., 2022.

Nesse sentido, deve-se considerar que os areais são dotados de singular interesse geoturístico, pela sua beleza no mosaico paisagístico, em que se enquadram como sítios geomorfológicos e arqueológicos únicos, que auxiliam na potencialização de serviços ecossistêmicos/ambientais.

Dentro deste contexto, ao afirmar que a arenização é decorrente de um processo natural, com dinâmicas específicas, conforme demonstrado nos trabalhos que a estudam, a mesma deve ser considerada como um patrimônio natural, através da identificação e da valoração dos serviços ambientais e ecossistêmicos por ela prestados. Sobretudo, nos eixos de biodiversidade, uma vez que é um ecossistema único, de uma riqueza biodiversa, com fauna e com flora autóctones a ela associadas e assim, tendo-se razões suficientes para a preservação dos campos com areias (PIRES DA SILVA, 2008; FREITAS, 2006; 2010, PILLAR *et al.*, 2015, BENCKE, 2016). Além disso, como paisagens específicas, uma vez que os areais são portadores de belezas cênicas e potenciais indutores de geoturismo, devido a sua importância histórica, cultural e paisagística (VIEIRA, 2014; GASS *et al.*, 2019; VIEIRA *et al.*, 2021).

Sendo assim, pode-se afirmar que uma palavra que define a arenização é a diversidade, inclusive nos serviços ambientais e ecossistêmicos que esta presta. Para Verdum *et al.*, (2020) a arenização possui tamanha particularidade que deve ser vista, não, somente, como um patrimônio natural, mas como um patrimônio social da humanidade. Ainda que a tese esteja concentrada nos Serviços Ambientais prestados pela arenização, cumpre ressaltar que os aquíferos prestam diversos serviços, uma vez que possuem diversas funções, identificadas por Rebouças (2002) e elencadas no Quadro 6, destacando-se a função de filtro.

**Quadro 6 - Funções dos Aquíferos**

<b>Função</b>	<b>Detalhamento</b>
Produção	Corresponde à sua função mais tradicional de produção de água para o consumo humano, industrial ou irrigação.
Estocagem e Regulação	Estoque de excedentes de água que ocorrem durante as enchentes dos rios.
Filtro	Utilização da capacidade filtrante e de depuração biogeoquímica do maciço natural permeável.
Transporte	Sistema de transporte de água entre as zonas de recarga artificial e natural e áreas de extração excessiva.
Estratégica	Reserva estratégica para épocas de pouca ou nenhuma chuva.
Energética	Fonte elétrica ou termal
Mantenedora	Manutenção do fluxo de base dos cursos d'água

**Fonte: Adaptado de Rebouças (2002).**

## **2.4 Relação Locacional entre a Arenização e as Áreas de Recarga do SAG.**

Os areais possuem intrínseca relação com o Sistema Aquífero Guarani (SAG), pois ambos estão associados à Bacia Sedimentar do Paraná e especificamente às formações Botucatu e Guará. Os areais atuam como pontos de infiltração, de filtragem e de recarga hídrica, associado à dinâmica de alta pluviometria, anual em torno de 1.200 mm e diária que pode atingir mais de 100 mm, como destruturadora do meio frágil dessas formações sedimentares (VERDUM, 1997).

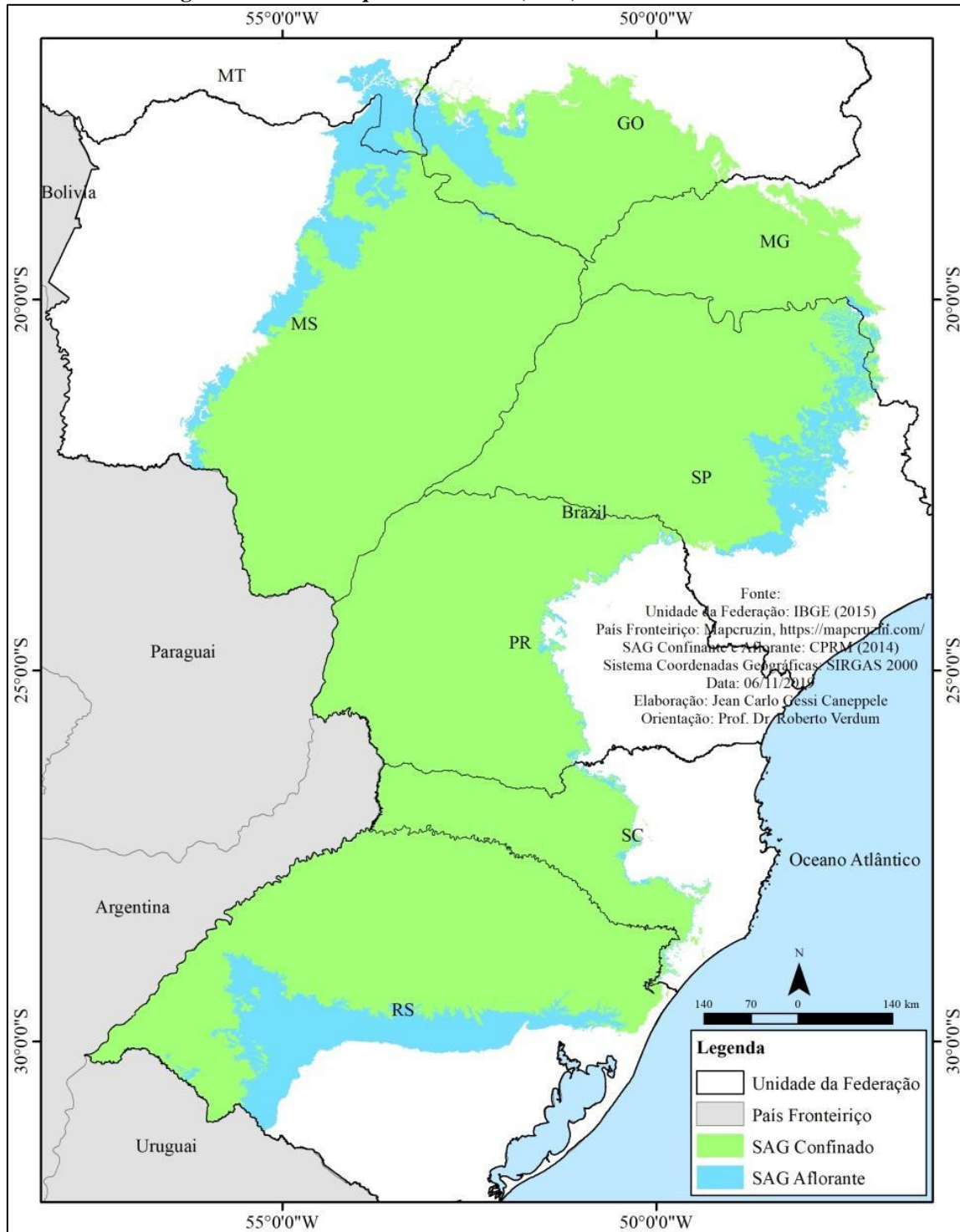
O Sistema Aquífero Guarani<sup>7</sup> é um dos maiores reservatórios de água subterrânea do mundo, possuindo importância internacional em função de ser um aquífero poroso que possui boas condições de armazenamento. Está localizado no centro-leste da América Latina, nessa bacia sedimentar, ocupando uma área aproximada de 1.100.000 km<sup>2</sup> ao longo de quatro países da América do Sul, tendo a maior porção no território brasileiro<sup>8</sup>. No mapa da Figura 7 é possível a visualização do SAG no Brasil, com destaque para a porcentagem de 90% de área confinada (ARAÚJO *et al.*, 1995, 1999; ANA, 2005).

---

<sup>7</sup> Para uniformizar a sua toponímia e hidroestratigrafia com os países do Cone Sul, o Aquífero Guarani passou a ser denominado SAG (Sistema Aquífero Guarani). Um Sistema Aquífero é constituído por “dois ou mais aquíferos no mesmo sistema hidráulico, os quais estão separados na maioria dos locais por uma ou mais unidades confinantes” (Jorgensen *et al.*, 1993).

<sup>8</sup> Cerca de 71 % do Aquífero (840.000 km<sup>2</sup>) ocorrendo nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Mato Grosso e Goiás. ANA (2005).

**Figura 7 - Sistema Aquífero Guarani (SAG) Confinado e Aflorante.**



**Fonte: Elaborado pelo autor a partir de CPRM (2014).**

Sua formação está associada a sistemas deposicionais eólicos e fluviais, de idades triássica (formações Pirambóia e Rosário do Sul no Brasil e Buena Vista no Uruguai) e jurássica (formações Botucatu e Guará no Brasil, Misiones no Paraguai e Taquarembó na Argentina e no Uruguai). Os estratos vinculados à deposição triássica, de origem flúviolacustre/eólico, são afetados por altos níveis de argilosidade,

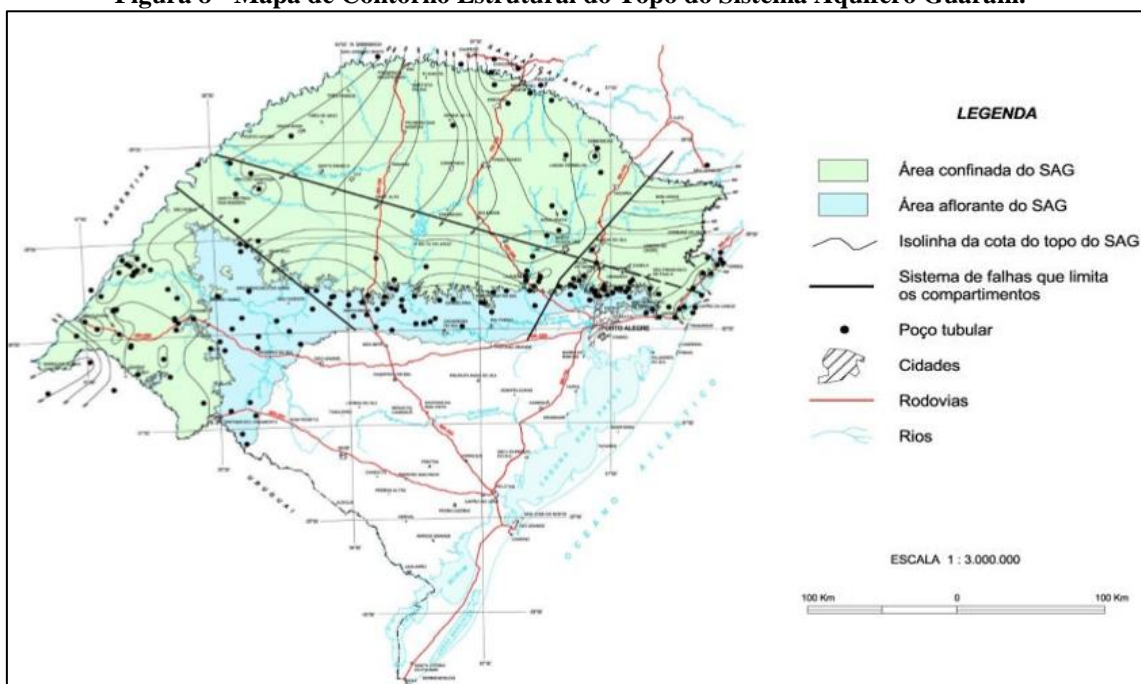


comprometendo a eficiência hidráulica, enquanto isso, os estratos vinculados à deposição Jurássica, mais recente e de deposição eólica, são considerados bons aquíferos (ARAUJO *et al.*, 1995; SOARES, 2008).

No Rio Grande do Sul, o SAG ocupa cerca de 55% do território, sendo a principal reserva de água subterrânea do estado, com destaque para menos de 10% da área aflorando, em função do confinamento por derrames vulcânicos (CPRM, 2012). É formado pelas unidades estratigráficas Botucatu (considerada o topo do SAG), Guará, Arenito Mata, Caturrita, Alemoa, Passo das Tropas, Sanga do Cabral e Pirambóia (MACHADO, 2005; SOARES, 2008).

Machado (2005) divide o Sistema Aquífero Guarani em Aflorante e Confinado, efetuando um mapeamento, em escala 1: 750.000, para o estado do Rio Grande do Sul com esta divisão (Figura 8). O SAG Confinado ocorre abaixo dos derrames da Unidade Estratigráfica Serra Geral, enquanto o SAG Aflorante, na área de ocorrência da arenização, ocorre associado às Unidades Estratigráficas Guará, na base, e Botucatu, nas porções superiores.

**Figura 8 - Mapa de Contorno Estrutural do Topo do Sistema Aquífero Guarani.**



**Fonte: Machado (2005).**

As principais áreas de recarga estão associadas aos depósitos das formações Botucatu e Guará, pois esses arenitos, em sua composição mineralógica, são basicamente arenosos com alta porosidade. A janela de arenito da Formação Botucatu,

localizada no município de Quaraí/RS, é uma área de potencial recarga em função das condições estruturais que elevaram o contato do SAG, em relação aos derrames da Unidade Hidroestratigráfica da Serra Geral (MACHADO, 2005).

As principais áreas de descarga estão localizadas na região limítrofe entre Argentina, Santa Catarina e Rio Grande do Sul e associadas ao centro da Bacia do Paraná, com o Rio Paraná como descarga (ARAUJO *et al.*, 1995; GOMES *et al.*, 2006; CAMPONOGARA, 2006). No Rio Grande do Sul, destacam-se os fluxos do freático que seguem a topografia e as linhas de fluxo concentradas na direção do rio Uruguai, descarregando nos principais cursos de água, como o Ibirapuitã, Santa Maria e Ibicuí (MACHADO, 2005; CPRM, 2012).

Em relação à região oeste e sudoeste do Rio Grande do Sul, Grehs e Mendes (2006) ressaltam que:

“Existe um controle de mais de 70% da rede de drenagem superficial pela incidência de lineamentos tectônicos, configurando relações rio-aquífero, na maioria das vezes, caracterizando **zonas de descarga de água subterrânea, que sustentam as vazões dos cursos d’água nos períodos de estiagem**. Em períodos de elevada precipitação pluviométrica e inundações, tais feições geológicas funcionam como **área de recarga**. (Realçado pelo autor).

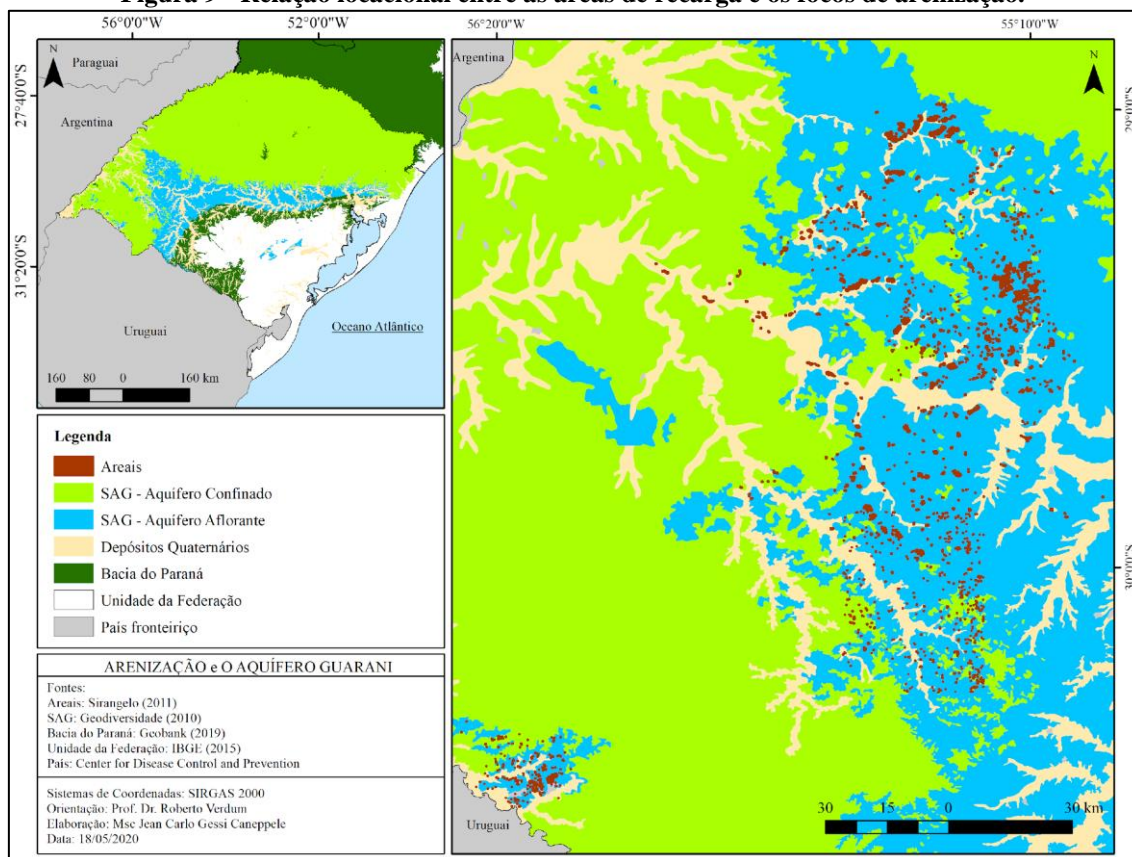
Gomes *et al.*, (2006) caracterizam as áreas de recarga no sudoeste do Rio Grande do Sul como em situação de alta vulnerabilidade, pois o lençol freático é raso, ocorrendo o risco de contaminação por agrotóxicos. Além disso, Verdum (2012) correlaciona as áreas dos empreendimentos da silvicultura à área de recarga do Sistema Aquífero Guarani, evidenciando a necessidade do mapeamento das áreas de recarga e as prováveis restrições a serem feitas.

Destaca-se, por fim, que áreas de recarga do SAG, associadas às formações Guará e Botucatu, coincidem em entorno de 90% dos focos de arenização<sup>9</sup> (GUASSELLI *et al.*, 2010). Sendo assim, existe uma relação intrínseca entre a arenização e as áreas de recarga, o que pode ser visualizado na Figura 9.

---

<sup>9</sup>Ressalta-se que a associação entre as formações Guará e Botucatu se dá em função da falta de mapeamento das formações superficiais quaternárias, que são originárias delas.

**Figura 9 - Relação locacional entre as áreas de recarga e os focos de arenização.**



**Fonte: Elaborado por Caneppele, J., 2020.**

Dentro deste contexto, com a intrínseca relação entre a arenização e as áreas de recarga do SAG, insere-se a arenização em uma nova lógica, com a manutenção dos areais, como áreas naturais, sem buscar a recuperação ou o combate; ao contrário, valorizando-os, como prestadores de Serviços Ambientais Hídricos.

## **2.5 Recarga: Infiltração, Estimativas e Identificação de áreas de recarga**

A compreensão das taxas de infiltração da água no solo é de fundamental importância para a gestão, proteção e utilização dos aquíferos. Também, ressalta-se a importância de identificar as áreas de recarga e estimar a quantidade de água que recarrega o aquífero na área da arenização.

Nesse sentido, a água infiltrada pode ser encontrada em duas zonas: 1) Zona Não Saturada (insaturada, de aeração ou zona vadosa); e 2) Zona Saturada. A zona não saturada possui os interstícios parcialmente ocupados por água e parcialmente ocupados por ar. Nessa zona ocorre a primeira infiltração que repõem a umidade do solo e, após, o excesso percola lentamente até atingir a zona saturada. A zona não saturada também

funciona como proteção à contaminação, principalmente através de sedimentos não consolidados (TEIXEIRA *et al.*, 2000.)

A zona saturada possui todos os interstícios preenchidos com água sob pressão hidrostática e é composta pela água que percola até o nível freático, que se torna o limite da zona saturada. Além disso, a água move-se descendente e lateralmente ao local de descarga de água subterrânea, tais como fontes nas encostas ou como surgências sob cursos d'água, lagos e oceano (TEIXEIRA *et al.*, 2000; FEITOSA E FILHO, 2000; MACIEL FILHO, 2008; VOGEL, 2008; HEALY, 2010).

### 2.5.1 Infiltração

A infiltração se refere à quantidade de água que atravessa a unidade de área da superfície do solo por unidade de tempo, encontrando-se na zona não saturada (WEILL e PIRES NETO, 2007; MARTELLI, 2012). A infiltração tem interferência direta na recarga dos lençóis freáticos, com a água infiltrando de acordo com os componentes do solo ou sendo armazenada em pequenas depressões, aumentando a umidade do solo. (SOUZA E RODRIGUES, 2014).

Nesse sentido, a umidade do solo, está relacionada à capacidade de infiltração, sobretudo pelas condições próximas a superfície, sendo importante a sua determinação. As medidas de umidade de solo podem ser feitas através i) da coleta de amostras e secagem em estufa; ii) pela resistência elétrica oferecida pela solução do solo; iii) através da sonda de nêutrons; iv) por tensiometria; v) por medidas de laboratório com as câmaras de sucção e vi) por outros métodos, como medidas de pressão de vapor, propriedades térmicas, absorção de raios gama, psicrometria e outras de menor uso (REICHARDT, 1987; SCOPEL, 2012).

Dentro deste contexto, Bagarello *et al.*, (2004) desenvolveram e testaram uma técnica de medição da condutividade hidráulica, baseada em experimentos de curta duração, pequenos volumes de água e equipamentos de fácil transporte, também conhecida como *Simplified falling-head* (SFH). A técnica consiste em aplicar pequenos volumes de água em solo confinado por um anel cilíndrico calculando o tempo para que a superfície não fique mais coberta por água.

Destaca-se que a técnica permite a determinação de elevado número de ensaios em curto período, quando comparada com outros métodos, podendo ser facilmente reproduzida, visto que no método estacionário é preciso determinar o fluxo constante da água e no SFH o mesmo é equivalente ao momento de infiltração da água no solo. De

acordo com Duarte (2015) para estimar a condutividade hidráulica saturada são requeridos: tempo de infiltração na água do solo, a diferença entre umidade saturada e a umidade atual do solo e a estimativa do parâmetro  $a^*$ , conforme equação abaixo:

$$K_{fs} = \frac{\Delta\theta}{(1 - \Delta\theta)t_a} \left[ \frac{D}{\Delta\theta} - \frac{D + (1/\alpha^*)}{1 - \Delta\theta} \ln \left( 1 + \frac{(1 - \Delta\theta)D}{\Delta\theta(D + (1/\alpha^*))} \right) \right]$$

Onde:

$\Delta\theta$  = Diferença de umidade volumétrica entre o solo saturado e a umidade atual do solo;

$D = V/A$  é a relação entre o volume da água e a área do anel;

$T_a$  = é o tempo de infiltração da água no solo;

$a^*$  = uma constante que varia entre 4; 12 e 36  $m^{-1}$ .

A umidade volumétrica ( $U_v$ ) consiste na presença de água através do volume e é calculada, neste método, através da multiplicação da umidade gravimétrica ( $U_g$ ) pela densidade do solo ( $D_s$ ), destacando-se que a umidade gravimétrica consiste na medição da água o solo pelo peso, enquanto que a densidade do solo consiste na quantidade de material sólido existente por unidade de volume. A  $D_s$  auxilia na indicação de compactação do solo e da natureza das partículas que compõem um solo (SCOPEL, 2012).

A necessidade do uso do parâmetro  $a^*$  foi explicada por Elrick *et al.*, (1989), bem como Elrick e Reynolds (1992) sugerem valores baseados na estrutura e na textura do solo.

**Figura 10 – Sugestão de valores para o parâmetro  $a^*$ , conforme estrutura e textura do solo**

$a^*$		Comentário
36		Areia grossa e solos altamente estruturados.
12	Média e areia fina	Areia média e fina e solos estruturados
4	Fina	Solos de textura fina e não estruturados
1	Argiloso	Solo argiloso compactado

Fonte: Elrick e Reynolds (1992)

Dentro deste contexto, solos com elevado valor de  $a^*$  indicam baixa capilaridade, alta porosidade, presença de fissuras e biopóros, enquanto baixos valores de  $a^*$  são indicativos do solo compactado e textura argilosa (REYNOLDS, 2010; DUARTE, 2015).

#### 2.5.2 Recarga

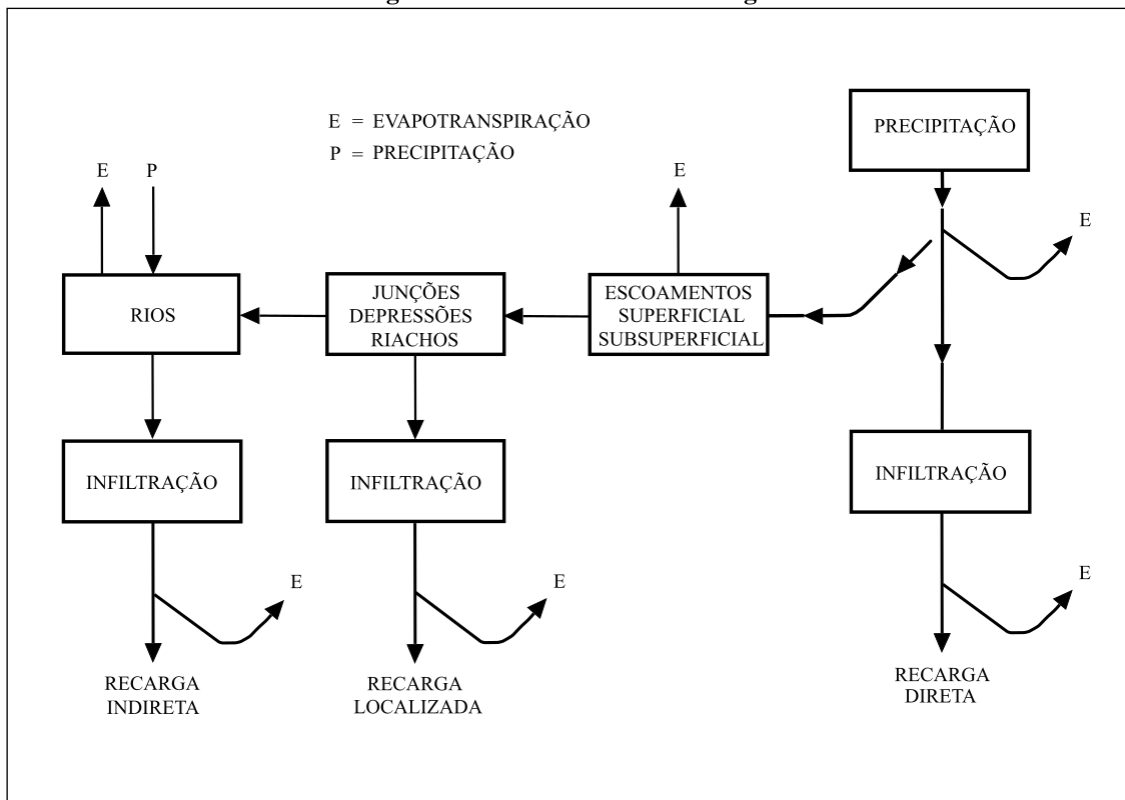
A recarga é um mecanismo importante do ciclo hidrológico, podendo ser definida como o fluxo descendente de água que definitivamente chega até a superfície freática, resultando em acréscimos volumétricos ao armazenamento (LERNER *et al.*, 1990; HEALY, 2010;).

A recarga corresponde à quantidade de água (chuva ou degelo da neve), que atinge e se infiltra no solo e na zona não saturada, percolando até atingir a zona saturada. Ela ocorre principalmente pela precipitação, mas também pode ocorrer pela infiltração de cursos d'água, onde o canal está mais elevado, por canais e lagos, por fluxos inter-aquíferos, pelo basculamento de blocos e pelo relevo falhado, bem como por fenômenos induzidos pelas atividades humanas, tais como irrigação, drenagem e urbanização (LERNER *et al.*, 1990; PRESS *et al.*, 2006; SOARES, 2008; AUZANI, 2010; MARTELLI, 2012).

A recarga pode ser **direta**, geradas por mecanismos difusivos, distribuídas através de extensas áreas em resposta à precipitação, acontecendo pela percolação que atravessa a zona não saturada; **pontual ou localizada**, devido ao movimento de água provinda de corpos de água superficiais adentrando o sistema aquífero efetuando a recarga na ausência de canais bem definidos; e **indireta** que corresponde às águas que

percolam por meio dos cursos d'água superficiais (LERNER *et al.*, 1990; HEALY, 2010). Na Figura 11 podem ser visualizados os três mecanismos.

**Figura 11 - Mecanismos de Recarga.**



Adaptado de Lerner *et al.*, (1990).

A primeira estimativa de recarga para o SAG foi efetuada por Rebouças (1974), identificando que 15% da precipitação média anual de 1.500 mm, recarrega o SAG. Dentro deste contexto, existem diversos métodos para a estimativa de recarga, sendo que a sua escolha depende dos objetivos do estudo em questão, da escala espacial e temporal, das restrições orçamentárias e da disponibilidade de tempo para execução. Segundo Bortolin *et al.*, (2018) os principais métodos de recarga consistem no: 1) modelo de balanço hídrico; 2) técnica de traçadores; 3) análise da curva de recessão da hidrógrafa, 4) uso de algoritmos de filtros digitais recursivos e 5) Variação do Nível de Água (VNA) ou em inglês Water Table Fluctuation (WTF).

Em função da facilidade do cômputo de recarga, assim como pelas variações temporais ou padrões espaciais dos respectivos níveis, o método de variação do nível d'água vem sendo utilizado em variados locais (Quadro 7). Esse método pode ser utilizado em áreas maiores, com variações do lençol freático em aquíferos rasos e regiões com altos índices de precipitação COELHO *et al.*, (2012).

**Quadro 7 - Trabalhos que utilizaram o método VNA.**

<b>Autor (a)</b>	<b>Local</b>	<b>Recarga</b>
Maziero (2005)	São Carlos (SP)	15 a 20%
Wahnfried e Hirata (2005)	Bacia do Alto Tietê (SP)	16,39 %
Barreto (2006)	Bacia do Ribeirão da Onça (SP)	29%
Gomes (2008)	Bacia do Ribeirão da Onça (SP)	14% e 38%
Pinto <i>et al.</i> , (2010)	Belo Horizonte (MG)	35,2 %
Martelli (2012)	Cacequi (RS)	25%
Coelho <i>et al.</i> , (2012)	Paraíba	7,2%
Rosa do Carmo (2014)	Microbacias do Vacacaí Mirim (RS)	18,31% e 38,95%
Simon (2014)	Bacia Hidrográfica do Ibicuí (RS)	13,82%

**Fonte: Elaborado pelo autor**

O método consiste na utilização da variação do nível de água subterrânea, medidas, sobretudo em poços, ao longo do tempo. Sendo assim, estima-se a recarga a partir do entendimento de que as elevações nos níveis d'água correspondem a recarga aquífera, ou seja, a água que atinge o lençol freático é a recarga, ignorando outros componentes como evapotranspiração na zona saturada, fluxo de base, entrada e saída de fluxo subsuperficial (HEALY, 2010; SIMON *et al.*, 2017). Dentro deste contexto, Healy e Cook (2002) apresentam a Equação abaixo para estimar a recarga:

$$R = S_y \cdot \frac{dh}{dt} = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Onde:

R = recarga (mm)

Sy = rendimento específico;

h = altura do nível d'água (mm);

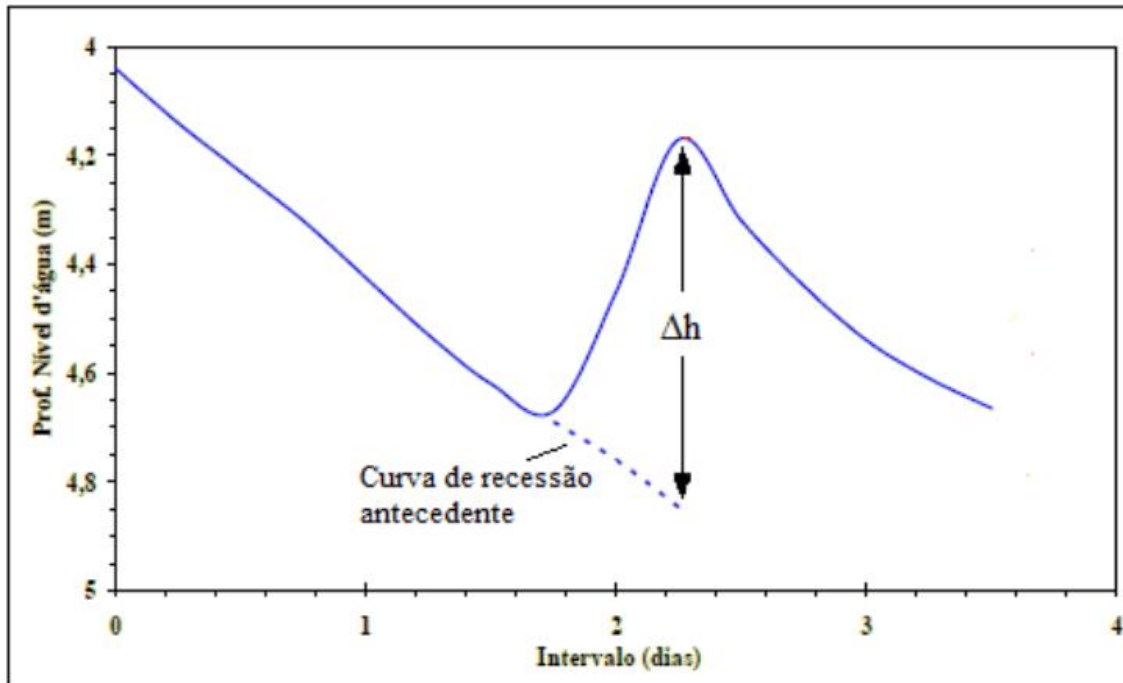
Δt: período escolhido para a estimativa (meses)

A determinação da recarga ocorre quando Δt é considerado igual à diferença entre o pico e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente, ou seja, o traço que



teria sido seguido na ausência de elevação do nível da água, conforme elucidado na Figura 12.

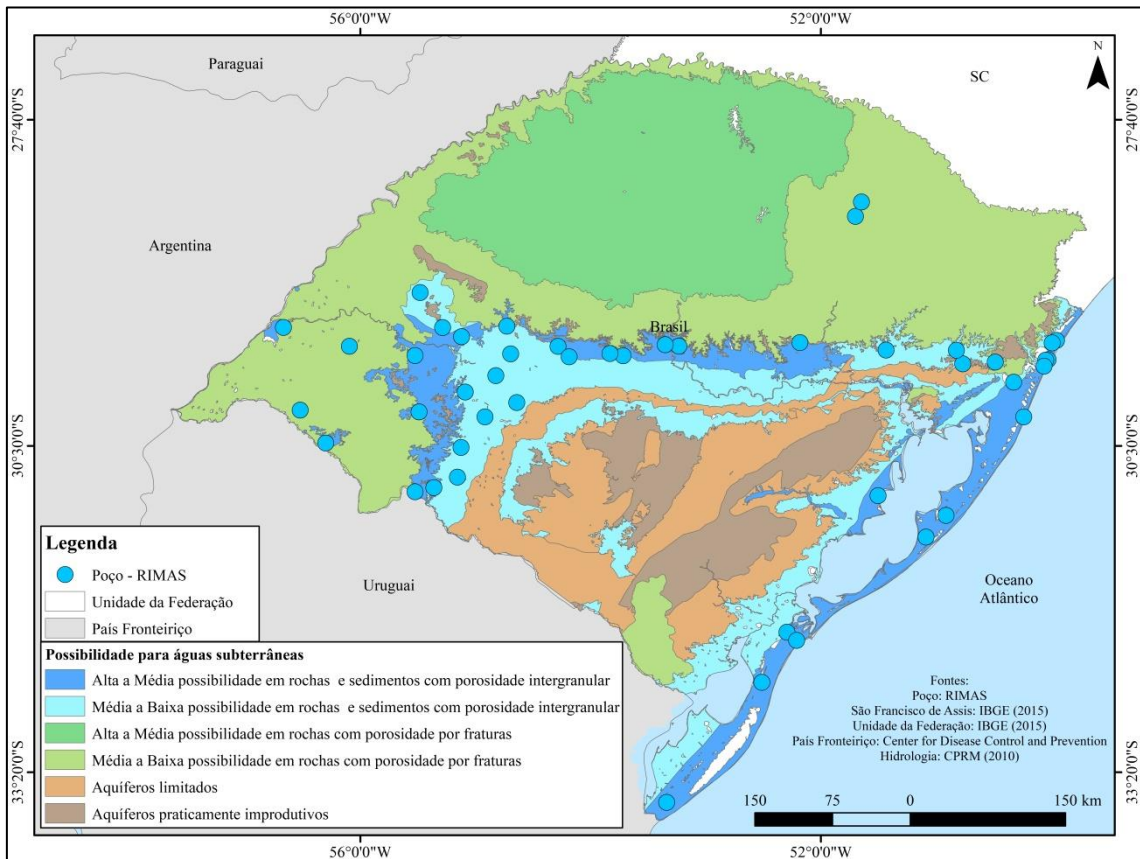
**Figura 12 - Exemplo hipotético da elevação do nível d'água em resposta à precipitação.**



Fonte: Adaptada de Simon *et al.*, (2017).

Os dados de variação do nível de água podem ser obtidos através de poços de monitoramento pertencentes ao projeto RIMAS (rede integrada de monitoramento das águas subterrâneas) que registram as variações horárias do nível de água subterrânea. De acordo com a CPRM a rede é de natureza fundamentalmente quantitativa com instrumentos que permitem o registro automático do nível d'água em poços que foram e continuam sendo instalados. Os dados registrados são armazenados e submetidos a processos de consistência e tratamento para posterior consulta e *download*. A localização dos poços do projeto RIMAS, presentes no estado do Rio Grande do Sul, pode ser visualizada na Figura 13.

**Figura 13 - Poços da Rimas no Rio Grande do Sul em relação à possibilidade para águas subterrâneas.**



Fonte: Elaborado por Caneppele, J., 2022.

Uma taxa importante nas estimativas de recarga é o rendimento específico ( $S_y$ ), pois qualquer variação deste parâmetro influencia significativamente no resultado (KRUSEMAN & RIDDER, 2000; WAHNFRIED E HIRATA, 2005). O rendimento específico  $S_y$  de um solo (ou rocha) pode ser definido como a proporção do volume d'água que, depois de saturado, é drenado por gravidade com relação ao seu próprio volume (MAZIERO e WENDLAND, 2005).

O  $S_y$  varia de acordo com a textura do material, sendo que para as texturas arenosas, típicas nos areais, ele varia de 10% a 28% para areia fina, 15% a 32% para areia média e 20% a 35% para areia grossa (JOHNSON, 1967; MARTELLI, 2012). Simon (2014) em seu trabalho de estimativa de recarga da bacia hidrográfica do rio Ibicuí, utilizou o valor de 16% para o  $S_y$ , em função deste número ser o valor médio dentre outros valores determinados nas mesmas unidades hidroestratigráficas identificadas em literatura. Os trabalhos utilizados por Simon (2014) podem ser visualizados na Figura 14.

**Figura 14 - Bibliografia utilizada por Simon (2014) para definir o Sy para a bacia hidrográfica do rio Ibicuí.**

<b>Autor</b>	<b>Local do estudo</b>	<b>Faixa de valores<sup>1</sup></b>	<b>Valor médio</b>
Rocha (1997)	SAG - área total	15% - 20%	17,5%
OEA (2009)	SAG indistinto e regional	13 % - 17%	15%
Martelli (2012)	SAG na cidade de Cacequi (RS)	15% - 16%	15,5%

**Fonte: Simon (2014)**

### 2.5.3 Mapeamento de Áreas de Recarga

A Área de Recarga do Sistema Aquífero Guarani é de 89.936 km<sup>2</sup> sendo que o Rio Grande do Sul possui a segunda maior área estadual de recarga, 21.469 km<sup>2</sup>, dentre os estados que estão inseridos no SAG, conforme pode ser visualizado na Figura 15.

**Figura 15 - Distribuição da área do sistema aquífero Guarani, por estado.**

<b>Tabela 5.13 – Distribuição da área do sistema aquífero Guarani, por Estado</b>		
<b>ESTADO</b>	<b>ÁREA TOTAL (km<sup>2</sup>)</b>	<b>ÁREA DE RECARGA (km<sup>2</sup>)</b>
GOIÁS	55.000	9.057
MATO GROSSO	26.400	7.218
MATO GROSSO DO SUL	213.200	25.324
MINAS GERAIS	52.300	409
PARANÁ	131.300	4.358
<b>RIO GRANDE DO SUL</b>	<b>157.600</b>	<b>21.469</b>
SANTA CATARINA	49.200	3.660
SÃO PAULO	155.800	18.441
TOTAL	840.800	89.936

**Fonte: ANA (2005).**

Como uma etapa anterior à estimativa de recarga, Scanlon *et al.*, (2002) propõem que seja elaborada uma modelagem conceitual em relação aos atributos fisiográficos das bacias hidrogeológicas, classificando as unidades geomorfológicas/unidades de paisagens hidrológicas (TÓTH, 1963; WINTER, 2001; VASCONCELOS, 2014).

As modelagens conceituais delimitam áreas potenciais ou favoráveis à recarga. As mesmas podem ser delimitadas a partir da análise de parâmetros do meio sobrepondo mapas-base como geológico/pedológico/geomorfológico e são importantes para a gestão e o planejamento ambiental.

Dentro deste contexto, Vasconcelos (2014) desenvolveu cinco métodos para a caracterização espacial dos processos de recarga e descarga em múltiplas escalas de abordagem, sendo os seguintes: 1) Diagnóstico expedito de recarga de aquíferos em

contextos locais; 2) Caracterização espaço-temporal de dinâmica de ocupação do solo em áreas com favorabilidade a recarga; 3) Mapeamento da contribuição da vazão específica; 4) Modelagem espacial da influência dos atributos ambientais sobre os componentes de fluxo; e 5) Caracterização cartográfica de favorabilidade de recarga de aquífero.






A última metodologia é detalhada por Vasconcelos *et al.*, (2013) e Vasconcelos (2014) utilizada para demarcar e caracterizar áreas favoráveis à recarga, tendo como princípio norteador as áreas a montante das nascentes, através de um plano de interpolação de krigagem que pode ser realizado com geoprocessamento. Para a determinação da favorabilidade, são utilizados dados meteorológicos, geomorfológicos (em relação à posição das nascentes, altimetria, declividade), pedológicos, litoestratigráficos, rede hidrográfica e tipologia de aquífero.

De acordo com Vasconcelos *et al.*, (2013) as áreas topograficamente mais altas têm funções distintas daquelas mais baixas, onde se localizam os cursos d'água, bem como as áreas mais altas em relação às nascentes tem maior infiltração e menor escoamento. Também, em função da altimetria, as áreas mais altas têm maior profundidade do nível de zona saturada.

A metodologia é composta por três etapas principais: 1) A primeira etapa consiste na delimitação das áreas mais altas em relação às nascentes; 2) A segunda etapa é a de caracterização dessas áreas em relação aos processos de recarga dos aquíferos; 3) Na terceira etapa são realizados índices qualitativos mostrando o potencial de áreas para recarga. A aplicação destas três etapas faz com que as áreas sejam definidas como **muito alta favorabilidade**, dois fatores como **alta favorabilidade** e as áreas sem nenhuma das informações serão de **baixa favorabilidade** (VASCONCELOS *et al.*, 2013).

Para Almeida (2015) as Zonas Aflorantes do Botucatu são as que apresentam alta potencialidade de recarga, associadas ao relevo plano suave a ondulado com declividade menor que 3°. Neste trabalho, o referido autor mapeou as áreas potenciais de recarga do SAG em Lajes/SC, delimitando **04 classes**, conforme Figura 16.

Figura 16 - Classes de potencialidade a recarga do SAG.

LEGENDA	
 Nulo	 Alto: Áreas relacionadas ao Arenito Botucatu com declividades superiores a 10% e/ou solos mal drenados
 Baixo: Áreas relacionadas a Formação Serra Geral com declividade superiores a 10% ou com solos mal drenados.	 Muito Alto: Áreas relacionadas ao Arenito Botucatu com relevo plano a suave ondulado e solos bem drenados
 Moderado: Áreas com relevo plano a suave ondulado e solos bem drenados sobre rochas vulcânicas da Formação Serra Geral	

Fonte: Almeida (2015)

Vasconcelos *et al.*, (2013), Vasconcelos (2014) Almeida (2015) realizaram a caracterização do meio em relação à recarga, atribuindo pesos para a soma das variáveis, conforme Figura 17 e 18.

Figura 17 - Exemplo de Notas e Pesos atribuídos para determinar favorabilidade de recarga.

Base	Classe	Nota	Peso	Nota X Peso
GEOLOGIA	Formação Botucatu	8	4	3,20
	Formação Serra Geral	3	4	1,20
	Formações da Base da Bacia do Paraná	0	4	0
DECLIVIDADE	0 a 8%	7	3	2,10
	8 a 20%	4	3	1,20
	> 20%	2	3	0,60
SOLOS	I - Latossolo Bruno	7	3	2,10
	II - Cambissolo textura média/ Terra Bruna Estruturada/ Solos litólicos textura média/ Corpo d'água	6	3	1,80
	III - Terra Bruna Roxa Estruturada	5	3	1,50
	IV - Solos litólicos textura argilosa/ Cambissolo argiloso a muito argiloso	4	3	1,20
	V - Gleissolos	2	3	0,6
	VI - Áreas Urbanas	1	3	0,3

Fonte: Almeida (2015).

**Figura 18 - Exemplo de Notas e Pesos atribuídos para determinar favorabilidade de recarga.**

Soil (drainage)				
Quartzarenic neosols	Latosols	Cambisol, Textural or Plinthic Horizon B soil	Lithosols	Gleysols and fluvisols
6	2.5	1	0.6	0.3
Lithostratigraphy (aquifer recharge)				
Deep porous aquifers	Shallow porous aquifers	Karst	Karstic/fissured	Fissured
3	2.2	1.4	1.1	0.7
Slope (infiltration)				
Flat 0-3%	Gentle-Undulating 3-8%	Undulating 8-20%	Steep-Undulating 20-45%	Steep > 45%
2.5	1.5	1	0.5	0.25
Rainfall				
Meters of rainfall/year				
Topographic height to the level of the springs				
Below - 5 meters Discharge	From - 5 to 5 meters Fluctuation of phreatic contact		From 5 to 20 meters Transience	Above 20 meters Recharge
0.7	0.85		1.6	2.25
Height to the downstream watercourse				
Below 10 meters Discharge	From 10 to 20 meters Fluctuation of phreatic contact		From 20 to 40 meters Transience	Above 40 meters Recharge
0.7	0.85		1.6	2.25

Fonte: Vasconcelos *et al.*, (2013).

As informações acerca do meio serão detalhadas nos próximos subcapítulos, caracterizando assim a área de ocorrência da arenização, em relação aos atributos necessários para a delimitação das áreas de recarga, como geomorfologia, pedologia, geologia e hidrogeologia.

## 2.6 Aspectos geomorfológicos relacionados à recarga e arenização

O relevo possui papel importante para a recarga, uma vez que as diferentes características do mesmo, como declividade e altimetria modificam as taxas de infiltração e de recarga da precipitação. Nesse contexto, o relevo se firma como um importante elemento a ser estudado, já que as características do relevo condicionam os fluxos superficiais (água, nutrientes, sedimentos e contaminantes), bem como a superfície freática, comumente, tende a acompanhar as formas de relevo (KING, 1899, MOORE *et al.*, 1991).

A recarga em regiões úmidas é normalmente considerada como ocorrendo em topografias mais altas e a descarga em topografias mais baixas, pois correspondem a áreas de confluência fluvial. Além disso, nas bacias com cursos d'água perenes ocorre movimentação nos sistemas aquíferos que obedecem ao controle topográfico,

direcionando as águas aos drenos principais com caráter efluente, recebendo assim controle das águas subterrâneas (CETEC, 1981; SOUZA & FERNANDES, 2000; RENNÓ & SOARES, 2003; MARTELLI 2012).

Dentro deste contexto, a recarga ocorre principalmente em áreas de topo e aplainadas. Nas áreas mais baixas, como é o caso dos vales fluviais, a recarga se torna mais difícil em função da proximidade do lençol freático e da zona saturada. Além disso, onde ocorrer maior declividade, será menor a possibilidade de recarga (TEIXEIRA *et al.*, 2000; WEILL e PIRES NETO, 2007; AUZANI, 2010; VASCONCELOS, 2014).

Do topo para as áreas mais baixas, diminuem-se as áreas de recarga e aumentam-se as áreas de descarga, com a acumulação dos fluxos hidrogeológicos participando do escoamento de base na vazão dos cursos d'água (SOUZA e FERNANDES, 2000; VASCONCELOS, 2014).

As maiores taxas de recarga ocorrem nas regiões planas, bem arborizadas e nos aquíferos livres. Nos locais com relevo acidentado é favorecida o escoamento superficial em função do declive, com a recarga ocorrendo de forma mais lenta e de modo limitado. Destaca-se também o relevo em média vertente, pois a água das regiões mais elevadas para ela se direciona e devido à umidade concentrada nas áreas mais baixas, faz com que o fluxo seja mais lento. Favorece-se, assim, a recarga nas regiões centrais das bacias (VASCONCELOS, 2014).

Rennó & Soares (2003) analisaram a recarga e a descarga dos aquíferos freáticos por meio do controle altimétrico e Souza & Fernandes (2000), em outra abordagem consonante, propõem a delimitação de áreas de recarga e descarga por critérios de declividade e topologia altimétrica, uma vez que as áreas altimetricamente acima das nascentes se apresentam como unidades de paisagem relevantes para a recarga dos aquíferos (VASCONCELOS, 2014).

Crave e Gascuel-Odoux (1997), demonstraram que as áreas altimetricamente mais elevadas em relação às nascentes usualmente apresentam maior infiltração e menor escoamento superficial, pois, em decorrência do movimento da água subterrânea/subsuperficial direcionado pelo potencial hidráulico-gravitacional, constituem-se áreas com menor umidade superficial do solo no momento anterior a precipitação e com maior profundidade da zona saturada. Além disso, estas áreas apresentam funções hidrogeológicas distintas daquelas a jusante, em especial no que diz respeito à predominância da função de recarga de aquíferos.

Por fim, destaca-se que em monitoramento temporal da recarga, Baum *et al.*, al (2018) identificou que os poços localizados em zonas com maior profundidade no nível de água e próximos aos divisores de água possuem influência significativa nos níveis de recarga. Sendo assim, interpreta-se que geomorfologicamente as áreas de recarga localizam-se em média encosta, em locais com baixa declividade e no contato entre o topo e a base das vertentes, sendo estes os locais associados aos processos erosivos da arenização, uma vez que de acordo com Suertegaray (1987), Verdum (1997) e Caneppele (2017) o processo de arenização localiza-se associado às cabeceiras de drenagem, e, no contato entre as rampas arenosas e o segmento rochoso dos morros testemunhos, localmente denominados de cerros.

## **2.7 Aspectos lito-estruturais relacionados à recarga do aquífero e arenização.**

O SAG está assentado sobre rochas sedimentares do Paleozoico que possuem baixa permeabilidade, enquanto no topo, em sua maior parte encontra-se recoberto por lavas basálticas, se comportando, portanto, como confinado. Nas bordas leste e oeste da Bacia Sedimentar do Paraná ocorre o afloramento do pacote sedimentar, sendo estas litologias consideradas como áreas de recarga (ROCHA, 1997). Sendo assim, as litoestruturas associadas à arenização e ao SAG estão descritas abaixo.

A Formação Sanga do Cabral é uma espessa sucessão flúvio-eólica, originada no Triássico inferior e caracterizada por conglomerados intraformacionais e arenitos conglomeráticos selecionados com estratificação cruzada, sugerindo um sistema fluvial entrelaçado, efêmero e pobremente canalizado com intenso retrabalhamento pelo vento da planície aluvial, levando a deposição de arenitos de origem eólica (LAVINA, 1988; MILNER, 2000).

A Formação Guará é a principal formação associada à arenização (Guasselli *et al.*, 2010, Robaina *et al.*, 2015). Ela é originária de sistemas deposicionais tanto eólicos, na forma de dunas e lençóis de areia, tanto como fluviais, na forma de cursos d'água entrelaçados. Esses depósitos eólicos e fluviais são provenientes das oscilações climáticas ocorridas no Jurássico Superior, cerca de 160 milhões de anos atrás, sendo correlacionada com a formação Taquarembó, principal formação do SAG no Uruguai (SOARES 2008, SOARES *et al.*, 2009, TRENTIN *et al.*, 2015.).

A Formação Guará se constitui, na área de ocorrência da arenização, como a mais importante unidade hidroestratigráfica, com capacidades específicas médias entre 2 e 4 m<sup>3</sup>/h/m e vazões que ultrapassam 100 m<sup>3</sup>/h (MACHADO *et al.*, 2005).



Configuram-se, portanto, em áreas de reservatório hídrico importante e de grande preocupação e cuidado nas dinâmicas de uso e ocupação da terra.

A Formação Botucatu é mais recente que a Formação Guará, sendo formada por volta de 132 milhões de anos atrás, em condições de aridez decorrentes da disposição dos continentes durante o período Cretáceo. Araújo *et al.*, (1995) destacam uma porosidade média de 17% e uma condutividade hidráulica de 0,2 a 4,6 m/dia, são pobremente cimentadas e possuem boa maturidade textural, com arcabouço constituído grãos de quartzo bem arredondados e selecionados.

Segundo Auzani (2010) essa unidade apresenta alta permeabilidade<sup>10</sup> e porosidade, considerada de alta vulnerabilidade, pois são rochas permeáveis e têm facilidade de infiltração de água para a subsuperfície e, com isso, o carregamento de poluentes.

A Formação Serra Geral, atualmente denominada Grupo Serra Geral (CPRM, 2022) recobre atualmente aproximadamente 75% da Bacia Sedimentar do Paraná e se formou durante vulcanismo ocorrido em função da separação dos continentes. Este episódio ocorreu durante o Mesozoico (Eocretáceo) a cerca de 127 e 137 milhões de anos atrás (NARDY *et al.*, 2002; MILANI *et al.*, 2007).

A Formação Serra Geral está associada à Formação Botucatu, podendo ser encontradas intercaladas entre si, indício da intermitência dos derrames e da persistência de um clima desértico concomitante com o início da efusão (JABUR, 1985; SCHERER *et al.*, 2000; NARDY, 1996; NARDY *et al.*, 2002). Milani *et al.*, 2007 indicam que quase 2.000 m de espessura de lavas basálticas se acumularam em consonância entre a abertura do Atlântico e a sedimentação do Botucatu.

Regionalmente se destacam as *fácies* Gramado e Caxias. A primeira se refere a um grupamento de rochas básicas, com granulação muito fina que repousam diretamente sobre a Formação Botucatu, com a ocorrência de derrames intercalados com arenitos (NARDY, 1996; NARDY *et al.*, 2002; CPRM, 2006). A *fácies* Caxias está depositada sobre a *fácies* Gramado, com a ocorrência de riolitos e riodacitos que indicariam os últimos fluxos de lava da Formação Serra Geral (NARDY *et al.*, 2008).

Os depósitos quaternários estão associados às planícies aluviais nas atuais planícies de inundação, além dos terraços fluviais contemporâneos, relacionados à dinâmica erosiva-deposicional da rede de drenagem fluvial. Além disso, existem

---

<sup>10</sup> Capacidade que um sólido tem de deixar que um fluido atravesse seus poros. Geralmente aumenta com o aumento da porosidade (PRESS *et al.*, 2006).

formações superficiais provenientes do retrabalhamento dos arenitos das formações Guará e Botucatu que foram alçadas a cotas de 300 metros, elevando o nível de base regional, no denominado “Muro de Manoel Viana”. (TRAININI, 2005; BINDA, 2016, DUMMER, 2019).

Suertegaray (1987) identificou, individualizou e relacionou à arenização duas formações superficiais em seu estudo no município de Quaraí/RS. A Unidade A ocorrendo em cotas altimétricas que variam de 120 a 140 metros e a Unidade B ocorrendo em cotas que variam de 140 a 180 metros. Estas formações são provenientes das dinâmicas climáticas do período quaternário, se constituindo em depósitos arenosos não consolidados, originários de deposição fluvial e eólica. Segundo Suertegaray (1987), a Unidade A é proveniente de:

Uma fase úmida, ocorrida provavelmente no final do Pleistoceno, início do Holoceno, cujos indicadores são os depósitos fluviais encontrados sobre as formações areníticas mesozoicas (formação Botucatu). Esta unidade poderia estar, no nosso entender, correlacionada aos horizontes mais profundos dos solos hidromórficos escuros estudados na região da campanha do Rio Grande do Sul por Bombim e Klant (1974) e decorrentes de uma deposição fluvial e/ou lacustre em clima mais úmido, relativo ao optimum pós-glacial. (SUERTEGARAY 1987, p. 122).

Enquanto a Unidade B é proveniente de:

De um ressecamento climático, durante o Holoceno, não necessariamente mais frias que as fases glaciais, datada através de estudos elaborados por Muller, em perfis estratigráficos na campanha gaúcha em 4.000 A.P., e por Bigarella (1964), Vanzolini e Ab’Saber (1968) em aproximadamente 3.500 A.P., em término em torno de 2.400 A.P. (SUERTEGARAY 1987, p. 122).

Ambas as formações superficiais são frágeis do ponto de vista litológico e estão localizadas em baixas altitudes, sendo comum nas cabeceiras de drenagem das coxilhas e nas rampas entre os cerros<sup>11</sup> e as coxilhas. É por sobre a Unidade B que se encontram localizados, principalmente, os focos da arenização, em função do substrato arenoso ser constituído em grande parte de deposição eólica, com mais de 90% da sua constituição sendo de quartzo, (VERDUM *et al.*, 2014.).

Segundo Camponogara (2006) nos arenitos da Formação Botucatu e nos sedimentos Cenozoicos (aluviões), a condutividade hidráulica é maior que nos basaltos,

---

<sup>11</sup> Denominação local para morros.

pois a percolação da água ocorre com maior facilidade, devido à grande permeabilidade, fato este que facilita a circulação da água no interior destas Formações.

## **2.8 Aspectos pedológicos relacionados à recarga do aquífero e arenização.**

O tipo de material de cobertura da superfície da terra é um dos fatores determinantes no processo de infiltração/recarga de água. Os solos definem o volume e a quantidade de água que infiltra e/ou que excede, ocasionando o escoamento superficial.

Solos com maiores teores de argila ou com grande compactação são os de mais demorada infiltração, porém retém mais água devido aos microporos. No caso dos solos arenosos, as taxas de infiltrações tendem a ser maiores nos momentos iniciais em função da existência de macroporos que facilitam a infiltração e permitem a drenagem livre da água do solo, porém estes solos retêm pouca água, e em função da baixa coesão facilita-se a erosão (AZEVEDO *et al.*, 2007; STÜRMER, 2008; WEILL e PIRES NETO (2007); AUZANI, (2010); OLIVEIRA *et al.*, 2018). Em relação à textura Streck *et al.*, (2008) coloca que, nos solos com texturas uniformes a taxa de infiltração da água é geralmente maior nos solos arenosos em comparação aos argilosos.

Dentro deste contexto, destacam-se as principais classes de solo da área de ocorrência da arenização<sup>12</sup> sendo os Neossolos Litólicos, Regolíticos, Quartzarênicos hidromórficos e órticos, os Argissolos, os Cambissolos, os Gleissolos, os Latossolos, os Nitossolos e os Planossolos (AUZANI, 2010; VIERO e ANDRADE, 2010; OLIVEIRA, 2015). Já as feições da arenização estão associadas aos Neossolos Quartzarênicos órtico (RQo) e aos Neossolos Quartzarênico hidromórfico (RQg), Associação entre Argissolos Vermelhos Distróficos e Argissolos Brunoacinentados (PVd) e aos Latossolos Vermelho Distrófico (LVd) (OLIVEIRA, 2015).

Os Argissolos são geralmente profundos a muito profundos, com a presença de um horizonte subsuperficial mais argiloso no perfil, sendo que os Argissolos de cores vermelhas e vermelho-amarelos possuem boa drenagem, ocorrendo uma rápida infiltração, que diminui no horizonte B, diferentemente dos bruno-acinentados que ficam saturados em determinados períodos do ano (STRECK *et al.*, 2008; OLIVEIRA, 2015). Os Argissolos estão localizados no terço médio das coxilhas ou rampas arenosas,

---

<sup>12</sup> Considerando o mapeamento de solos em escala 1:100.000 efetuado na Bacia do Arroio Inhacundá (vizinha a BHAM) por Oliveira (2015) e mapeamento da Carta Topográfica da Vila Kramer, que engloba uma porção da BHAM, em escala 1:50.000 efetuada por Auzani (2010).

até sua conexão com o compartimento da várzea e são considerados muito suscetíveis à erosão. Oliveira (2015) identificou que esses são os solos mais impactados por voçorocamento, em função da mudança textural abrupta entre os horizontes, com menor infiltração devido ao horizonte B (STRECK *et al.*, 2008; OLIVEIRA, 2015).

Segundo Streck *et al.*, (2008) os Cambissolos são solos rasos a profundos, com horizonte Bi (Incipiente) e são solos bem drenados a imperfeitamente drenados, dependendo da ocupação topográfica, enquanto os Gleissolos estão presentes em ambientes alagadiços, muito mal drenados com cor acinzentada. Por último, os Planossolos encontrados em áreas de várzeas imperfeitamente ou mal drenados, sendo diferenciado dos Gleissolos pela mudança abrupta de textura nos horizontes mais superficiais.

Os Latossolos são solos profundos e homogêneos decorrentes de alta intemperização, sendo bem drenados e com muita porosidade se tornando friáveis. Conforme Oliveira (2015) os LVd são solos espessos e considerados como não muito suscetíveis à erosão, porém a partir do inadequado manejo podem se tornar altamente suscetíveis à erosão hídrica, além disso, apresentam boas taxas de infiltração (VERDUM, 1997; SARTORI *et al.*, (2005), STRECK *et al.*, 2008; OLIVEIRA, 2015).

Os Nitossolos possuem uma aparência similar aos Latossolos, sendo também profundos, com pouco incremento de argila e apresentam uma transição difusa e gradual entre os horizontes, se diferenciando dos Latossolos pela presença de horizonte B com estrutura mais desenvolvida (STRECK *et al.*, 2008).

Os Neossolos são solos novos e pouco desenvolvidos, podendo ser rasos ou profundos, dividindo-se em 04 na área de ocorrência da arenização. Os Neossolos litólicos são caracterizados por possuir horizonte A ou O assentado diretamente sobre o horizonte C e não possuem efetivo armazenamento de água com poder de infiltração muito baixo. Os Neossolos Quartzarênicos hidromórficos são solos que apresentam lençol freático elevado durante grande parte do ano. Os Neossolos regolíticos que apresentam o horizonte A assentado sobre a rocha totalmente alterada e contato lítico em profundidade maior que 50 cm e os Neossolos Quartzarênicos órticos apresentam o horizonte A assentado sobre sedimentos muito arenosos, constituídos por grãos soltos de quartzo (STRECK *et al.*, 2008; AUZANI, 2010).

Os Neossolos Quartzarênicos órticos são solos novos, rasos ou profundos, com maiores teores de areia e baixos teores de argila, de nutrientes e de matéria orgânica (inferior a 15%), proporcionados pela rápida decomposição dos resíduos vegetais e pela

baixa cobertura vegetal (STRECK *et al.*, 2008; VERDUM, 2012). Estes solos estão associados às rampas arenosas no contato entre as coxilhas e os cerros e são característicos da arenização. Segundo Scopel *et al.*, (2012) possuem:

Baixa capacidade de água disponível, baixa CTC, baixos teores de MOS, são ácidos e, muitas vezes álicos, dispõem de baixos teores de nutrientes necessários para as plantas, são excessivamente drenados, com altas taxas de infiltração de água no solo e valores elevados de condutividade hidráulica saturada, facilitando a lixiviação dos nutrientes (SCOPEL *et al.*, 2012, p.536).

As características do solo identificadas por Streck *et al.*, (2008), Scopel *et al.*, (2012) e Verdum (2012) dão a esse solo um potencial e um limitante, que determinam a vegetação predominantemente herbácea e gramínea, característica do Bioma Pampa e que na região está adaptada aos períodos chamados de “secos” com grande estresse hídrico, irradiação intensa e temperaturas extremas, porém, possuem alta permeabilidade e infiltração (KLAMT e SCHNEIDER, 1995; FREITAS, 2010; SCOPEL *et al.*, 2012; SCOPEL, 2012; OLIVEIRA, 2015).

## **2.9 Dinâmicas pluviométricas associadas à infiltração e recarga.**

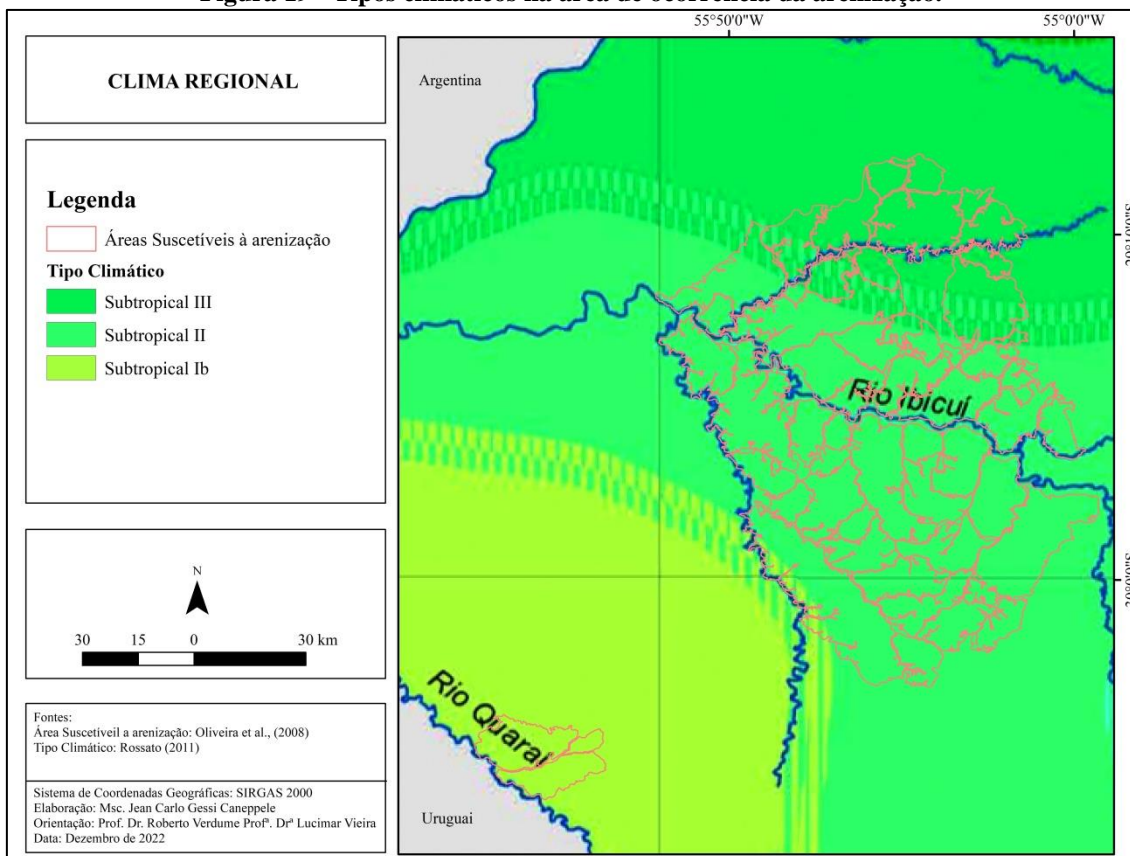
O entendimento das dinâmicas da precipitação é importante para analisar a questão da recarga, uma vez que ela é uma das principais formas de entrada de água em bacias hidrográficas. Uma parcela da água infiltra e pode ficar momentaneamente armazenada, podendo recarregar e abastecer os cursos d'água, sustentando muitas vezes as vazões em períodos de estiagem (LEOPOLD, 1960; CHRISTOFOLETTI, 1982; SUGUIO E BIGARELLA, 1990; COELHO NETTO, 2011).

Para o Rio Grande do Sul, Moreno (1961) chama a atenção para o fato de que as chuvas no inverno tendem a apresentar longa duração e baixa intensidade, em oposição ao que pode ser observado durante o verão, quando as chuvas são intensas e rápidas. Conforme expressa o autor, no verão as chuvas “[...] são em forma de fortes aguaceiros, que podem produzir tanta precipitação, como em uma semana de chuvas inverniais [...] se perdem [...] nas rápidas torrentes [...]” (MORENO, 1961, p.63). Nesse sentido, cumpre ressaltar, que na área da arenização, sobretudo no verão, as chuvas mensais são distribuídas em poucos dias (VERDUM, 1997; ROSSATO 2011 e 2012; BINDA, 2016).

Regionalmente, Rossato (2011) identificou três tipos de climas predominantes (Figura 19): Clima **Subtropical III: Úmido com Variação Longitudinal das**

Temperaturas Médias; Clima **Subtropical II**: Medianamente Úmido com Variação Longitudinal das Temperaturas Médias e **Subtropical Ib**: pouco úmido com inverno frio e verão quente. As precipitações nestes três tipos climáticos ocorrem principalmente a partir de Sistemas Frontais.

**Figura 19 - Tipos climáticos na área de ocorrência da arenização.**



**Fonte: Elaborado por Caneppele, J. 2022**

O Clima Subtropical III possui menor influência dos sistemas polares, estando associado ao Planalto Meridional, com possibilidade de chuvas orográficas. Além disso, a precipitação anual varia de 1700-1800 mm, distribuídas em 100-120 dias, ocorrendo entre 9-12 dias por mês. O Clima Subtropical II é caracterizado pela maior influência dos sistemas polares, com influência do relevo, continentalidade e da maritimidade, estando associado a unidade geomorfológica da Depressão Central. Em relação à precipitação, ela oscila anualmente entre 1500-1700 mm, distribuídas em 90-110 dias, caindo entre 6-9 ou 9-12 dias por mês e o Clima Subtropical Ib que possui uma interferência da continentalidade, definida pela atuação dos sistemas de circulação polares, com participação significativa dos sistemas tropicais continentais. Assim, ocorrem precipitações médias anuais entre 1400 e 1700 mm com uma concentração

entre 70 e 90 dias (ROSSATO, 2011). Sendo assim, as precipitações anuais nesses tipos climáticos foram elencadas no Quadro 8.

**Quadro 8 - Tipos de Clima da área de ocorrência da arenização e Pluviometria Anual.**

<b>Tipo de Clima</b>	<b>Pluviometria Anual</b>
Subtropical Ib: Pouco úmido com inverno frio e verão quente	1400 mm a 1700 mm
Subtropical II: medianamente úmido com variação longitudinal das temperaturas médias	1500 mm a 1700 mm
Subtropical III: úmido com variação longitudinal das temperaturas médias	1700 mm a 1800 mm

**Fonte: Tipo de Clima e pluviometria anual.**

Corroborando os dados apresentados por Rossato (2011), Simon (2017), através do somatório das precipitações mensais de sete estações inseridas na Bacia Hidrográfica do Ibicuí identificou que a precipitação varia de 1400 mm a 1900 mm, com os maiores valores na porção norte, ou seja, no clima Subtropical III. Além disso, Simon (2017), através dos dados de precipitação do Atlas Pluviométrico do Brasil elaborado pela CPRM em 2014, demonstrou a sazonalidade das precipitações na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, identificando que o mês mais chuvoso para o período foi abril, seguido por outubro e novembro e os meses mais secos são maio e setembro, com queda da precipitação em dezembro.

Mesmo que dezembro possua chuvas menos representativas, Binda (2016) identificou que as vazões do Arroio Miracatu, curso d'água estudado na sua pesquisa, encontram-se acima de meses mais chuvosos, demonstrando que os eventos convectivos veranís pouco contribuem para o abastecimento dos aquíferos livres, escoando em episódios torrenciais, enquanto no inverno, as chuvas frontais de menor intensidade favorecem a infiltração e conseqüentemente a recarga.

Sendo assim, as dinâmicas hídricas associadas à arenização são sustentadas por eventos hidrológicos extremos e torrenciais, analisados por Verdum (1997), Sanches (2013) e Binda (2016). Binda (2016) identificou uma precipitação anual média de 1655,7 mm e mediana de 1601 mm distribuídas em cerca de  $73 \pm 17$  dias com chuva,

porém “há variabilidade interanual, tanto na pluviosidade como na quantidade de dias chuvosos.” (Binda, 2016, p.79). Além disso, podem ser traçados dois regimes de chuva:

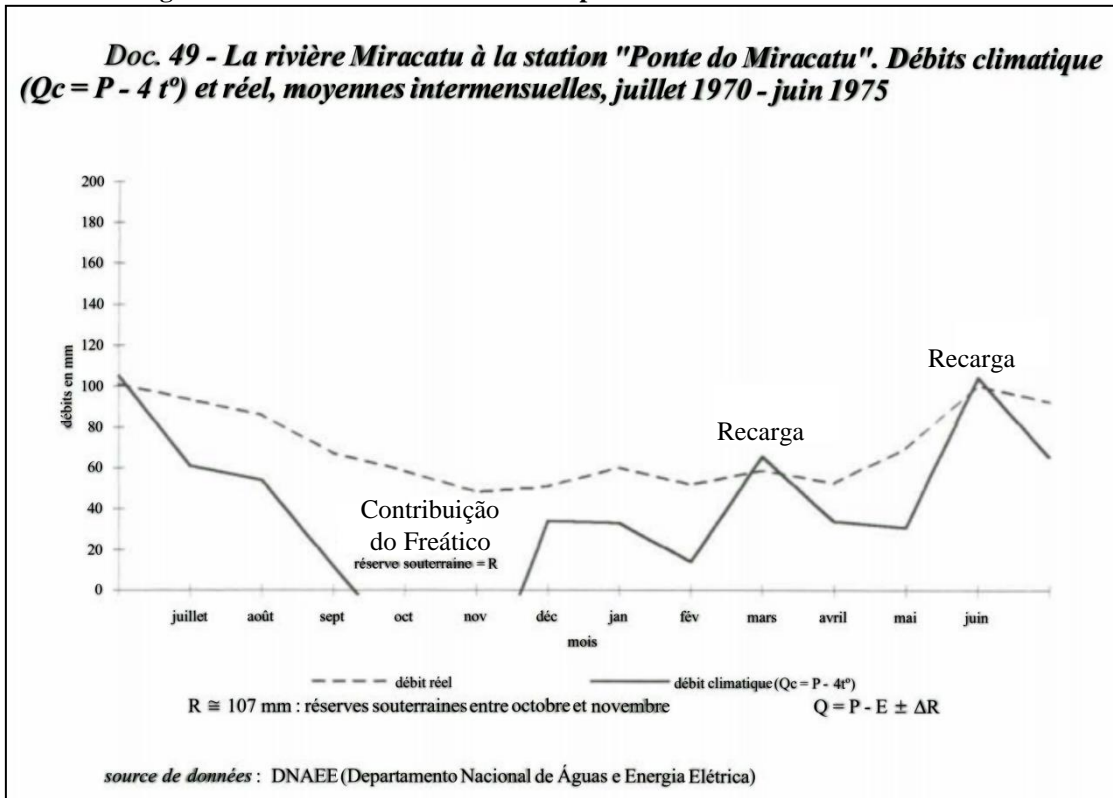
Anos-padrão secos e tendentes a secos que, a princípio, por apresentarem totais pluviométricos reduzidos, tenderiam a ser tidos como de incipiente dinâmica, exibem importante contribuição das maiores chuvas anuais, o que inclui tanto as chuvas extremas como aquelas estatisticamente menores, mas que parecem ter importante significado geomorfológico (chuvas torrenciais).[...]Em oposição, encontram-se os anos-padrão chuvosos e tendentes a chuvosos que, apresentando elevado volume de chuvas anuais, tendem a apresentar maior frequência de chuvas extremas que desencadeariam importantes processos de esculturação (BINDA 2016, p. 120).

Segundo Verdum (1997) no regime pluviométrico podem ser identificado dois máximos (meses de abril e setembro) e dois mínimos (meses de agosto e dezembro), porém, Binda (2016) identificou uma migração do mês chuvoso de setembro para outubro, além de uma precipitação elevada para o mês de novembro. Sanches (2013), trabalhando com dados de Alegrete/RS, percebeu, justamente, a existência de tendência positiva para as chuvas no mês de novembro, com destaque para aquelas acima de 80 mm. Esses valores são condizentes com aqueles apresentados por Rossato (2011 e 2012) para o sudoeste do Rio Grande do Sul e tonificam a hipótese de que as chuvas mensais são distribuídas em poucos dias.

Em sua tese de doutorado, Verdum (1997) elaborou um sistema hidrológico da BHAM, considerando que o regime do arroio principal reflete a estrutura hidrológica da própria bacia e que pode ser lida a partir dos hidrogramas elaborados pelo autor. Comparando o débito climático (diferença entre precipitação e evapotranspiração) e o débito real foi possível uma primeira aproximação da estrutura hidrológica, assim como detectar a flutuação de reservatórios subterrâneos. Na Figura 20 é possível a identificação de que entre os meses de setembro e novembro o freático contribui com a dinâmica do curso d'água, além disso, em março e em junho têm-se dois picos com a ocorrência de recarga.



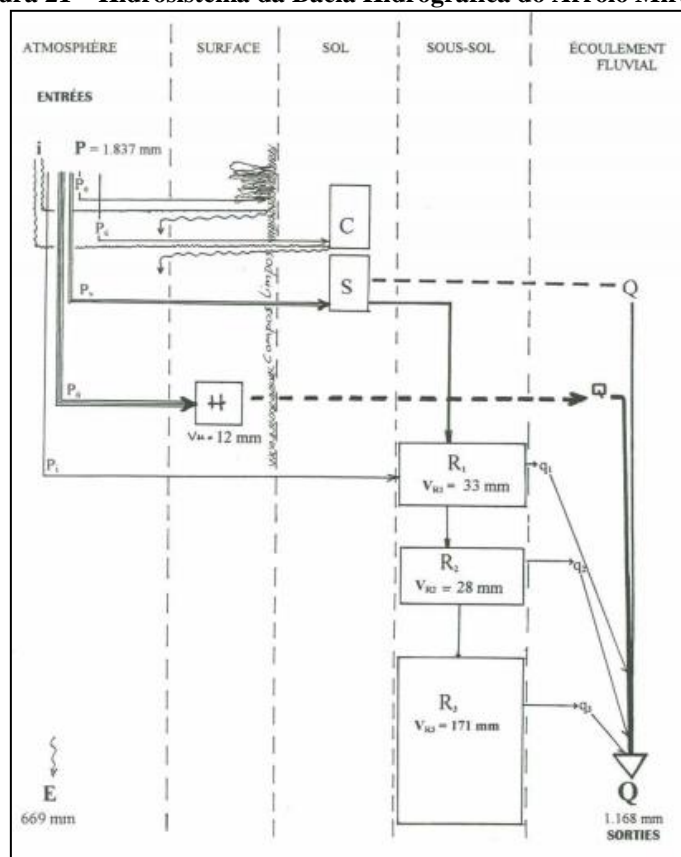
Figura 20 - Débits climáticos e sua resposta nos reservatórios subterrâneos.



Fonte: Adaptado de Verdum (1997)

Os reservatórios subterrâneos são assinalados no Hidrosistema (Figura 21) elaborado por Verdum (1997), com a mensuração dos volumes dos mesmos através da lei de Maillet, utilizando para isso os débits máximos de cada fase hidrológica do período analisado (1970-1975), obtendo-se assim a capacidade máxima volumétrica dos reservatórios.

**Figura 21 – Hidrosistema da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu**



Fonte: Verdum (1997)

Além disso, o trabalho de Verdum (1997) identificou, através dos débitos mensais do arroio principal, seis fases hidrológicas e quatro estações hidrológicas. Esta análise permitiu avaliar a variabilidade da dinâmica atmosférica e as respostas da BHAM durante um período de seca atmosférica e em tempos de episódios de pluviosidade intensa, as chuvas torrenciais. A primeira fase começa com episódios de chuva com a umidificação de solos com texturas mais arenosas. A segunda fase é caracterizada pela retenção capilar e pela saturação dos solos. A terceira fase é caracterizada pelo aumento do nível do curso d'água e a quarta fase pelo encerramento da precipitação e aumento do nível da lâmina d'água. A quinta fase consiste no rebaixamento do lençol freático superficial e a sexta no esvaziamento do lençol freático profundo (VERDUM, 1997).

Em relação às estações hidrológicas identificadas por Verdum (1997), têm-se o verão hidrológico (1) com menor pluviosidade e conseqüentemente rebaixamento dos lençóis freáticos superficiais e profundo, além da descarga do lençol freático muito profundo; O outono hidrológico (2) que não ocorre todo ano e alterna períodos de seca atmosférica e períodos com pluviosidade e mantém o débito de base estável; O inverno

hidrológico (3) com episódios de alta pluviosidade entre janeiro e fevereiro e mais frequentemente a partir de maio. Esta estação é caracterizada pela recarga dos aquíferos. Por último, a primavera hidrológica (4) caracterizada pela evapotranspiração com a descarga dos lençóis freáticos.

Sendo assim, o Arroio Miracatu, situado nos municípios de São Francisco de Assis (trecho superior e médio) e Manoel Viana (trecho inferior), funciona como uma área de descarga em períodos de vazante, principalmente nos meses de baixa pluviosidade quando a alimentação fluvial é favorecida pela água subterrânea, enquanto nos meses entre março e junho há indícios de **recarga**, principalmente por serem os meses de maior pluviosidade (VERDUM, 1997).

Temos, portanto, uma dinâmica pluviométrica singular na área da arenização, caracterizada por eventos de torrencialidade e concentrados, com as precipitações variando conforme o tipo climático e estações do ano, influenciando na infiltração e recarga. A pluviometria identificada pelos autores está elencada no Quadro 9.

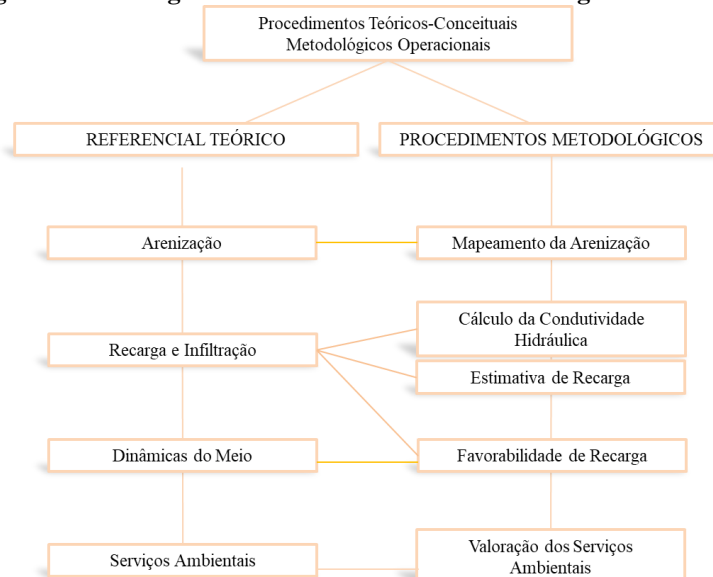
**Quadro 9 - Pluviometrias anuais identificadas por autores na área de ocorrência da arenização.**

<b>Autor</b>	<b>Informações</b>	<b>Pluviometria Anual</b>
Rossato (2011)	Clima Subtropical Ib: Pouco úmido com inverno frio e verão quente	1400 mm a 1700 mm
	Clima Subtropical II: medianamente úmido com variação longitudinal das temperaturas médias	1500 mm a 1700 mm
	Clima Subtropical III: úmido com variação longitudinal das temperaturas médias	1700 mm a 1800 mm
Simon (2017)	Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí	1400mm a 1900mm
Binda (2016)	Sub-bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu	1655mm e 1601mm

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A partir do referencial teórico foram estruturados os procedimentos metodológicos que estão divididos em cinco: 1) Espacialização das feições arenosas associadas à arenização; 2) Cálculo da condutividade hidráulica em Neossolos Quartzarênicos órticos na área de ocorrência da arenização; 3) Estimativa da recarga em unidades hidroestratigráficas do SAG na área de ocorrência da arenização; 4) Mapeamento das áreas favoráveis à recarga no SAG na área de ocorrência da arenização; 5) Aplicação da metodologia TEEB. Os procedimentos estão elencados na Figura 22 abaixo:

**Figura 22 - Fluxograma dos Procedimentos Metodológicos realizados**



#### 3.1 Mapeamento das feições arenosas.

Para a atualização do mapeamento dos areais e a vetorização das ravinas e das voçorocas foram efetuadas três etapas. A primeira etapa consistiu na aquisição dos arquivos *shapefiles* referentes ao último mapeamento do ano de 2010, produzido por Sirangelo (2010). Estes arquivos foram adicionados no *software* ArcGis 10.3 para identificação preliminar da localização da arenização.

A segunda etapa consistiu na aquisição de imagens de satélite CBERS 4A<sup>13</sup>, uma vez que são gratuitas, atualizadas e de média resolução, com resoluções que variam de

<sup>13</sup> Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres - O Programa CBERS nasceu de uma parceria inédita entre Brasil e China no setor técnico-científico espacial. Com isto, o Brasil ingressou no seleto grupo de Países detentores da tecnologia de geração de dados primários de sensoriamento remoto. INPE (2018).

2m a 60m. As imagens foram baixadas do sítio eletrônico do INPE<sup>14</sup> estando datadas de Outubro e Novembro de 2022, uma vez que a área da arenização não é coberta por uma só imagem, mas sim por um mosaico de cinco imagens.

As mesmas foram processadas no software QGis 3.16, através dos procedimentos de 1) Miscelânea (Raster>Miscelânea>Mesclar>Camadas de Entrada>Bandas – 321 – arquivos de entrada em bandas separadas >Tipo de dado de saída – Int16), 2) Superimpose (Processar>Caixa de Ferramentas>OTB>Geometry>Superimpose>Banda0+Composição321>output pixel type – Int16; 3)Pansharpening (Processar>Caixa de Ferramentas>OTB>Geometry>Pansharpening>Banda0+resultadodasuperimpose> output pixel type – Int16, os dois últimos utilizando o plugin Orfeo Tooblbbox.

A terceira etapa consistiu na validação dos polígonos dos areais, sendo realizada a sua atualização, com o aumento ou a diminuição da sua área, comparando o ano de 2010 e o ano de 2022, utilizando as imagens CBERS4A para verificação da existência do areal e as imagens do Google Earth inseridas no *software* QGis 3.16.2 para vetorização dos mesmos.

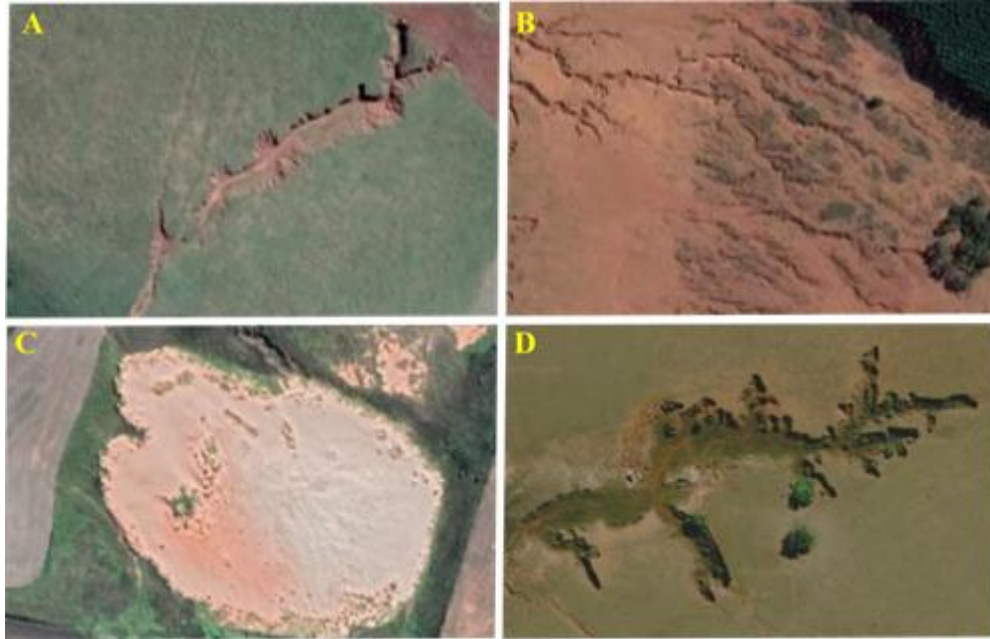
Destaca-se que nos locais onde houve plantio de exóticas sobre os areais demarcados, a feição foi mantida, uma vez que mesmo com o plantio o processo de escoamento difuso, concentrado e a mobilização de sedimentos continua ocorrendo (CANEPPELE, 2017).

De posse destes arquivos, eles foram inseridos no *software* ArcGis 10.3, sendo realizada a cartografia temática, especializando as feições erosivas de acordo com o seu estágio de formação: Ravina, Ravinamento, Voçoroca e Areal (Figura 23). Por fim, a área dos areais foi calculada para servir de base para a metodologia TEEB.

---

<sup>14</sup> <http://www2.dgi.inpe.br/catalogo/explore>

**Figura 23 – Feições erosivas mapeadas: (A) Ravina; (B) Ravinamento; (C) Areal; (D) Voçoroca.**

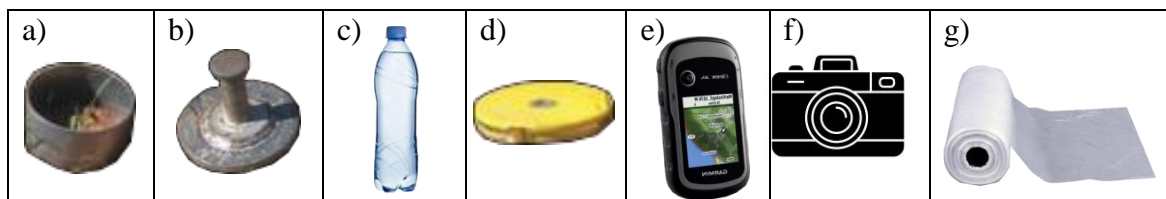


**Fonte: Elaborado pelo autor.**

### **3.2 Cálculo da condutividade hidráulica em Neossolos Quartzarênicos órticos**

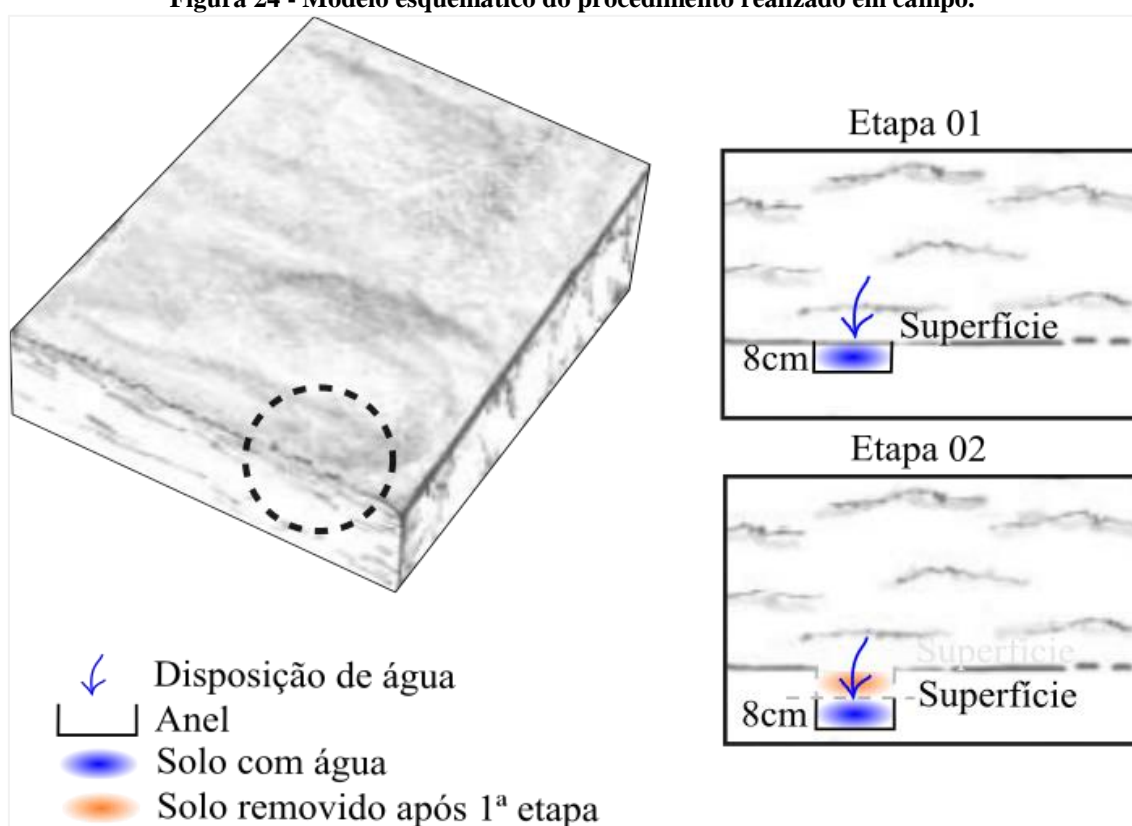
O segundo procedimento consistiu no cálculo da condutividade hidráulica em Neossolos Quartzarênicos órticos, através do método de Bagarello *et al.*, (2004) Dentro deste contexto, este procedimento foi realizado em três etapas: 1) Trabalho de Campo para realizar os ensaios de infiltração; 2) Análise laboratorial; 3) Cálculo da Taxa de Condutividade Hidráulica. Sendo assim, para a primeira etapa foi necessário à utilização dos seguintes equipamentos:

- a) Anel de Infiltração;
- b) Tampa do Anel para inserção homogênea do anel no solo;
- c) Recipiente com água;
- d) Trena de 30 metros;
- e) GPS Garmin;
- f) Câmera fotográfica;
- g) Saco plástico;



Os ensaios foram realizados duas vezes em cada local, no dia 27/08/2021, no município de São Francisco de Assis/RS, com a inserção do anel de metal a uma profundidade de 8 cm da superfície, utilizando para isso a tampa do anel, que garante a entrada uniforme no solo. Após foi despejado água de forma homogênea dentro do anel, até que toda superfície ficasse com água, sendo contabilizado o tempo em que a água deixa de estar “empochada” no solo. Posteriormente, retirou-se o anel junto com a camada de solo de 8 cm, gerando uma nova superfície, sendo o anel inserido a mais 8 cm de profundidade, repetindo a colocação de água e contabilização do tempo.

**Figura 24 - Modelo esquemático do procedimento realizado em campo.**



Para auxiliar no registro das informações, foi elaborado o Quadro 10.

**Quadro 10 - Informações coletadas durante o trabalho de campo.**

Local	Tempo – 0 cm – 8 cm	Tempo – 8 cm a 16 cm	Coordenadas Geográficas

A segunda etapa consistiu na coleta de amostras do solo antes dos ensaios, para determinação dos dados de umidade do solo seco e úmido em laboratório. As amostras

foram transportadas, em sacos vedados e identificados de acordo com o local e numeração em que foram coletadas, até o Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, onde foram realizados os procedimentos para identificação da umidade do solo seco e solo úmido, através da secagem em estufa. Para auxiliar no registro das informações, foi elaborado o Quadro 11.

**Quadro 11 - Informações tabuladas em laboratório.**

<b>Lata</b>	<b>Tara</b>	<b>Amostra</b>	<b>Tara + Su</b>	<b>Tara + Ss</b>

Su: Solo úmido e Ss: Solo Seco

Além disso, foram determinados os valores de Unidade Gravimétrica ( $U_g$ ), Densidade do Solo ( $D_s$ ) e Unidade Volumétrica ( $U_v$ ), através das fórmulas abaixo:

$$U_g = \frac{m_{su} - m_{ss}}{m_{ss}} \quad D_s = \frac{m_{ss} - tara}{V} \quad U_v = U_g \times D_s$$

Onde:

$m_{ss}$  – massa do solo seco

$m_{su}$  – massa do solo úmido

$V$  – Volume calculado pela fórmula =  $\{[\pi \cdot (\phi^2)] \cdot h\} / 4$

Onde:

$\phi$  = Volume do Anel

$H$  = Altura do Anel

A terceira etapa consistiu na aplicação da equação proposta pelo método escolhido:

$$K_{fs} = \frac{\Delta\theta}{(1 - \Delta\theta)t_a} \left[ \frac{D}{\Delta\theta} - \frac{D + (1/\alpha^*)}{1 - \Delta\theta} \ln \left( 1 + \frac{(1 - \Delta\theta)D}{\Delta\theta(D + (1/\alpha^*))} \right) \right]$$

Onde:

$AO$  = Diferença de umidade volumétrica entre o solo saturado e a umidade atual do solo;

$D = V/A$  é a relação entre o volume da água e a área do anel;



Ta = é o tempo de infiltração da água no solo;

a\* = uma constante que varia entre 4; 12 e 36 m<sup>-1</sup>.

Por fim, os valores foram classificados de acordo com os intervalos determinados por Reichardt (1978), elencados no Quadro 12.

**Quadro 12 - Classificação dos Valores de Ksat, de acordo com Reichardt (1978).**

<b>Classificação</b>	<b>Valores de Ksat</b>
Muito Rápida	(> 180)
Rápida	(120 ≤ 180 mm/h)
Moderadamente Rápida	(60 ≤ 120 mm/h)
Moderada	(20 ≤ 60 mm/h)

### **3.3 Estimativa da recarga em unidades hidroestratigráficas do Sistema Aquífero Guarani**

A estimativa de recarga foi realizada a partir da metodologia utilizada por Simon (2017) na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, uma vez que as feições erosivas estão localizadas, exceto na janela do Botucatu no município de Quaraí/RS, quase que exclusivamente nessa bacia e que esta possui importância hidrogeológica, abrigando o SAG aflorante, semiconfinado e confinado.

Dentro deste contexto, a referida autora estipula quatro etapas. Inicialmente foram levantados os poços tubulares, através da consulta do SIAGAS (Sistema de Informação de Águas Subterrâneas), operado e mantido pela CPRM, destacando aqueles pertencentes à rede RIMAS que, dentre outros dados, monitora a flutuação do nível d'água.

Após o levantamento prévio, foram individualizados aqueles poços que estão localizados nas áreas suscetíveis à arenização (definidas por Oliveira *et al.*, 2008), bem como pertencentes aos aquíferos livres<sup>15</sup> e que tivessem no mínimo um ano de monitoramento, sendo levantadas as fichas cadastrais e as informações junto a rede RIMAS, que registram os perfis construtivos dos poços, bem como dados geológicos e hidrogeológicos da área em que se encontram. A consulta às fichas foi realizada entre dezembro de 2022 e janeiro de 2023.

<sup>15</sup> O poço de monitoramento do Miracatu não está localizado em um aquífero livre, mas semi-confinado. Contudo, o mesmo foi utilizado em função da escolha do mesmo por Simon (2017), bem como por ser a área das pesquisas de Verdum (1997) e Binda (2016) que identificaram recarga dos aquíferos.

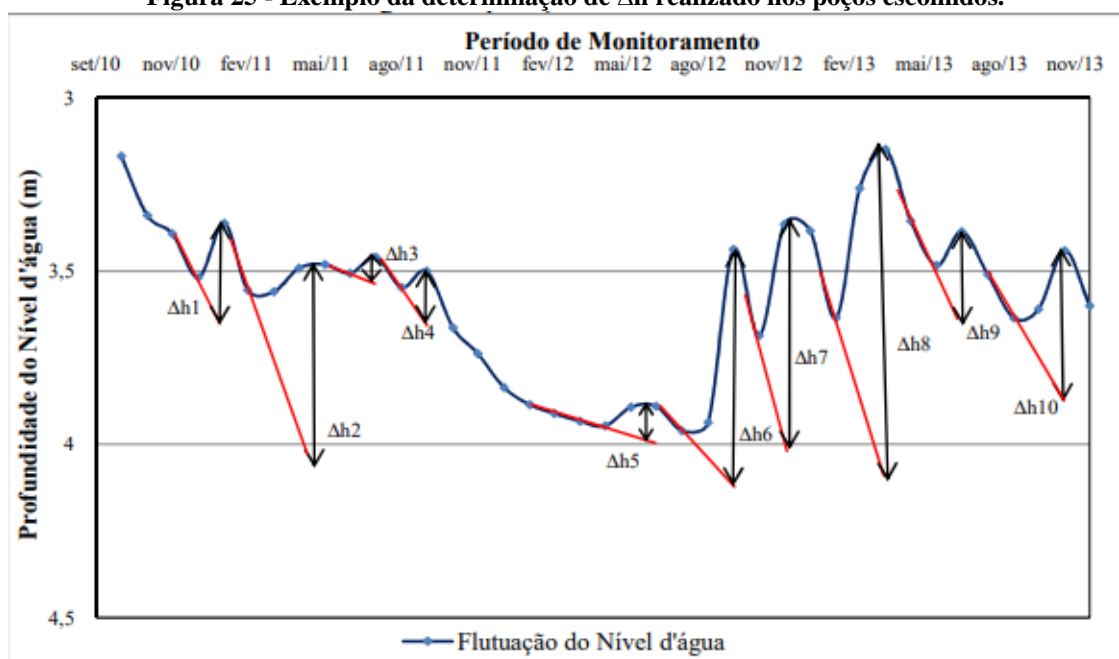
A segunda etapa consistiu na caracterização pluviométrica, através da utilização de estações pluviométricas próximas aos poços de monitoramento e que possuíam disponibilidade de dados nos anos abordados no presente estudo. As estações foram acessadas através do Portal *Hidroweb*, mantido pela ANA, sendo adquiridos os dados referentes ao somatório das precipitações mensais.

A terceira etapa consistiu na escolha do rendimento específico, que assim como Simon (2017) se baseou na utilização de dados secundários retirados de trabalhos anteriores na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, sendo escolhido o valor de 16%.

Por fim, foi avaliada a variação do nível d'água e a estimativa de recarga a partir dos dados de monitoramento dos poços RIMAS selecionados. Como a medição do nível d'água é feita por sensores e ocorre de hora em hora, para obtenção dos dados diários foi realizada a mediana destes valores, bem como a partir dos mesmos foi realizada a média mensal. Destaca-se que, assim como Simon (2017), para cálculo de média mensal foram considerados apenas os meses com no mínimo 15 dias com dados.

Para a determinação do  $\Delta h$ , aplicou-se a metodologia apresentada por Healy e Cook (2000), conforme descrito no subcapítulo 2.5.3 e exemplificado na Figura 25. Sendo assim, a linha de recessão foi obtida através de uma reta de ajuste, aplicada nos valores de nível d'água correspondentes a sua diminuição, exceto naqueles picos que não se apresentaram pronunciados ou não estavam antecedidos por diminuição do nível d'água.

**Figura 25 - Exemplo da determinação de  $\Delta h$  realizado nos poços escolhidos.**



Fonte: Simon (2017)

Com a determinação de todos os  $\Delta h$  por poços, estes foram somados individualmente e posteriormente divididos pelo período de monitoramento de cada poço. Sendo assim, de posse de todas as informações anteriores, foi realizado o cálculo de recarga, através da equação abaixo:

$$R = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} = 0,16 \cdot \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4 + \Delta h_5 + \Delta h_6 + \Delta h_7 + \Delta h_8 + \Delta h_9 + \Delta h_{10}}{N_{meses}}$$

Por fim, para comparar com os resultados das precipitações registradas, foram multiplicados os valores de cada recarga pelo período analisado, bem como foram somadas as precipitações no mesmo período. Dividiram-se então os valores de recarga (mm) pela precipitação total (mm), sendo o resultado desta operação considerado como a recarga correspondente.

### **3.4 Mapeamento das áreas favoráveis à recarga no SAG na área de ocorrência da arenização;**

Para o mapeamento das áreas favoráveis na área de estudo, foi adaptada a metodologia descrita por Vasconcelos (2014), pois a mesma evidencia a variabilidade espacial dos fatores que envolvem a favorabilidade e é dividida em três etapas principais. 1) A primeira etapa consistiu na delimitação das áreas mais altas em relação às nascentes, visando a demarcação da linha de transição entre as áreas de recarga e descarga do aquífero.

Sendo assim, as nascentes foram localizadas a partir da rede hidrográfica da base vetorial contínua do Rio Grande do Sul, em escala 1: 50.000<sup>16</sup>, sendo obtida a altimetria de cada ponto através da interpolação das curvas de nível e de pontos altimétricos do Modelo Digital de Elevação (MDE) do Rio Grande do Sul elaborado e disponibilizado por Weber *et al.*, (2004).

A altimetria de cada nascente serviu de base para a elaboração de um plano tridimensional com a interpolação geoestatística por krigagem ordinária gaussiana com 2 a 5 vizinhos por quadrante (45o), utilizando para isso a extensão *Geostatistical Analyst*, do programa ArcGis 10.3, sendo a operação realizada por bacia, uma vez que o

---

<sup>16</sup> Hasenack, H.; Weber, E.(org.) Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto) e ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).

procedimento utiliza a distância entre as nascentes e as nascentes localizadas em Quaraí encontram-se distantes das demais, ficando uma lacuna entre os pontos.

Sendo assim, após o procedimento de krigagem, os arquivos resultantes foram subtraídos pelo Modelo Digital de Elevação através da ferramenta *ArcToolbox>Spatial Analyst>Tools>MapAlgebra>Raster Calculator*, tendo como produto um modelo com as áreas altimetricamente mais elevadas em relação às nascentes.

A segunda etapa é a de caracterização dessas áreas frente aos processos de recarga dos aquíferos relacionados às informações levantadas no referencial teórico acerca das características do meio e que possibilitam a recarga, tais como litoestratigrafia, hidrogeologia, geomorfologia e pedologia.

Quanto à litoestratigrafia, foram utilizados os levantamentos cartográficos realizados pelo Serviço Geológico Brasileiro (SGB-CPRM), tais como os mapas geológico e hidrogeológico do Rio Grande do Sul, ambos em escala 1:750.000. Dentro deste contexto, foram atribuídos pesos, conforme Quadro 13, baseados nas informações levantadas no referencial teórico e na sua existência dentro das bases cartográficas acima citadas.

Quadro 13 – Condicionantes geológicos e hidrogeológicos do meio associados à recarga do aquífero.

<b>Peso</b>	<b>Geológico</b>	<b>Hidrogeológico</b>
03	Botucatu/Guará	Sistema Aquífero Botucatu/Guará I (bg1) e II (bg2)
02	Sanga do Cabral/Depósitos Aluviais Quaternários	Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Piramboia (sp)
01	Formação Serra Geral	Sistema Aquífero Basalto/Botucatu (bb) e Sistema Aquífero Serra Geral II (sg2)

Fonte: CPRM (2005 e 2006).

Quanto ao relevo, foi utilizado o levantamento realizado pelo Projeto Radam (1985), em escala 1:250.000, cujo mapeamento se constitui no mais detalhado produto cartográfico regional que abrange toda a área de ocorrência da arenização.

Além disso, foram adquiridos os arquivos *raster* de declividade da área de ocorrência da arenização, disponibilizados pelo projeto Topodata<sup>17</sup>, sendo empregadas as cartas 29\_57, 29\_555, 30\_57 e 30\_555 e elaborado o mosaico das imagens no Arcgis

<sup>17</sup> Acesso através do sítio eletrônico: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>

10.3 através da ferramenta *Arctoolbox>Data Management Tools>Raster>RasterDataset>Mosaic*. Sendo assim, no Quadro 14 estão atribuídos pesos baseados nas informações levantadas no referencial teórico.

**Quadro 14 – Condicionantes geomorfológicos do meio associados à recarga do aquífero**

<b>Peso</b>	<b>Geomorfologia</b>	<b>Declividade</b>
03	Coxilhas e Topos Planos (Pediplanos e Relevos Dissecados com topos tabulares e convexos)	0% a 20% Plano, Suave a Ondulado e Ondulado
02	-	8% a 20% Forte Ondulado
01	Terraço Fluvial/Planície Fluvial/Vales (Planícies e Terraços)	Acima de 45% Montanhoso/Escarpado

**Fonte: RADAM (1986) e Embrapa**

Quanto aos solos, destacam-se os Neossolos Quartzarênicos órticos como aqueles associados a arenização, contudo, não existem mapeamentos detalhados de solos que englobam a área de ocorrência da arenização como um todo, apenas trabalhos isolados como de Flores (2009) e Oliveira (2015) cujo localização dos RQOs está associada aos Latossolos. Sendo assim, conforme visto no referencial teórico foram atribuídos os seguintes pesos, conforme Quadro 15, sendo utilizada a base cartográfica de solos do Projeto RadamBrasil em escala 1: 250.000.

**Quadro 15 – Condicionantes pedológicos do meio associados à recarga do aquífero.**

<b>Peso</b>	<b>Pedologia</b>
03	Neossolos Quartzarênico órticos/Latossolos/Argissolos Vermelhos
02	Cambissolos/Nitossolos
01	Argissolos bruno-acinzentados/Gleissolos/Planossolos/Chernossolo/Plintossolo/Vertissolos/Neossolo Litólico, Quartzarênico hidromórfico e Regolíticos.

**Fonte: Gomes et al., (2006), Sartori et al., (2005), Streck et al., (2008) e Oliveira (2015)**

Os arquivos vetoriais foram cruzados, utilizando para isso o *software* ArcGis 10.3 e a ferramenta *Analysis Tools> Overlay>Intersect*, determinando que nos locais onde as variáveis acima ocorram simultaneamente seriam as de maior potencial de recarga, reduzindo-se o potencial com a menor sobreposição das informações.

A aplicação destas etapas fez com que as áreas com fossem definidas como **muito alta favorabilidade**, **alta favorabilidade** e **baixa favorabilidade**, que são as classes definidas por Vasconcelos (2014), conforme somatório e características elencadas no Quadro 16.

**Quadro 16 – Classes de Favorabilidade à recarga a partir do cruzamento das informações do meio**

<b>Favorabilidade</b>	<b>Soma Total dos Pesos</b>
Muito Alta	15
Alta	Entre 12 e 14
Baixa	Abaixo de 11

**Fonte: Elaborado pelo autor**

### **3.5 Aplicação da metodologia TEEB**

Ao considerar a necessidade de valorar o serviço ambiental hídrico frente ao quanto custaria replicá-lo com tecnologia, buscou-se na literatura o custo por litro dispendido no tratamento e purificação de água. Sendo assim, ao identificar o serviço ambiental de favorecimento da infiltração de água no solo e da recarga dos aquíferos, utilizou-se a fórmula abaixo para valoração do serviço ambiental prestado.

$$VSA = [(VR/m^2 * \text{Área de arenização (m}^2) * \text{Custo de Tratamento/L}]$$

Onde:

VSA – Valor do Serviço Ambiental Prestado

VR – Valor de Recarga (% da precipitação que recarrega)

O volume de recarga/m<sup>2</sup> foi calculado a partir do entendimento de que 1 mm de precipitação equivale a 1 litro infiltrado por metro quadrado, sendo assim, 1.000 mm de precipitação equivalem 1.000 litros/m<sup>2</sup>. Além disso, considerou-se os valores de precipitação anual identificados no referencial teórico que variam de 1.400mm a 1.900 mm.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Espacialização da Arenização

Os focos de arenização podem ser visualizados em dez municípios do estado do Rio Grande do Sul, contudo, possuem um padrão de localização e não se encontram espalhados por todo o território destes municípios. Nesse sentido, destaca-se o mapeamento de áreas suscetíveis a arenização, somando 8.152,92 km<sup>2</sup>, elaborado por Oliveira *et al.*, (2008), delimitadas através do cruzamento das seguintes informações: a) áreas de reduzida biomassa, com pouca densidade de vegetação herbácea e possibilidade de solo exposto, dependendo das condições climáticas e meteorológicas b) associação de áreas de reduzida biomassa e presença de areais e c) característica do substrato (arenitos Botucatu e Guará).

Este mapeamento contribuiu na análise locacional do processo erosivo, corroborando a hipótese de que a arenização não se expande. Sendo assim, para a valoração dos serviços ambientais hídricos prestados, os mapas temáticos elaborados utilizam esta delimitação. Foram mapeados 4.884,28 ha de areais, 1.330,95 ha ravinas e 333,45 ha voçorocas (Figura 26), destacando-se que a área de areais, diminuiu 1,29% em relação à área mapeada em 2011, corroborando a hipótese de não expansão, mas sim de pulso das feições erosivas.

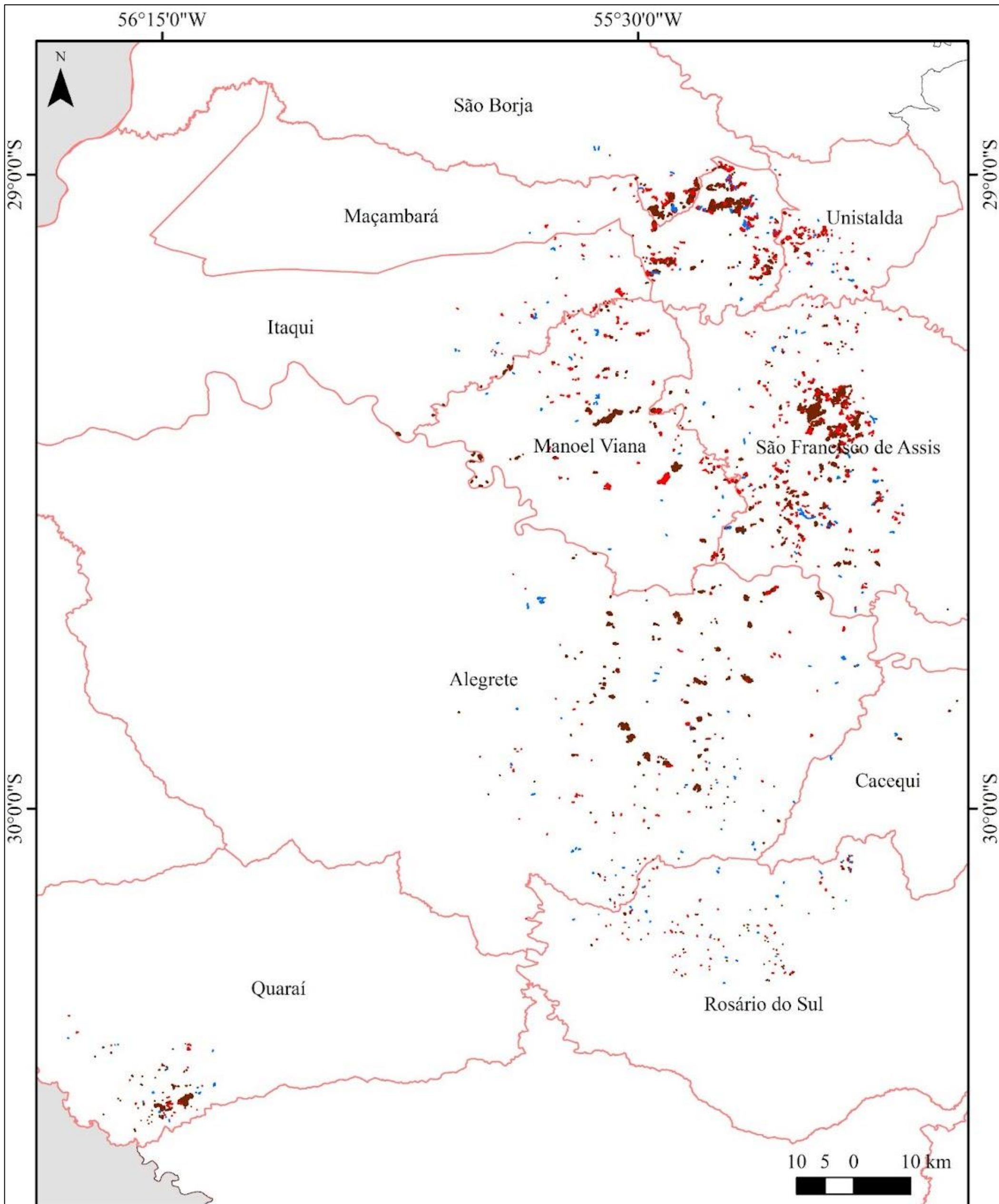
As voçorocas constituem-se em feições erosivas que surgem a partir do entalhamento das ravinas ou da evolução de canais de subsuperfície até encontrarem o lençol freático. As ravinas são sulcos ou incisões produzidas pelo trabalho do escoamento hídrico concentrado, estando localizadas regionalmente em vertentes dos cerros e coxilhas e os areais (GUERRA, 1994; CANEPPELE, 2017).

Segundo Suertegaray, 2004, os areais:

São depósitos areníticos recentes, pouco consolidados, arenosos e não consolidados, com cobertura vegetal escassa ou inexistente e em constante retrabalhamento por agentes climáticos. A gênese dessas manchas está relacionada a fragilidade dessa paisagem em sua totalidade, devido a susceptibilidade das unidades litológicas ao processo de arenização. (Suertegaray, 2004, p.238)

Apenas os areais e as ravinas foram considerados como pontos de recarga, em função do pacote sedimentar que está associado a essas feições, uma vez que as voçorocas possuem o afloramento do lençol freático, se comportando como locais de descarga.

Figura 26 – Localização da arenização



**LOCALIZAÇÃO DA ARENIZAÇÃO**

**Legenda**

- |   |  |  |  |
|---|--|--|--|
|  Areal - 4.882,28 ha |  Ravina/Ravinamento - 1.330,95 ha |  Voçoroca - 333,45 ha |  Município com foco de arenização |
|   |  Município/RS                     |  |  País Fronteiriço                 |

Fontes:  
Arenização:  
Elaborado pelo autor  
Município: IBGE

Sistema de Coordenadas:  
UTM Fuso 22S  
Datum: SIRGAS, 2000  
Data: Abril de 2023

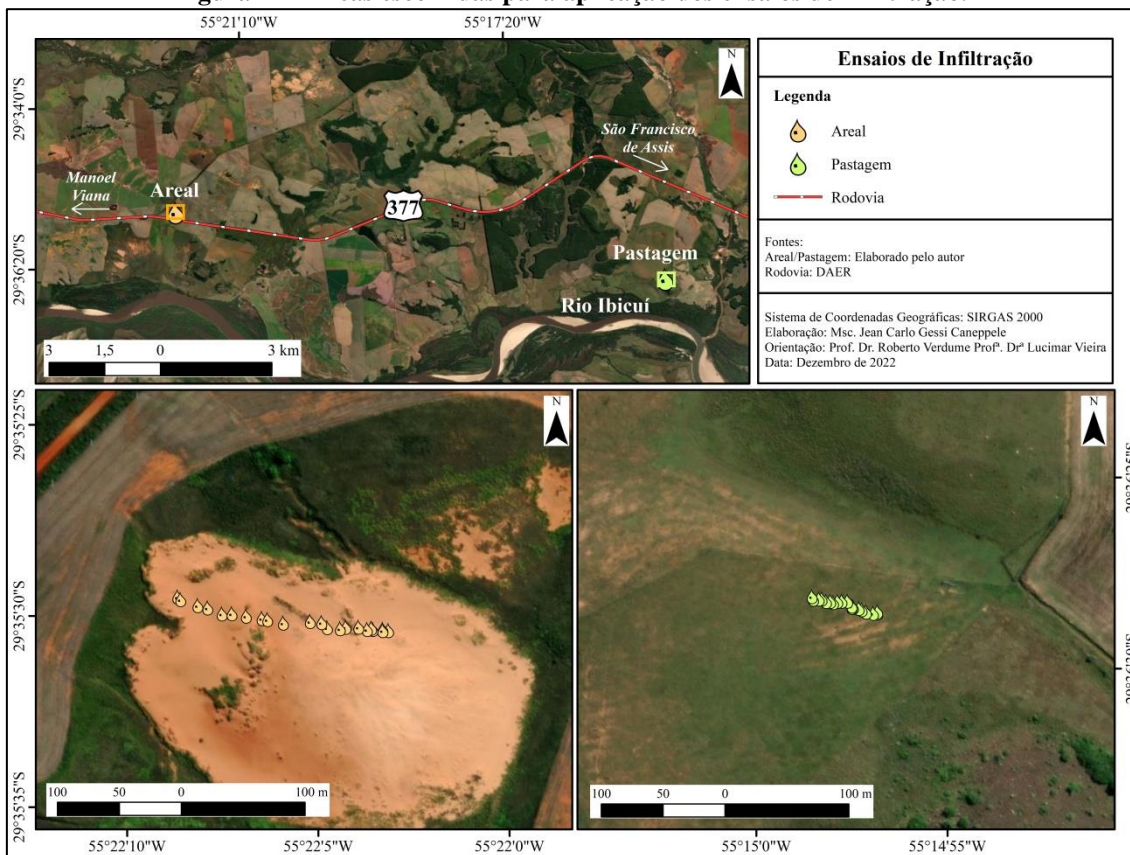


## 4.2 Condutividade Hidráulica nos Neossolos Quartzarênicos órticos

O trabalho de campo consistiu na realização de experimentos em duas áreas com Neossolos Quartzarênicos órticos, escolhidas em função da presença das formações superficiais quaternárias e de solos característicos da arenização, bem como estarem localizadas próximas uma da outra, facilitando o deslocamento e a coleta dos dados.

Os dados foram coletados em linha reta, sobre o mesmo compartimento de relevo e cota topográfica, uma vez que as taxas de infiltração podem modificar de acordo com o local em uma vertente, ressaltando que o método pode ser utilizado para tal fim, o que não era um dos objetivos do trabalho. As áreas escolhidas para aplicação dos ensaios podem ser visualizadas no mapa da Figura 27.

Figura 27 - Áreas escolhidas para aplicação dos ensaios de infiltração.



Fonte: Caneppele, 2022.

A primeira área consiste em um depósito arenoso ancorado em um cerro (relevo tabular), cuja cobertura vegetal era de campo nativo, sendo transformado em área de pastagem plantada, com plantio de aveia recém-realizado (Figura 28).

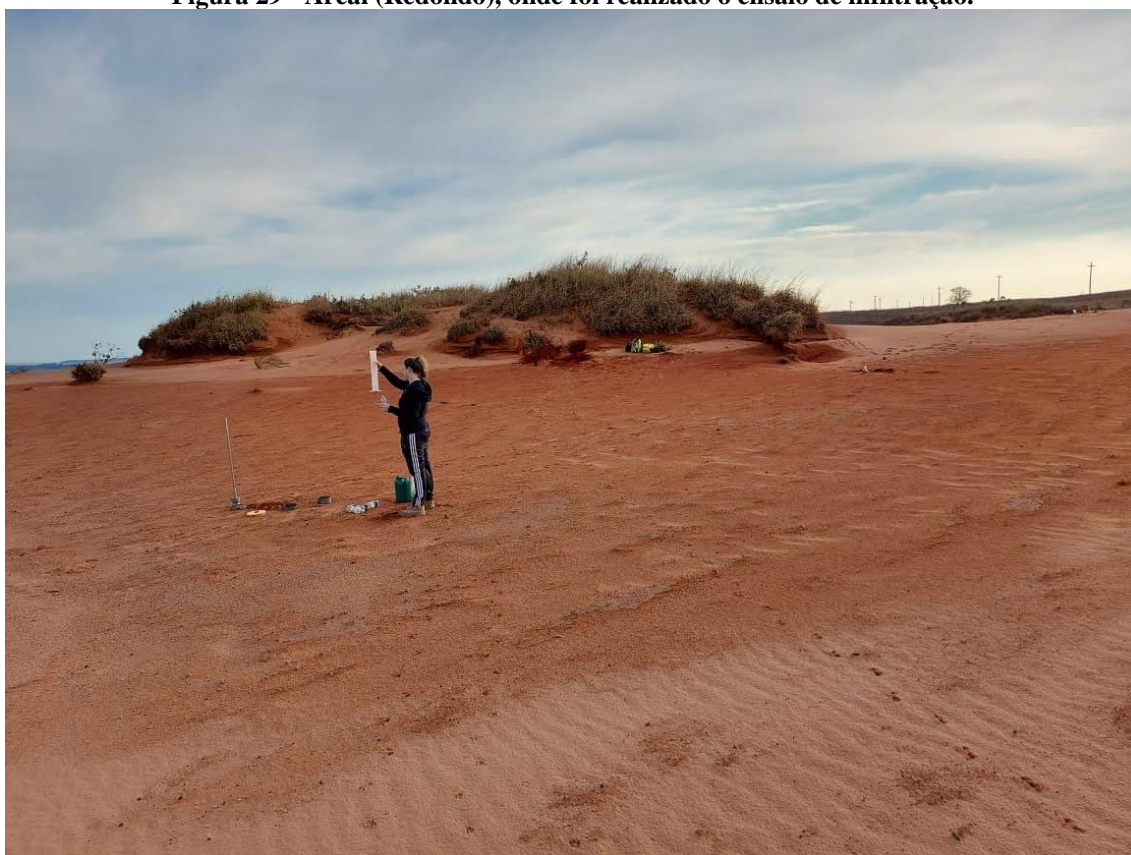
**Figura 28 - Fotografia panorâmica do local em que foram realizados os ensaios, com destaque ao cerro Batovi na direita da fotografia.**



**Fonte: Caneppele, 2021.**

A segunda área é um areal consolidado (Figura 29), localizado em um compartimento de relevo de coxilha (colina) às margens da BR-377, cuja localização pode ser identificada em fotografias aéreas datadas da década de 1940, prestando serviços ambientais de forma contínua, sendo representativo da arenização como processo natural.

**Figura 29 - Areal (Redondo), onde foi realizado o ensaio de infiltração.**



**Fonte: Caneppele, 2021.**

Em ambas as áreas foram realizados 20 ensaios, pois as temporalidades começaram a não variar de forma significativa. Sendo assim, foram efetuados os ensaios de infiltração em duas etapas, conforme ilustrado nos procedimentos metodológicos, utilizando 150 ml de água em cada registro, sendo registradas 40 cronometragens por área, totalizando 80 registros no total.

**Figura 30 - Anel inserido no solo, com o primeiro tempo estimado, sendo posteriormente inserido mais 8 cm no solo para a segunda tomada de tempo**



**Caneppele, 2021.**

Os dois locais foram escolhidos em função da sua proximidade, facilitando o deslocamento com o equipamento, bem como no areal redondo também foram realizados experimentos de infiltração por Scopel (2015), utilizando um permeâmetro e mini-simulador de chuvas com bico aspersor que simula a velocidade e o tamanho da gota da chuva.

Cabe ressaltar que o cálculo de condutividade hidráulica foi realizado no presente trabalho com objetivo de identificar o serviço ambiental de filtragem, sendo,

portanto extrapolado para toda a área com areais, ravinas e voçorocas, sobretudo pelos resultados encontrados, bem como por trabalhos anteriores que já identificaram ou descreveram os solos como de alta condutividade hidráulica como Verdum (2012), Scopel *et al.*, (2012) e Scopel (2015).

No Quadro 17 é possível verificar os tempos registrados em cada ensaio, destacando a maior homogeneidade nos tempos no areal, uma vez que este se encontra consolidado, sem intervenções humanas significativas. Em relação à segunda área, onde foi realizado o plantio de pastagem, verifica-se uma inconsistência nos tempos, sobretudo pela intervenção humana pelo uso de maquinário pesado, sucessivos plantios e pisoteio do gado.

**Quadro 17 - Informações coletadas durante os ensaios de infiltração realizados em campo, 27/08/2021.**

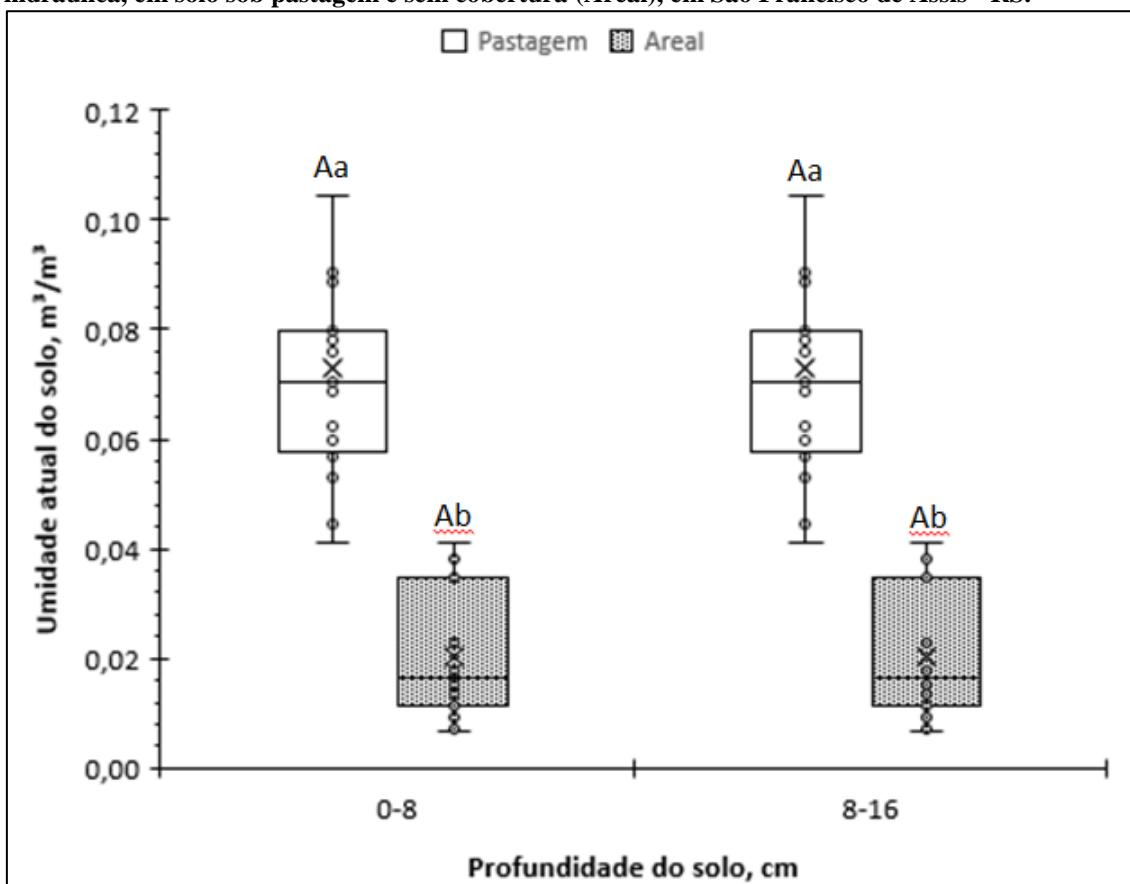
<b>Areal</b>	<b>0cm – 8 cm</b>	<b>8cm a 16cm</b>	<b>Pastagem</b>	<b>0cm – 8 cm</b>	<b>8cm a 16cm</b>
<b>01</b>	6,5s	8,1s	<b>01</b>	13,6s	1,05 min
<b>02</b>	7,2s	6,4s	<b>02</b>	10,2s	14,4s
<b>03</b>	5,7s	6,4s	<b>03</b>	13,3s	33,7s
<b>04</b>	8s	17,9s	<b>04</b>	23,7s	53,8s
<b>05</b>	10,5s	11,1s	<b>05</b>	16,6s	23,1s
<b>06</b>	12,2s	8,3s	<b>06</b>	8,2s	16,4s
<b>07</b>	5,1s	16,1s	<b>07</b>	13,9	1 min 12.2s
<b>08</b>	10,4s	8,1s	<b>08</b>	8,4s	35,1s
<b>09</b>	6,9s	6,1s	<b>09</b>	9,05s	22,5s
<b>10</b>	7,3s	5,8s	<b>10</b>	6,2s	59,2s
<b>11</b>	6,1s	4,9s	<b>11</b>	5,2s	8,6s
<b>12</b>	5,3s	4,6s	<b>12</b>	9,9s	18,2s
<b>13</b>	4,8s	4,3s	<b>13</b>	13,4s	17,0s
<b>14</b>	20,3s	4,5s	<b>14</b>	7,1s	35,6s
<b>15</b>	5,9s	8,9s	<b>15</b>	12s	23,3s
<b>16</b>	6,7s	6,2s	<b>16</b>	11,4s	1,59 min
<b>17</b>	7,4s	4,7s	<b>17</b>	9,1s	33,4s
<b>18</b>	4,8s	4,2s	<b>18</b>	7,6s	19,2s
<b>19</b>	6,1s	5,7s	<b>19</b>	14s	53,0s
<b>20</b>	11,6s	6,7s	<b>20</b>	9,7s	18,7s

Posteriormente, com as amostras coletadas em campo, foram realizados os procedimentos para a determinação da massa do solo úmido e massa do solo seco, sendo identificados os valores elencados no Apêndice A e B. De posse destes dados foram calculados os índices de Unidade Gravimétrica (Ug), Densidade do Solo (Ds) e Unidade Volumétrica (Uv), com os valores elencados no Apêndice C. Destaca-se que nas coletas realizadas no areal foi utilizado um anel com volume de 7,7cm e altura de

7,5 cm e nas coletas realizadas na pastagem foi utilizado um anel com volume de 7,2 cm e altura de 7,45 cm.

Quanto à umidade do solo, antes da medição de condutividade hidráulica, destaca-se que foram encontrados valores entre 0,042g/g<sup>1</sup> e 0,130g/g<sup>1</sup> nas amostras coletadas na pastagem e valores entre 0,007 e 0,04 nas amostras coletadas no areal. Os valores são baixos demonstrando que os solos não retém umidade, sobretudo no areal, facilitando assim a infiltração. Os valores podem ser visualizados na Figura 31.

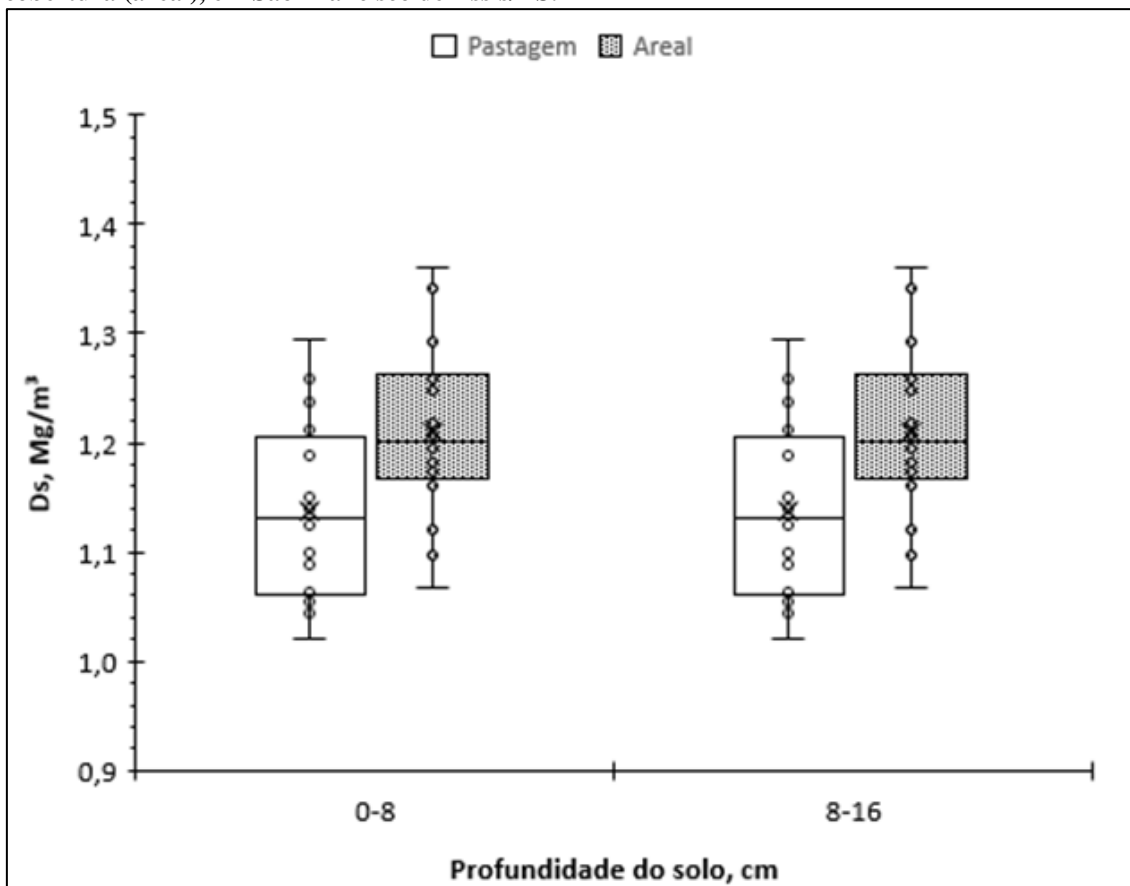
**Figura 31 - Distribuição dos valores de umidade atual do solo, antes da medição da condutividade hidráulica, em solo sob pastagem e sem cobertura (Areal), em São Francisco de Assis - RS.**



Quanto a densidade do solo, destaca-se que foram encontrados valores entre 1,04 e 1,26 Mg/m<sup>3</sup> nas amostras coletadas na pastagem e valores entre 1,1 e 1,34 Mg/m<sup>3</sup> nas amostras coletadas no areal. Dentro deste contexto, destacam-se os valores maiores no areal em função de uma composição granulométrica com mais aporte de partículas finas (silte e argila) e proximidade das fontes de material com estas características, enquanto que na pastagem são menores em função da maior concentração de finos e

presença de matéria orgânica. Os valores de Densidade do Solo podem ser visualizados na Figura 32.

**Figura 32 - Distribuição dos valores de densidade do solo (Ds) em solo sob pastagem e sem cobertura (areal), em São Francisco de Assis/RS.**



Sendo assim, com os dados do tempo de infiltração (Quadro 17), do volume de água inserido (150ml), os índices de Densidade do Solo (DS), Unidade Gravimétrica (Ug) e Unidade Volumétrica (Uv) (os três últimos no Apêndice C), foi calculada a Condutividade Hidráulica (Ksat) de ambos os locais.

A condutividade hidráulica nos neossolos (areal) é muito rápida, tanto na profundidade entre 0-8, como entre 8-16 cm, com valor médio das amostras coletadas acima de 180 mm/h. Destaca-se que os valores encontrados na maior profundidade foram mais altos e apresentaram menor variação, não sendo um comportamento típico em solos arenosos.

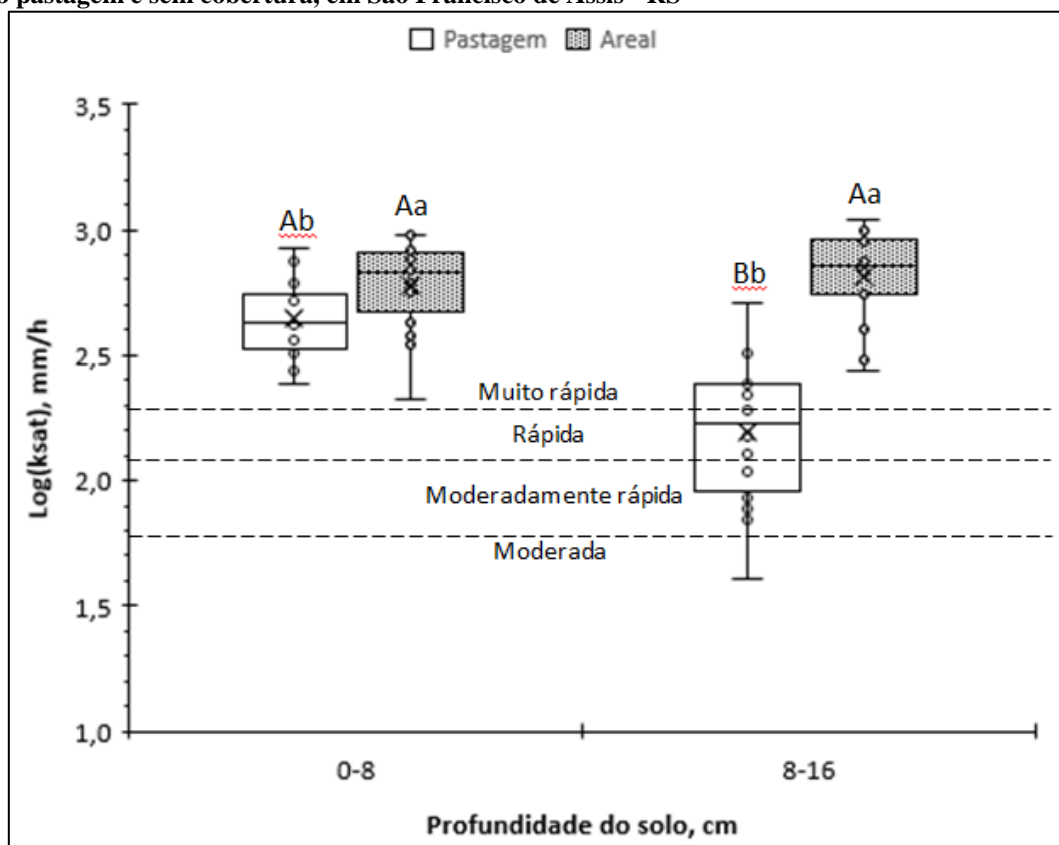
Contudo, os solos típicos da arenização contém uma pequena camada de silte e argila na superfície que retém a água no primeiro contato com a precipitação, sobretudo nas áreas mais baixas das feições erosivas onde estão depositadas as partículas finas

carreadas pelo escoamento superficial. Dentro deste contexto, os testes realizados na superfície de 0-8cm possuem influencia desta camada, enquanto que na profundidade de 8cm a 16cm a mesma foi removida, aumentando, portanto a condutividade hidráulica.

Nos solos cobertos por pastagem, na profundidade entre 0-8cm a condutividade hidráulica é classificada como muito rápida, enquanto que na profundidade de 8cm-16cm, varia entre moderadamente rápida e rápida, mas também como muito rápida. A diferença dos valores entre o primeiro ensaio e o segundo se deu em função da compactação do solo, uma vez que ele encontrava-se com plantio de pastagem recente com traços de mecanização.

Em síntese, tanto os neossolos (areais) como os solos cobertos por pastagem possuem alto potencial de absorção-infiltração da água que alimenta os reservatórios subterrâneos, com destaque aos maiores valores associados aos areais; sendo que aqueles cobertos por pastagens, possuem maior capacidade de retenção superficial da umidade, em função da cobertura vegetal e da matéria orgânica associada à decomposição desta cobertura. Os valores de condutividade hidráulica podem ser visualizados na Figura 33.

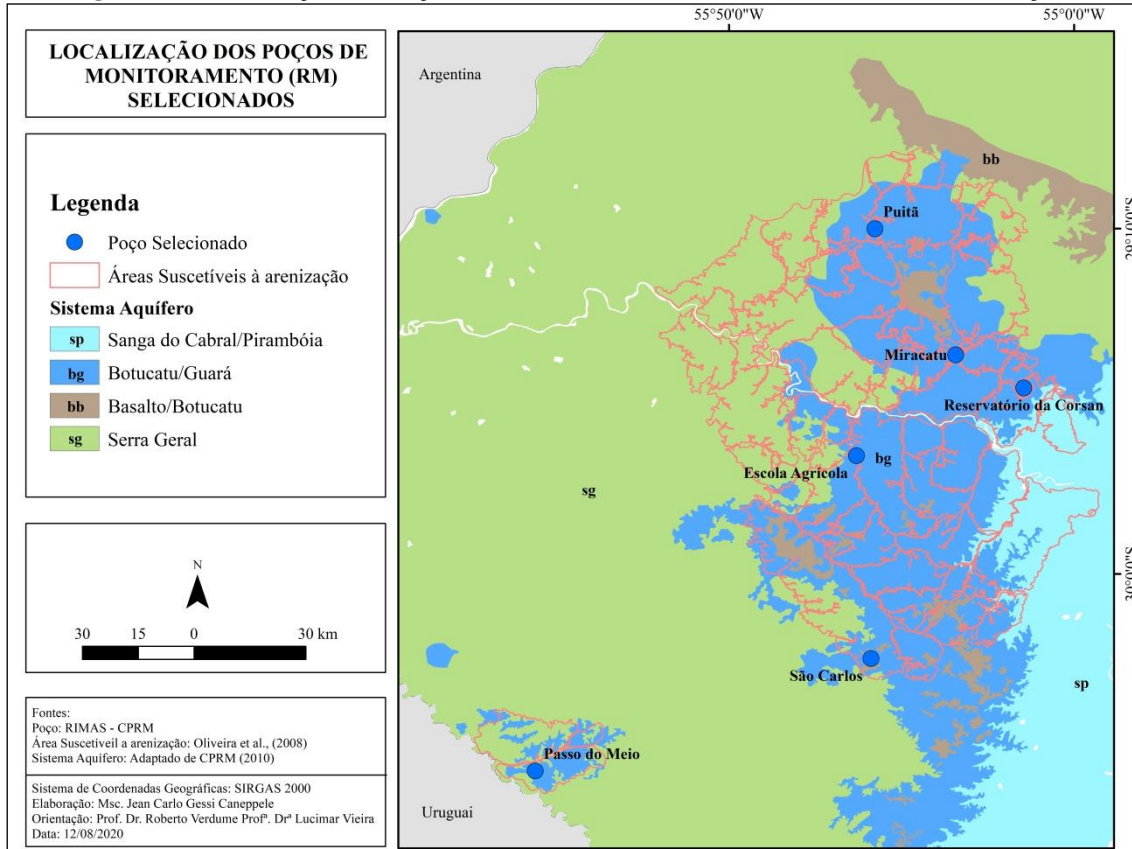
**Figura 33 - Distribuição dos valores da condutividade hidráulica do solo saturado (ksat) em solo sob pastagem e sem cobertura, em São Francisco de Assis - RS**



### 4.3 Estimativa de recarga nas áreas suscetíveis à arenização

Foram identificados e espacializados seis poços de monitoramento (PM) nas áreas suscetíveis à arenização, conforme Figura 34.

**Figura 34 - Localização dos Poços de Monitoramento nas Áreas suscetíveis à arenização.**



**Fonte: Elaborado por Caneppele, J.**

Os PMs, acompanhados de suas informações, foram elencados no Quadro 18, destacando-se que todos os poços se encontram localizados sobre o sistema aquífero Botucatu/Guará.



**Quadro 18 - Características dos poços de monitoramento (PMs) do estudo.**

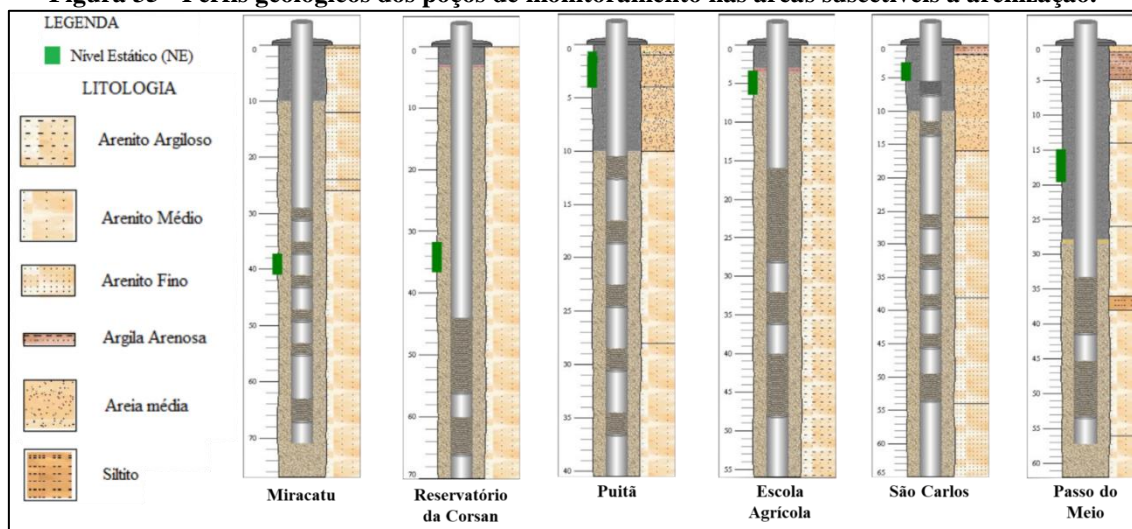
Localidade	Sistema Aquífero	Latitude	Longitude	Município	Data de Instalação	Nº SIAGAS	Nível Estático (m)	Profundidade (m)	Cota Topográfica (m)
Miracatu	Guará	292816	551710	São Francisco de Assis	24/04/2010	4300020124	39,50	77m	161,19
Reservatório da Corsan	Guará	293304	550718	São Francisco de Assis	12/09/2011	4300020535	37,42	70m	171.1
Puitã	Guará	291001	552852	Itaqui	01/05/2010	4300020119	4,00	40,50m	107,06
Escola Agrícola	Guará	294252	553132	Alegrete	12/09/2011	4300020534	6,72	56	117.10
São Carlos	Guará	301215	552926	Rosário do Sul	28/11/2011	4300020121	4,80	65	162,34
Passo do Meio	Botucatu	302830	561804	Quaraí	19/09/2013	4300021603	19,67	62	-

**Fonte: RIMAS.**

Quanto ao Nível Estático (NE) de cada poço, destacam-se os poços Miracatu e Reservatório da Corsan como aqueles com maior profundidade do NE, enquanto que o Puitã é o poço com a menor profundidade, sendo este um fator importante para análise no que tange a identificação da recarga, pois o tempo para que a precipitação chegue a 40m de profundidade é diferente do que 4m e também, conseqüentemente, o tempo de resposta.

Na Figura 35 podem ser visualizados os perfis geológicos de cada poço de monitoramento, com a maioria da litologia presente sendo de arenitos médios e argilosos, com destaque ao PM reservatório da Corsan, em São Francisco de Assis, que possui em todo o seu perfil arenito médio. Além disso, o poço São Carlos possui uma seção filtrante, através da camada arenosa de areia média

**Figura 35 - Perfis geológicos dos poços de monitoramento nas áreas suscetíveis a arenização.**



Fonte: SIAGAS

No que tange à precipitação, foram identificadas e especializadas estações pluviométricas próximas aos PMs, através do banco de dados da rede hidrometeorológica nacional, disponibilizada pela CPRM, com suas informações básicas elencadas no Quadro 19. Assim como, as estações podem ser visualizadas em conjunto com as isoietas de precipitação entre 1997 e 2006 na Figura 36.

**Quadro 19 - Informações das estações pluviométricas próximas aos PMs.**

Estação Utilizada	Código	Latitude	Longitude	Poço Relacionado	Distância do poço mais próximo (km)
Cachoeira de St Cecília	2955002	29,196	55,475	Puitã	3,6
Ponte do Miracatu	2955006	29,459	55,291	Miracatu	1,4
Jacaquá	2955016	29,686	55,195	Corsan*	16,6
São João	2955017	29,831	55,343	Escola Agrícola	21,9
São Carlos	3055007	30,204	55,491	São Carlos	0,1
Caty***	3056028	30,475	56,301	Passo do Meio	13

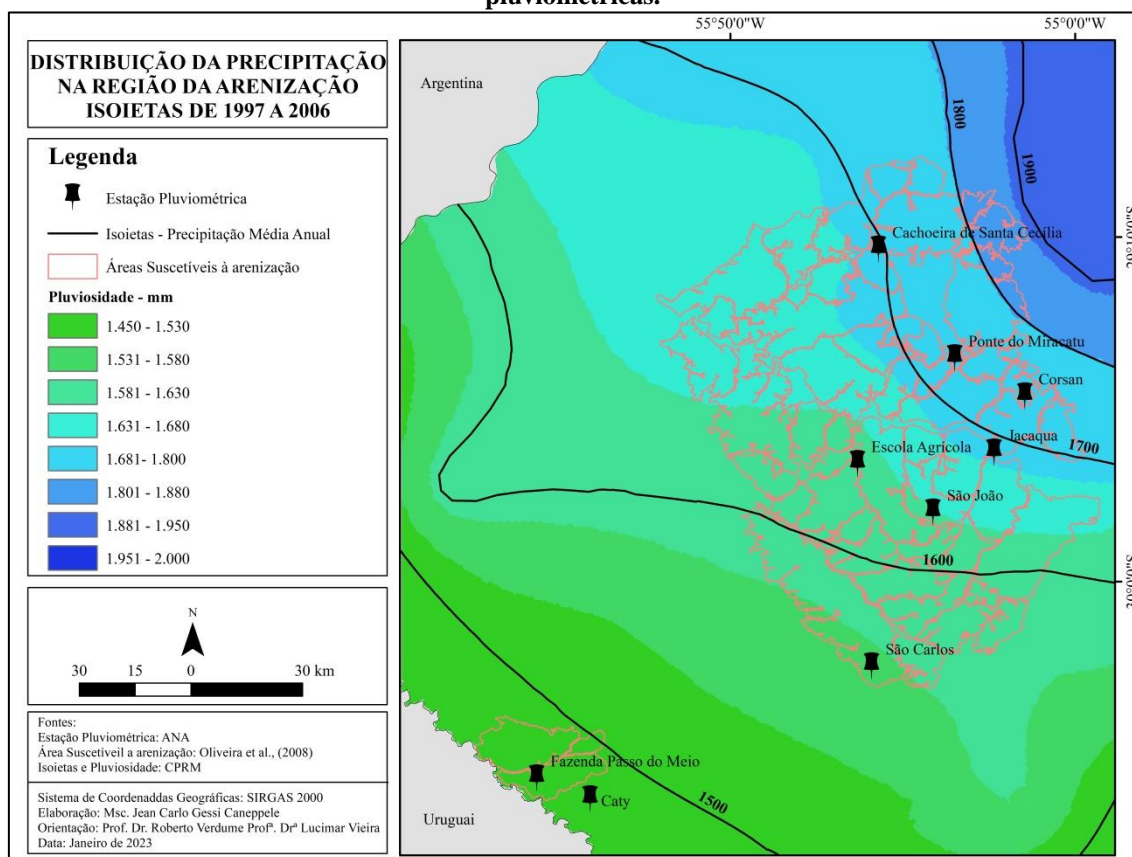
Fonte: RIMAS

\* A estação mais próxima era a Corsan (2955018), contudo, não possuía dados disponíveis, sendo, portanto, utilizada a estação Jacaquá.

\*\*A estação mais próxima era a Escola Agrícola (2955019), contudo, não possuía dados disponíveis, sendo, portanto, utilizada a estação São João.

\*\*\* A estação mais próxima era a Faz. Passo do Meio (3056028), contudo, não possuía dados disponíveis, sendo, portanto, utilizada a estação Caty.

**Figura 36 - Distribuição da precipitação na área de ocorrência da arenização e das estações pluviométricas.**



Fonte: Caneppele, 2023

Sendo assim, foram avaliados os dados de flutuação do nível de água para os seis poços selecionados, com os resultados apresentados inicialmente separados, para posteriormente realizar comparações. No Quadro 20 estão elencados os intervalos de tempo analisados para cada poço

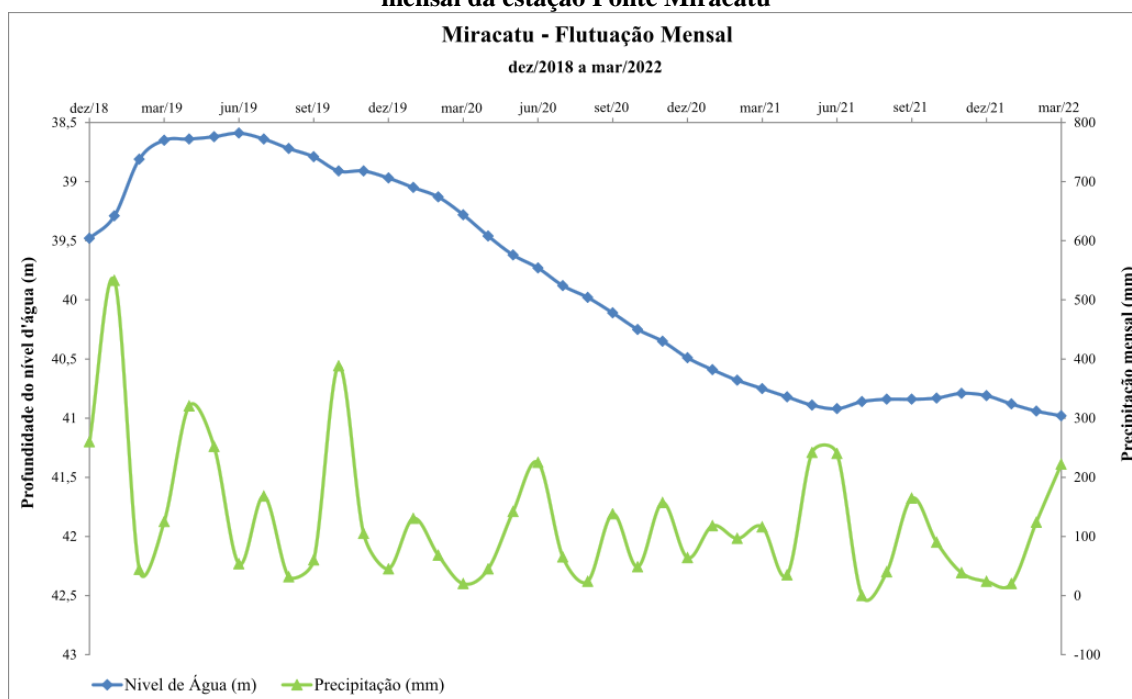
**Quadro 20 - Poços de Monitoramento e intervalo de tempo analisados.**

Poço	Intervalo de Tempo Analisado	Nº de meses
Miracatu	Dezembro de 2018 a março de 2022	40
Reservatório da Corsan	Abril de 2016 a julho de 2018	28
Reservatório da Corsan	Dezembro de 2020 a março de 2022	16
Puitã	Outubro de 2010 a setembro de 2015	60
Puitã	Abril de 2019 a março de 2022	36
São Carlos	Abril de 2011 a agosto de 2015	53
Estação Agrícola	Junho de 2012 a dezembro de 2017	66
Passo do Meio	Dezembro de 2015 a agosto de 2018	33

Simon (2017) identificou que os PMs Miracatu, com análise de outubro de 2010 a março de 2013 e Reservatório da Corsan, com análise de agosto de 2011 a julho de 2013, localizados em São Francisco de Assis/RS não apresentaram resposta à precipitação, ocorrendo elevação do nível d'água apenas após eventos com precipitação entre 300 mm e 400 mm. Isso ocorre, sobretudo porque os dois poços possuem o nível estático mais profundo, não ocorrendo resposta imediata a precipitação. Além disso, o PM Miracatu é um poço semi-confinado.

Atualizando os dados entre dezembro de 2018 e março de 2022 (Gráfico 1), utilizando a mesma metodologia de Simon (2017), é possível visualizar o mesmo padrão de comportamento do PM Miracatu, não ocorrendo resposta imediata às precipitações que variaram durante o período analisado, enquanto o nível d'água permaneceu relativamente estável.

**Gráfico 1 - Flutuação Mensal no PM Miracatu (dezembro/2018 a março/2022) x precipitação mensal da estação Ponte Miracatu**

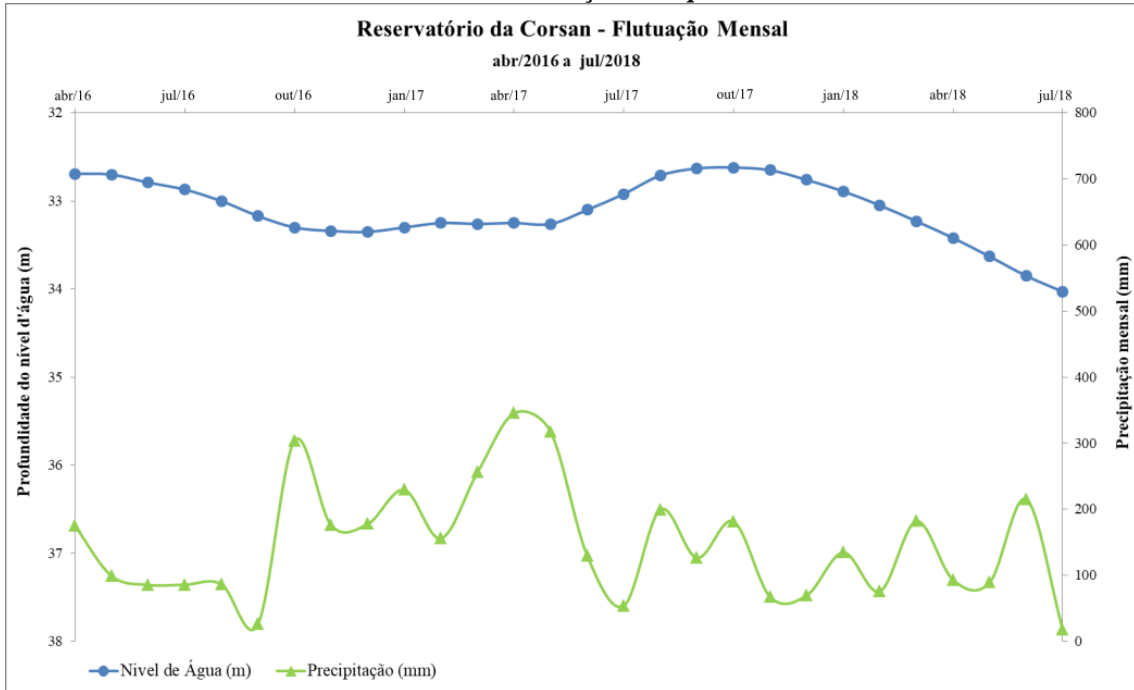


**Fonte: RIMAS e Hidroweb.**

Para o PM Reservatório da Corsan foram atualizados os dados (Gráfico 2 e 3) que corroboram a análise realizada por Simon (2017) de que não houve resposta imediata à precipitação. Contudo, destaca-se que pode ser visualizada no Gráfico 2 um aumento do nível do PM, de junho de 2017 até novembro do mesmo ano, refletindo as precipitações ocorridas de outubro de 2016 até abril de 2017. Além disso, no Gráfico 3,

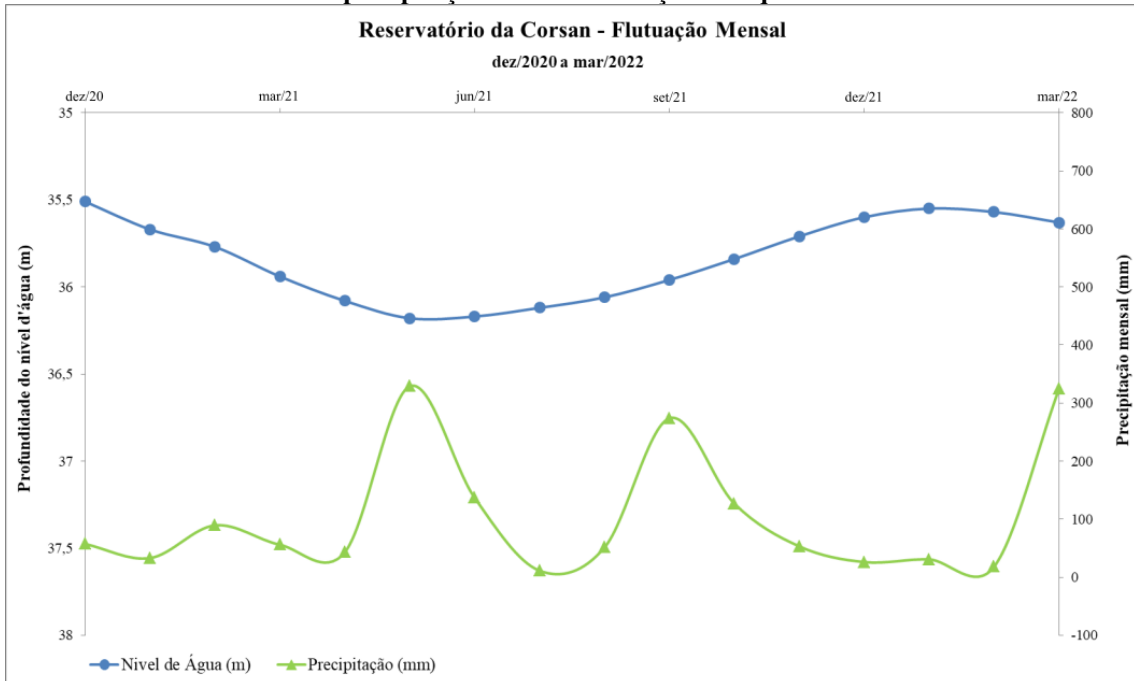
percebe-se a recarga a partir de outubro de 2021, relacionada às precipitações regionais e não localizadas acumuladas de junho a setembro de 2021.

**Gráfico 2 - Flutuação do PM Reservatório da Corsan (abril de 2016 a julho de 2018) x precipitação mensal da estação Jacaquá.**



RIMAS e Hidroweb.

**Gráfico 3 - Flutuação do PM Reservatório da Corsan (dezembro de 2020 a março de 2022) x precipitação mensal da estação Jacaquá.**

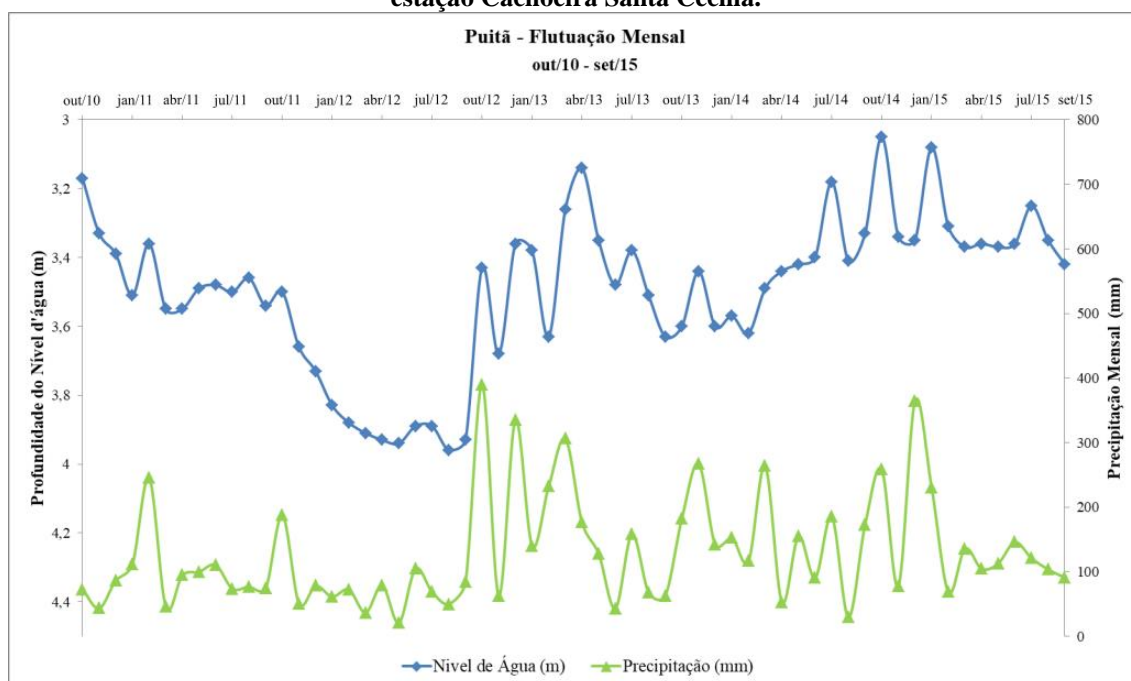


Fonte: RIMAS e Hidroweb.

O primeiro poço, cuja análise foi possível, através do método VNA, é o PM Puitã, localizado no município de Itaqui, destacando-se que a bacia do Arroio Puitã possui expressivas áreas de ocorrência de areais, comparando com outras bacias com ocorrência de focos erosivos, sendo uma área de grande vulnerabilidade à arenização SUERTEGARAY *et al.*, (2001).

Assim como em Simon (2017), foi visualizado que a flutuação do nível responde aos eventos de precipitação (Gráfico 4), sendo utilizados os dados da autora, cujo monitoramento do poço foi realizado entre out/2010 e dez/2013, ou seja, 39 meses, adicionando-se outros 21 meses, totalizando 60 meses. Sendo assim, a recarga encontrada foi de 1.169,6 mm, correspondente a 15,08% do período analisado. Estes valores se aproximam dos resultados de Simon (2017) que identificou uma recarga 730,7 mm, correspondendo a 15,48% da precipitação.

**Gráfico 4 - Flutuação do PM Puitã (outubro de 2010 a setembro de 2015) x precipitação mensal da estação Cachoeira Santa Cecília.**



Fonte: RIMAS e Hidroweb

Os resultados do cálculo podem ser visualizados no Quadro 21, destacando-se que, nos cinco anos de monitoramento, a estação do ano<sup>18</sup> com mais meses de recarga foi a primavera (outubro – mês com mais eventos - e novembro), entretanto, destaca-se que os eventos de recarga ocorreram em todas as estações do ano.

<sup>18</sup> Para esta análise, foram considerados os meses completos nas 04 estações (Verão - V, Outono - O, Inverno - I e Primavera - P) e os meses com duas estações (Transição - T).

Quadro 21 - Resultados do cálculo de recarga para o PM Puitã.

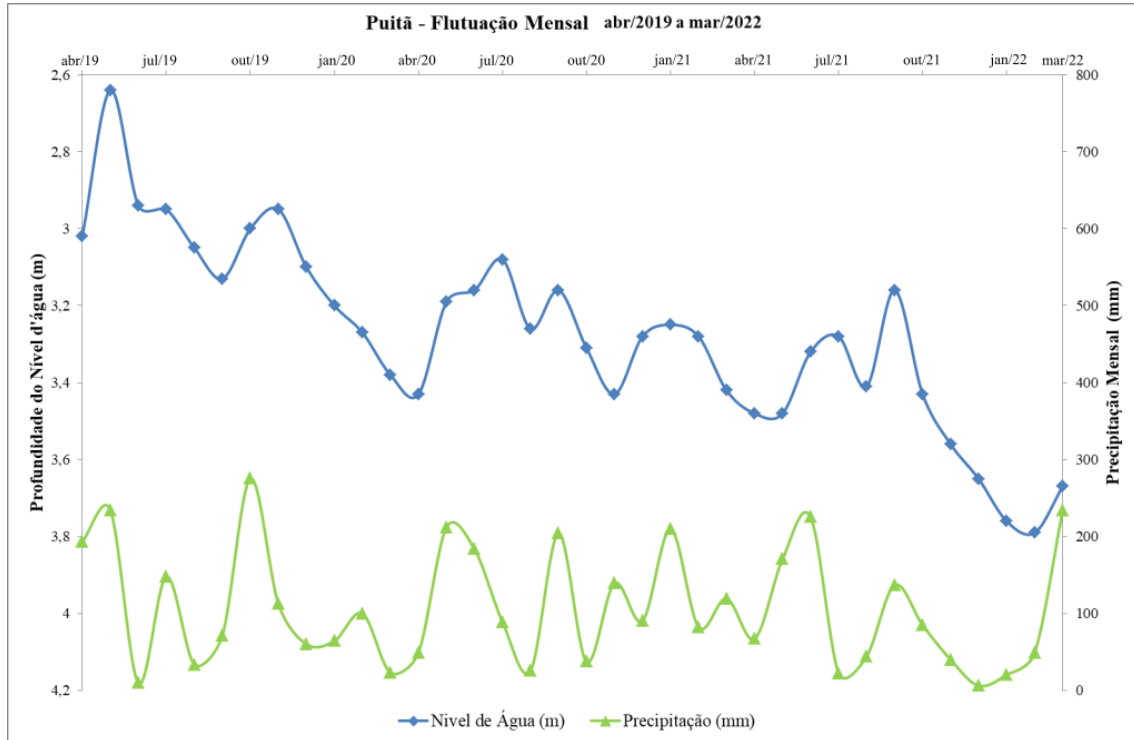
Flutuação do nível d'água		Anos de Monitoramento				
$\Delta h$	Valores de $\Delta h$ (m)	2011 <sup>2</sup>	2012 <sup>2</sup>	2013 <sup>2</sup>	2014	2015
01	0,304	Fevereiro (V)				
02	0,497	Maiο (O)				
03	0,095	Agosto (I)				
04	0,166	Outubro (P)				
05	0,074		Junho (T)			
06	0,740		Outubro (P)			
07	0,713		Dezembro (T)			
08	1,140			Abril (O)		
09	0,280			Junho (T)		
10	0,559			Novembro (P)		
11	0,19				Janeiro (V)	
12	0,70				Julho (I)	
13	0,81				Outubro (P)	
14	0,83					Janeiro (V)
15	0,07					Abril (O)
16	0,14					Julho (I)
$\sum \Delta h$ (m)	7,31	1,06	1,53	1,98	1,70	1,04
$\sum \Delta h$ (mm)	7.310	1062	1526	1979	1700	1040
Sy	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Recarga (mm)	<b>1.169,6<sup>1</sup></b>	169,9	244,2	361,6	272	166,4
Precipitação (mm)	<b>7.354,6<sup>1</sup></b>	1248,5	1363,2	1905	1920	917,90
Rec/pp (%)	<b>15,90</b>	13,61	17,91	16,62	14,1	18,12

<sup>1</sup>Estes valores são os resultados de todo o período de monitoramento (60 meses)  
<sup>2</sup>Dados retirados de Simon (2017).

Além dos dados acima, foi realizado o cálculo de recarga entre abril de 2019 e março de 2022, sendo visualizado que o poço continua refletindo os eventos de precipitação, conforme Gráfico 5. Também pode ser visualizado que houve um pico de

recarga no início do monitoramento, mas que não pode ser estimado, uma vez que não havia dados do nível d'água nos meses anteriores.

**Gráfico 5 - Flutuação do PM Puitã (abril de 2019 a março 2022) x precipitação mensal da estação Cachoeira Santa Cecília**



Fonte: RIMAS e Hidroweb.

Em relação ao cálculo de recarga, identificou-se um percentual mais baixo nos anos anteriores, com 13,14%, mas dentro do identificado nos dados elencados no referencial teórico (Simon, 2014; Rosa do Carmo, 2014). Quanto às estações, identifica-se que os meses de transição foram os que tiveram maior recorrência de recarga.



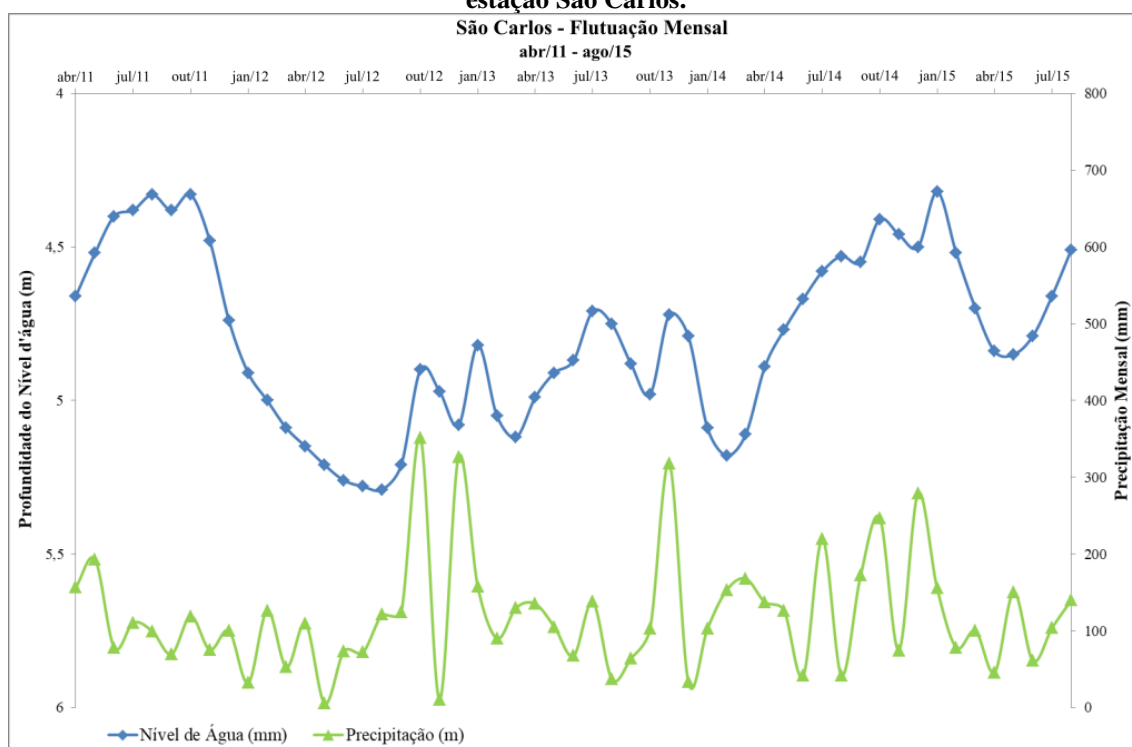
**Quadro 22 - Resultados do cálculo de recarga para o PM Puitã.**

Flutuação do nível d'água		Anos de Monitoramento			
$\Delta h$	Valores de $\Delta h$ (m)	2019	2020	2021	2022
01	0,30	Julho (I)			
02	0,37	Novembro (P)			
03	0,62		Julho (I)		
04	0,27		Setembro (T)		
05	0,46			Janeiro (V)	
06	0,52			Julho (I)	
07	0,38			Setembro (T)	
08	0,26				Março (T)
$\sum \Delta h$ (m)	3,18	0,67	0,89	1,36	0,26
$\sum \Delta h$ (mm)	3180	670	890	1360	260
Sy	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Recarga (mm)	<b>508,8<sup>1</sup></b>	107,2	142,4	217,6	41,6
Precipitação (mm)	<b>3870,3<sup>1</sup></b>	1138,2	1218,3	1210	303,8
Rec/pp (%)	<b>13,14%</b>	9,4%	11,68	17,98	13,49

<sup>1</sup>Estes valores são os resultados de todo o período de monitoramento (36 meses)

O próximo poço analisado é o PM São Carlos, localizado no município de Rosário de Sul, cuja relação entre recarga e precipitação não é tão clara quanto no PM Puitã, sobretudo no período anterior a 2011, quando as precipitações estiveram abaixo de 200 mm.

**Gráfico 6 - Flutuação do PM São Carlos (abril de 2011 a agosto de 2015) x precipitação mensal da estação São Carlos.**



**Fonte: RIMAS e Hidroweb.**

Da mesma forma que o PM Puitã, foram utilizadas as informações de Simon (2017), com a atualização a partir de dezembro de 2013 até agosto de 2015, sendo identificada uma recarga de 1.075,2 mm, correspondente a 16,09% da precipitação.

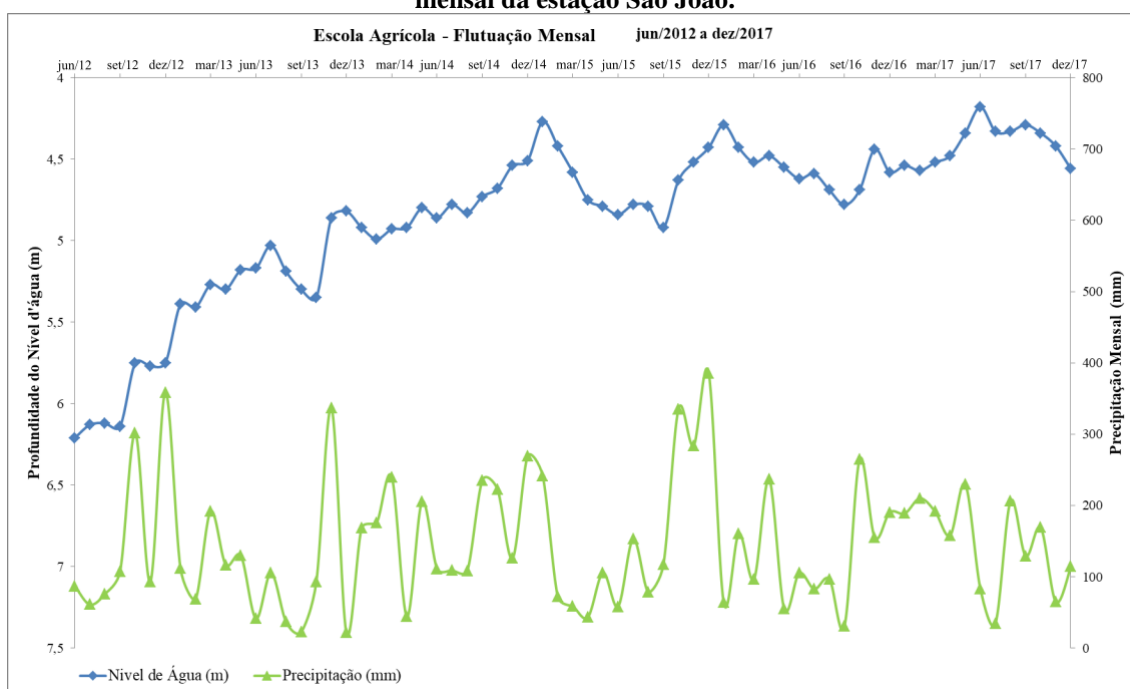
Quanto às estações do ano, identificou-se que nos meses de inverno e de primavera são os com maior registro de recarga do aquífero, destacando que não foram identificadas recargas nos meses de outono e de transição.

**Quadro 23 - Resultados do cálculo de recarga para o PM São Carlos.**

Flutuação do nível d'água		Anos de Monitoramento				
$\Delta h$	Valores de $\Delta h$ (m)	2011 <sup>2</sup>	2012 <sup>2</sup>	2013 <sup>2</sup>	2014	2015
01	0,726	Agosto (I)				
02	0,092	Outubro (P)				
03	0,672		Outubro (P)			
04	0,443			Janeiro (V)		
05	1,070			Julho (I)		
06	0,431			Novembro (P)		
07	1,87				Agosto (I)	
08	0,17				Outubro (P)	
09	0,23					Janeiro (V)
10	1,01					Agosto (I)
$\sum \Delta h$ (m)	6,72	0,82	0,67	1,95	2,04	1,24
$\sum \Delta h$ (mm)	6720	817	671	1945	2040	1240
Sy	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Recarga (mm)	<b>1075,2<sup>1</sup></b>	130,8	107,4	311,1	326,4	198,4
Precipitação (mm)	<b>6679,7<sup>1</sup></b>	1299,5	1405,2	1377,9	1762,7	834,4
Rec/pp (%)	<b>16,09</b>	10,06	7,65	22,58	18,5	23,77
<sup>1</sup> Estes valores são os resultados de todo o período de monitoramento (53 meses) <sup>2</sup> Dados retirados de Simon (2017).						

O PM Estação Agrícola, localizado no município de Alegrete, foi o poço com maior tempo de monitoramento realizado na presente tese (66 meses), sendo que a recarga fica evidente nos eventos de maior precipitação, mas também ocorre nos eventos de menor precipitação, conforme pode ser visualizado no Gráfico 7.

**Gráfico 7 - Flutuação do PM Estação Agrícola (junho de 2012 a dezembro de 2017) x precipitação mensal da estação São João.**



Fonte: RIMAS e Hidroweb.

Nesse sentido, utilizando inicialmente os dados de Simon (2017), anos de 2012 e 2013, identificou-se uma recarga irregular ao longo dos anos, variando de 4,9% em 2015 a 24,69% em 2013, com uma média de 12,94% da precipitação, totalizando 1.242,4 mm. Os meses de Inverno e de Transição foram aqueles com maior registro de recarga, sendo o mês de janeiro o que teve maior registro.

Quadro 24 - Resultados do cálculo de recarga para o PM Estação Agrícola.

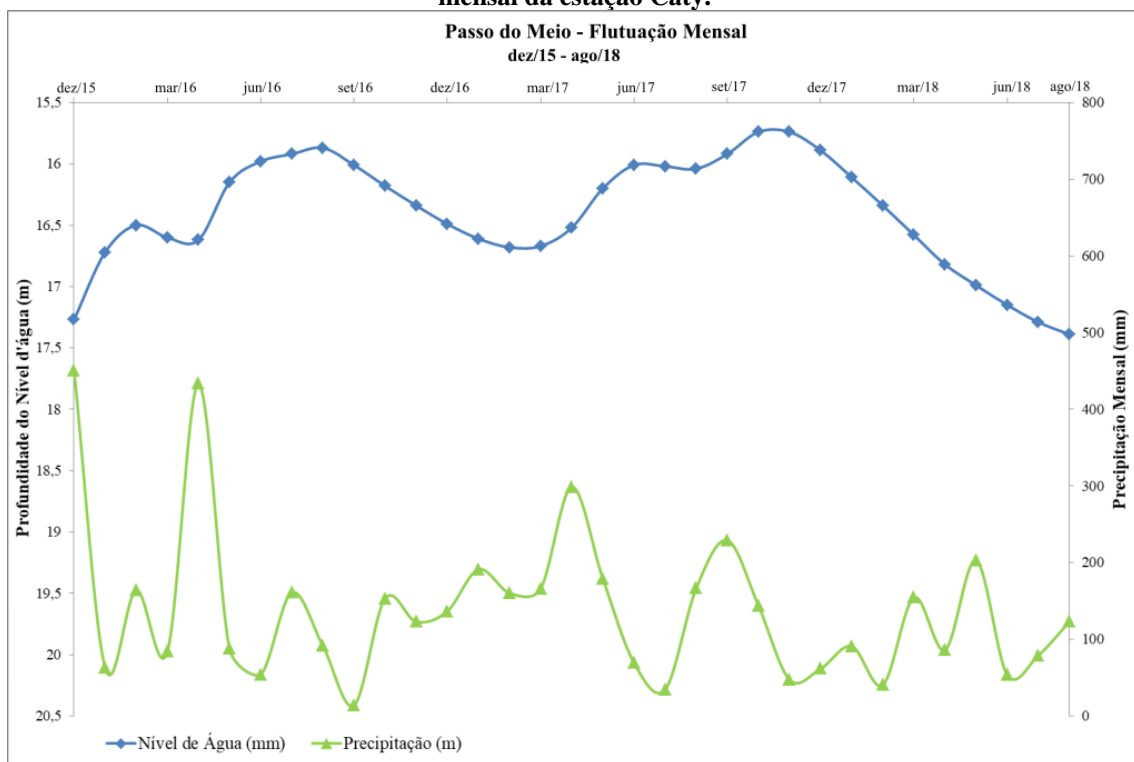
Flutuação do nível d'água		Anos de Monitoramento					
$\Delta h$	Valores de $\Delta h$ (m)	2012 <sup>2</sup>	2013 <sup>2</sup>	2014	2015	2016	2017
01	1,084	Outubro (P)					
02	0,505		Janeiro (V)				
03	0,222		Março (T)				
04	0,411		Julho (I)				
05	0,833		Dezembro (T)				
06	0,46			Maio (O)			
07	0,16			Julho (I)			
08	0,80				Janeiro (V)		
08	0,25				Julho (I)		
10	1,17					Janeiro (V)	
11	0,17					Abril (T)	
12	0,10					Julho (I)	
13	0,55					Novembro (P)	
14	0,17						Janeiro (V)
15	0,51						Junho (T)
16	0,37						Setembro (T)
$\sum \Delta h$ (m)	7,76	1,08	1,97	0,62	1,05	1,99	1,05
$\sum \Delta h$ (mm)	7765	1084	1971	620	1050	1990	1050
Sy	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Recarga (mm)	<b>1242,4<sup>1</sup></b>	173,4	315,4	99,2	168	318,4	168
Precipitação (mm)	<b>9597,8<sup>1</sup></b>	1166,6	1277,4	2015,6	1932,9	1539,6	1665,7
Rec/pp (%)	<b>12,94</b>	14,87	24,69	4,90	8,69	20,6	10

<sup>1</sup>Estes valores são os resultados de todo o período de monitoramento (67 meses).  
<sup>2</sup> Dados retirados de Simon (2017).

Por fim, o último poço analisado foi o PM Passo do Meio, localizado em Quaraí, e que não foi monitorado por Simon (2017), uma vez que se encontra na Bacia Hidrográfica do Rio Quaraí. A recarga não acontece de forma imediata a partir da precipitação, ocorrendo nos picos de precipitação e subindo gradualmente nas menores

precipitações, conforme pode ser verificado no Gráfico 8. Essa subida gradual nos meses com menor precipitação pode estar relacionado ao fato de que não é quantidade de chuva que importa, mas sim, a existência de dias seguidos com volumes pequenos que acabam tendo mais eficiência na recarga do que dias isolados de maior quantidade ou volume, sobretudo porque os eventos torrenciais favorecem o escoamento superficial concentrado e não a infiltração. Destaca-se que houve um pico de recarga no início do monitoramento que não pode ser identificado, pois não havia dados do nível d'água nos meses anteriores.

**Gráfico 8 - Flutuação do PM Passo do Meio (dezembro de 2015 a agosto de 2018) x precipitação mensal da estação Caty.**



Fonte: RIMAS e Hidroweb.

Foi identificada uma recarga de 435,2 mm, totalizando 13,12% da precipitação, ocorrendo em três meses, durante os 33 meses de monitoramento, durante o inverno, a primavera e o mês de transição.

**Quadro 25 - Resultados do cálculo de recarga para o PM Passo do Meio.**

Flutuação do nível d'água		Anos de Monitoramento	
$\Delta h$	Valores de $\Delta h$ (m)	2016	2017
01	1,13	Agosto (I)	
02	1,24		Junho (T)
03	0,35		Outubro (P)
$\Sigma \Delta h$ (m)	2,72	1,13	1,59
$\Sigma \Delta h$ (mm)	2720	1130	1590
$S_y$	0,16	0,16	0,16
Recarga (mm)	<b>435,2<sup>1</sup></b>	180,8	254,4
Precipitação (mm)	<b>3314,9<sup>1</sup></b>	1566,1	1748,8
Rec/pp (%)	<b>13,12</b>	11,54	14,54
<sup>1</sup> Estes valores são os resultados de todo o período de monitoramento (33 meses)			

Sendo assim, dos seis poços monitorados, foi possível verificar a recarga em quatro deles, sendo elencados os valores identificados de recarga e de % da precipitação, no Quadro 26.

**Quadro 26 - Resumo das estimativas de recarga nos poços monitorados na área de ocorrência da arenização.**

Poço	Recarga (mm)	Precipitação (mm)	% da precipitação
Puitã (1)	1169,6	7354,6	15,90
Puitã (2)	508,8	3870,3	13,14
São Carlos	1075,2	6679,7	16,09
Estação Agrícola	1242,4	9597,8	12,94
Passo do Meio	435,2	3314,9	13,12
<b>Total</b>	<b>4431,2</b>	<b>30817,3</b>	<b>14,37</b>

Tabulando os meses em que houve registro de recargas, identificou-se que o mês em que mais houve recarga foi o mês de julho (10) seguido por janeiro (9), outubro e maio (8), dos quais três (julho/janeiro e maio) são meses caracterizados por Verдум (1997) como de inverno hidrológico, cuja característica consiste na recarga dos aquíferos. O mês com menos registro foi fevereiro (1). Já a estação com mais registros foi o inverno (15), corroborando o destacado por Binda (2016) quando aponta que as chuvas de menor intensidade, no inverno, favorecem a infiltração e a recarga. Os dados podem ser visualizados no Quadro 27.

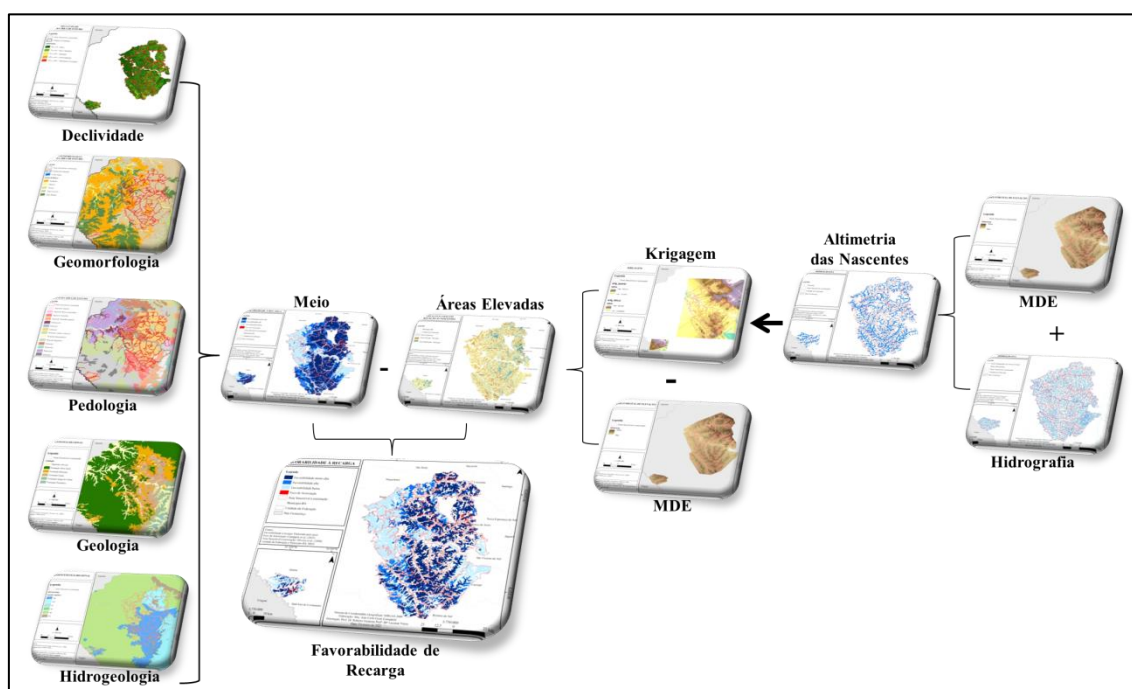
**Quadro 27 - Mês e estação em que houve recarga nos poços monitorados.**

Mês	Veze de Recarga	Estação	Veze por Estação
Janeiro	09	Verão	10
Fevereiro	01	Verão	
Março	02	Transição	11
Abril	03	Outono	11
Maio	08	Outono	
Junho	04	Transição	11
Julho	10	Inverno	15
Agosto	05	Inverno	
Setembro	03	Transição	11
Outubro	08	Primavera	12
Novembro	04	Primavera	
Dezembro	02	Transição	11

#### 4.4 Mapeamento da Favorabilidade à recarga na área de ocorrência da arenização.

A favorabilidade à recarga foi identificada pelo cruzamento das bases cartográficas do meio com o mapa das áreas elevadas em relação às nascentes, conforme modelo esquemático da Figura 37.

**Figura 37 - Cruzamento de dados para o mapa de favorabilidade de recarga.**



Fonte: Elaborado por Caneppele, J.



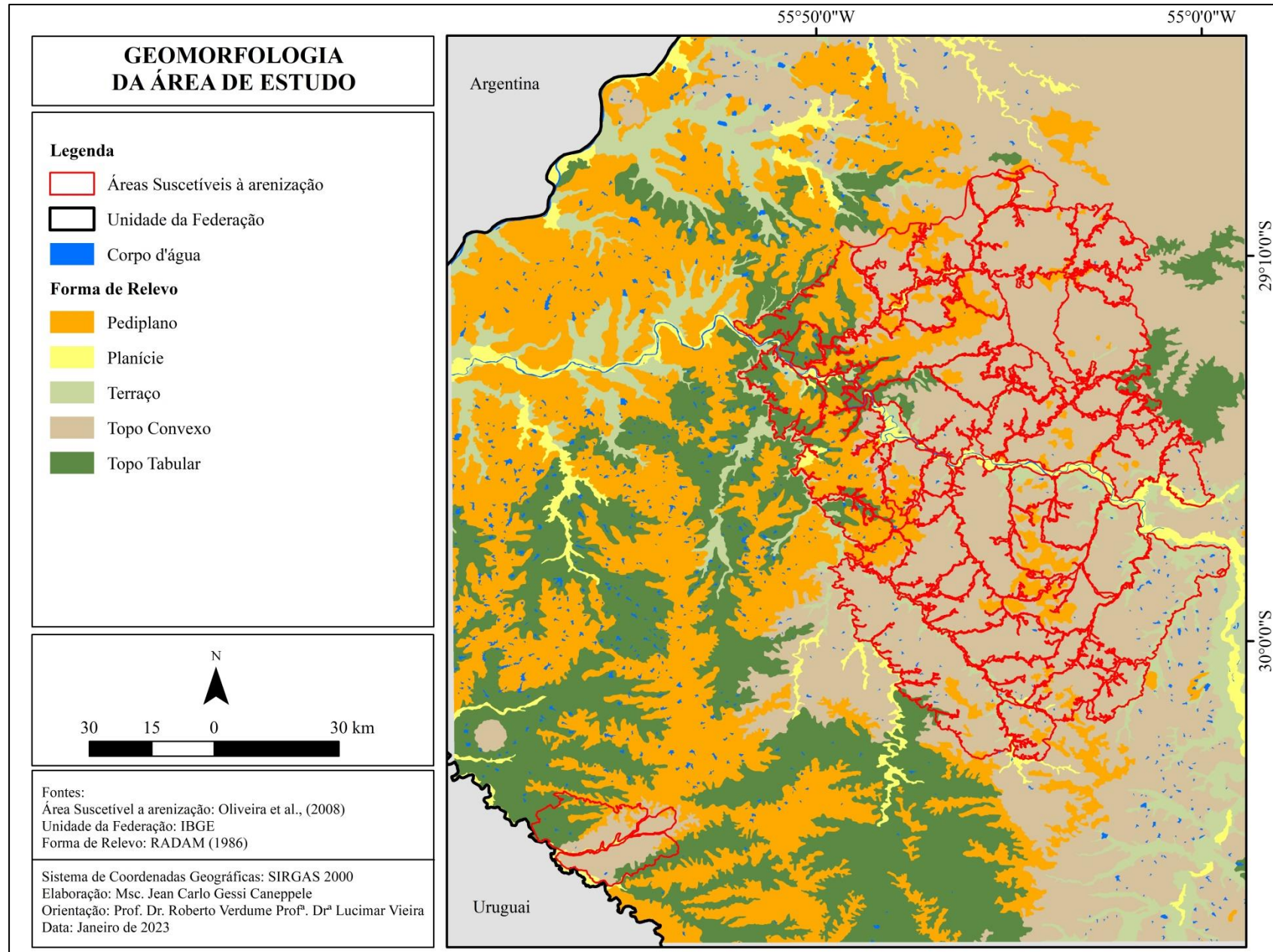
Quanto ao relevo, no contexto do presente estudo, destacam-se as definições de Muller Filho *et al.*, (1970), Guasselli *et al.*, (2006), Menegat *et al.*, (2006), Dantas *et al.*, (2010), Suertegaray *et al.*, (2012) que realizaram a compartimentação geomorfológica regional, sem, contudo, delimitar as formas de relevo em escalas mais detalhadas. Dentro deste contexto, destaca-se o mapeamento do projeto RADAMBRASIL (1986) que delimitou em escala 1:250.000 as formas do relevo, embora também utilize uma compartimentação regional (Planície Continental/Planalto das Araucárias/Planalto das Missões/Planalto da Campanha/Depressão Central Gaúcha). Na área da arenização destacam-se 05 formas de relevo, conforme Quadro 28 e Figura 38.

**Quadro 28 - Formas de Relevo no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul**

<b>Forma de Relevo</b>	<b>Descrição</b>
Topo Convexo	Relevo esculpido em rochas cristalinas e sedimentares, às vezes denotando controle estrutural. São entalhadas por sulcos e cabeceiras de drenagem de primeira ordem.
Topo Tabular	Feições de rampas suavemente inclinadas e lombas esculpidas em coberturas sedimentares inconsolidadas, denotando eventual controle estrutural, resultante dos processos de dissecação, atuando sobre superfície aplainada.
Pediaplano	Superfícies de aplainamento retocada desnudada, com planos inclinados irregulares desnudados em consequência de retoques sucessivos indicando predominância dos processos de erosão areolar, truncando rochas sãs ou pouco alteradas e Superfícies de aplainamento retocada inumada, com planos inclinados uniformizados por coberturas de diversas origens, resultantes de retoques e remanejamentos sucessivos, indicando predominância de processos de erosão areolar.
Planície Fluvial	Área plana resultante de acumulação fluvial sujeita a inundações periódicas, correspondendo às várzeas atuais.
Terraço Fluvial	Acumulação fluvial de forma plana, levemente inclinada, apresentando ruptura de declive em relação ao leito do rio e as várzeas recentes situadas em nível inferior, entalhada devido às mudanças de condições de escoamento e consequente retomada de erosão.

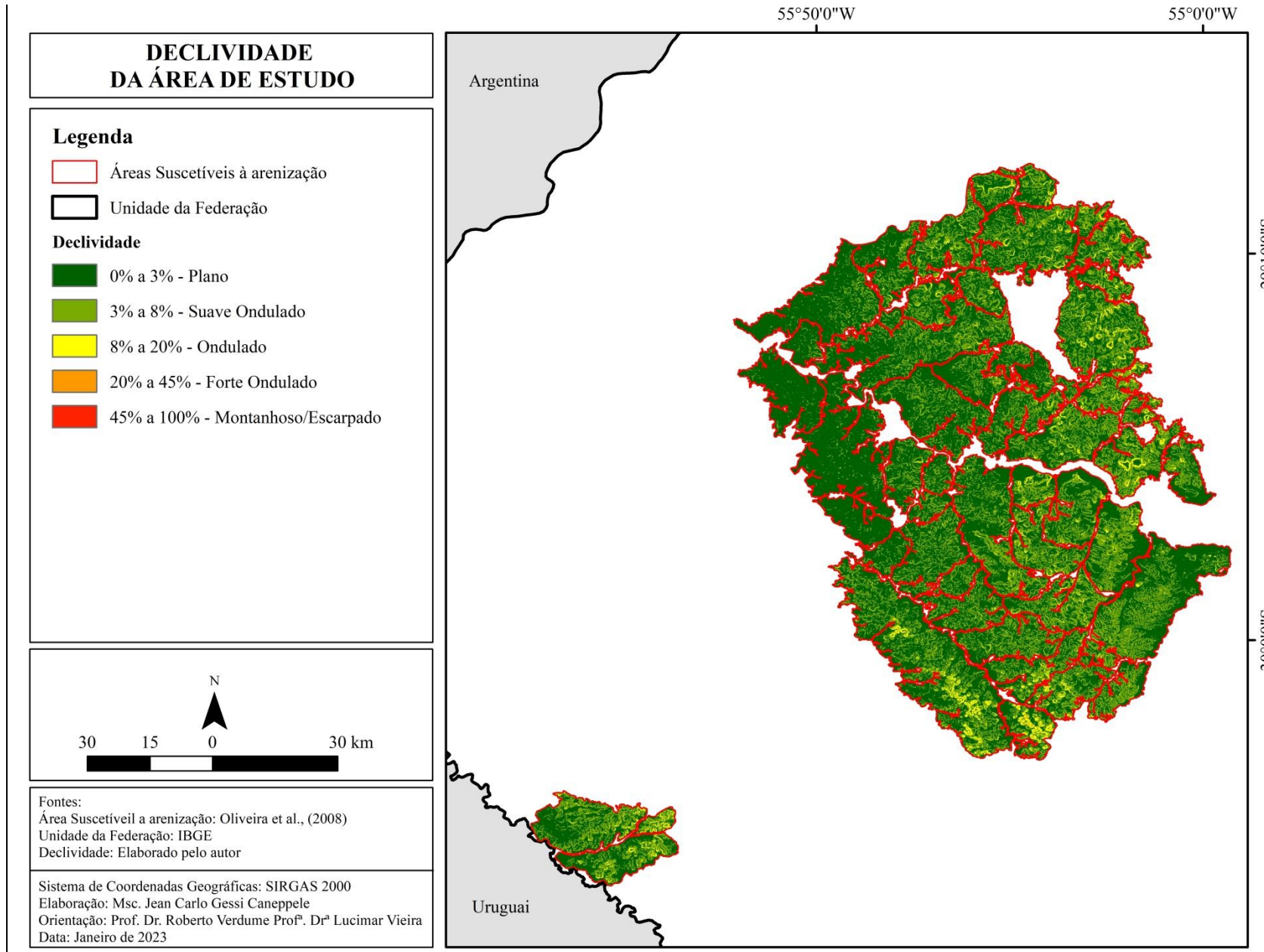
**Fonte: RADAMBRASIL (1986).**

Figura 38 – Formas de Relevo no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul.



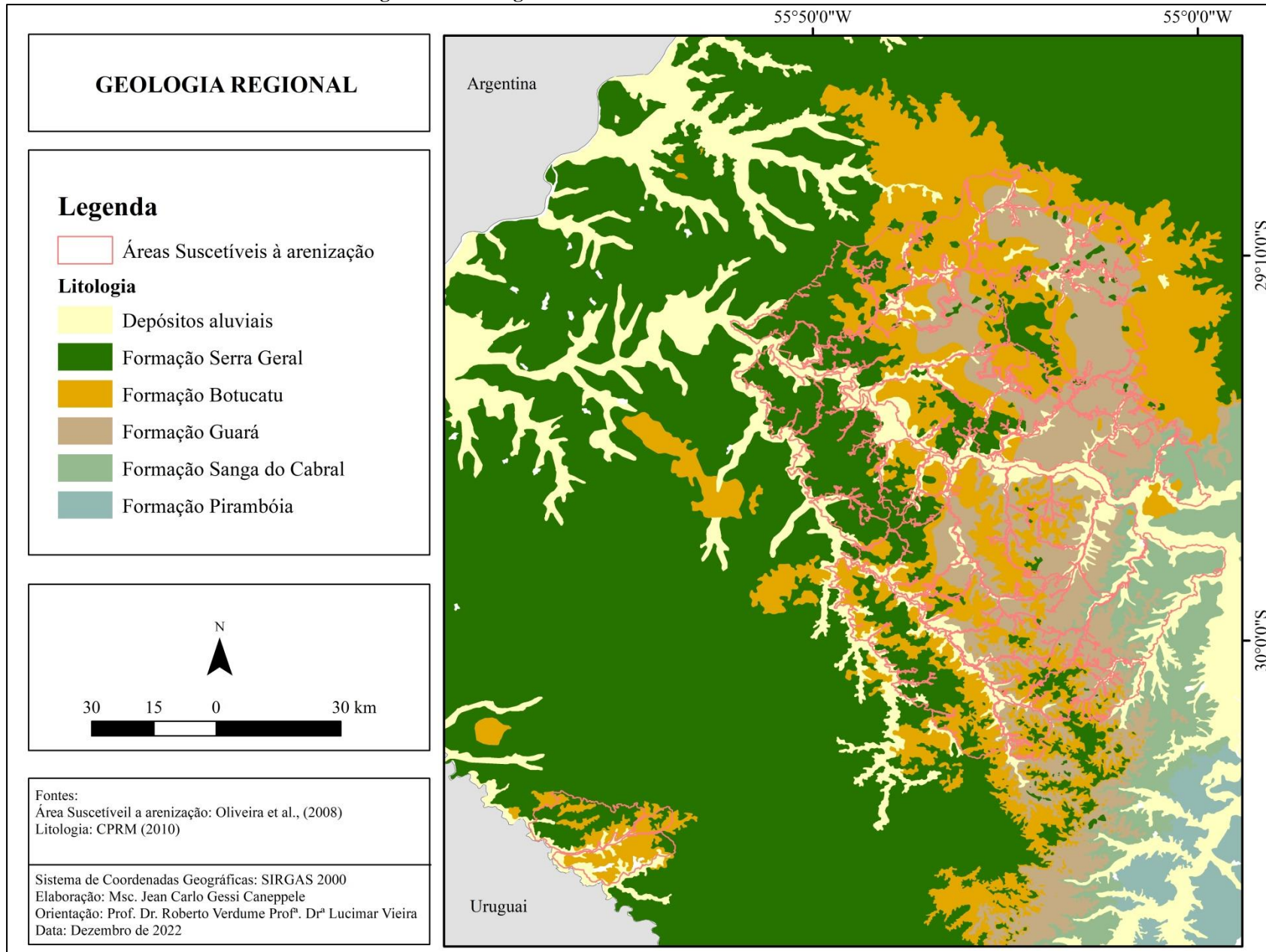
A declividade predominante na área de estudo é plana e suave ondulada, conforme classes da Embrapa (1996), com declividades onduladas associadas às escarpas dos morros testemunhos. As declividades acima de 20% são praticamente nulas nas áreas suscetíveis a arenização. Na Figura 39 podem ser vistas as declividades da área de estudo.

Figura 39 – Formas de Relevo no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul.



Quanto a Geologia, pode-se perceber a partir do mapa geológico do Rio Grande do Sul, elaborado pela CPRM (2006) e do mapeamento geológico elaborado pelo projeto RADAM (1986) que as principais unidades litoestratigráficas associadas à área de ocorrência da arenização são as formações Guará e Botucatu. Além disso, regionalmente pode-se dar destaque às formações Sanga do Cabral e Serra Geral e aos Depósitos Quaternários.

Figura 40 - Litologia no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul.



Quanto à hidrogeologia da área de ocorrência da arenização, destacam-se cinco tipos de sistemas aquíferos, delimitados por CPRM (2005) e disponibilizados no mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul. Destes, destacam-se os sistemas aquíferos Guará/Botucatu I (bg1) e Guará/Botucatu II (bg2) como aqueles que estão mais associados à arenização. Os cinco tipos de aquífero estão mapeados na Figura 41, com suas descrições elencadas na Figura 42.

Figura 41 - Hidrogeologia no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul.

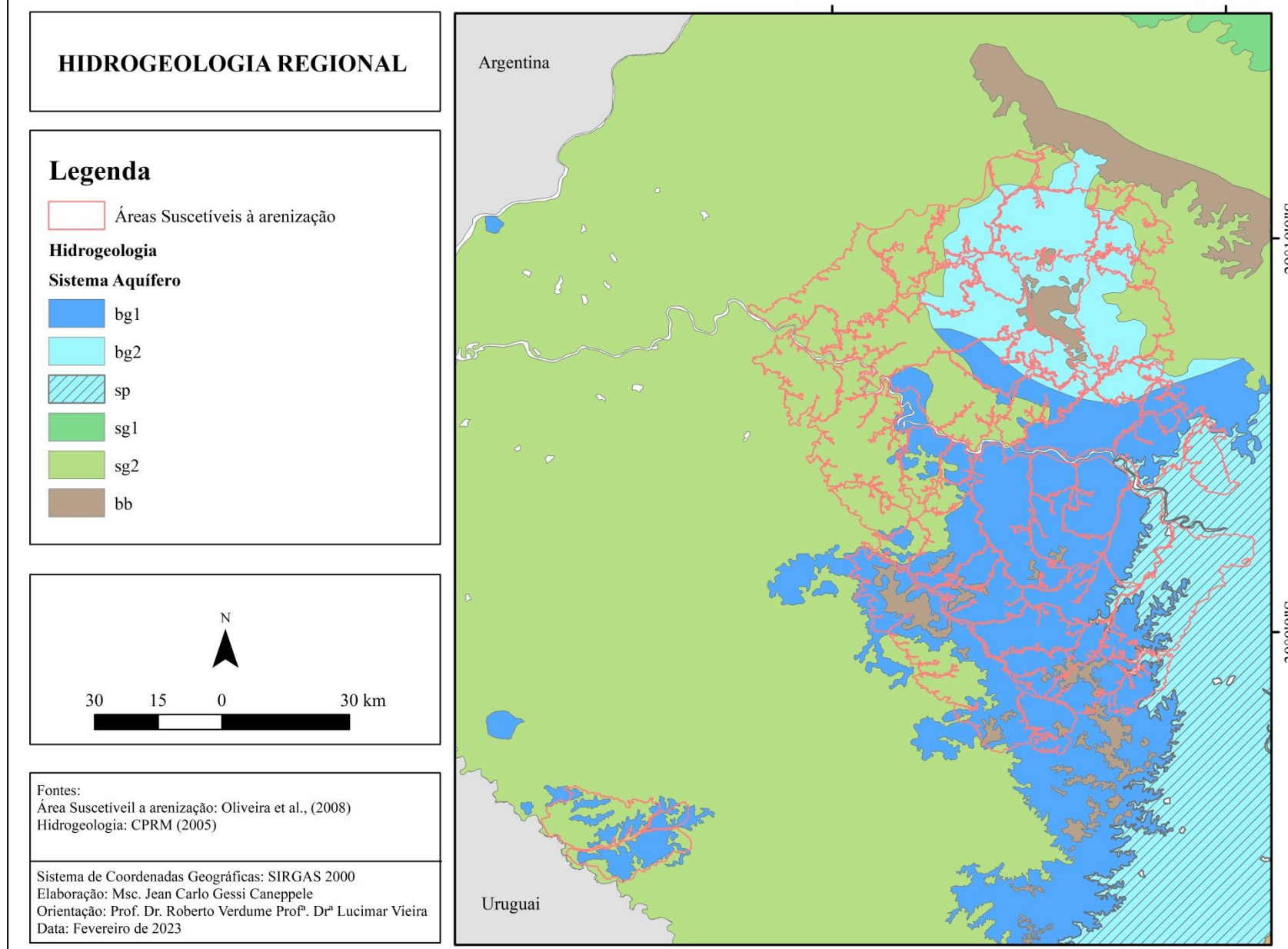
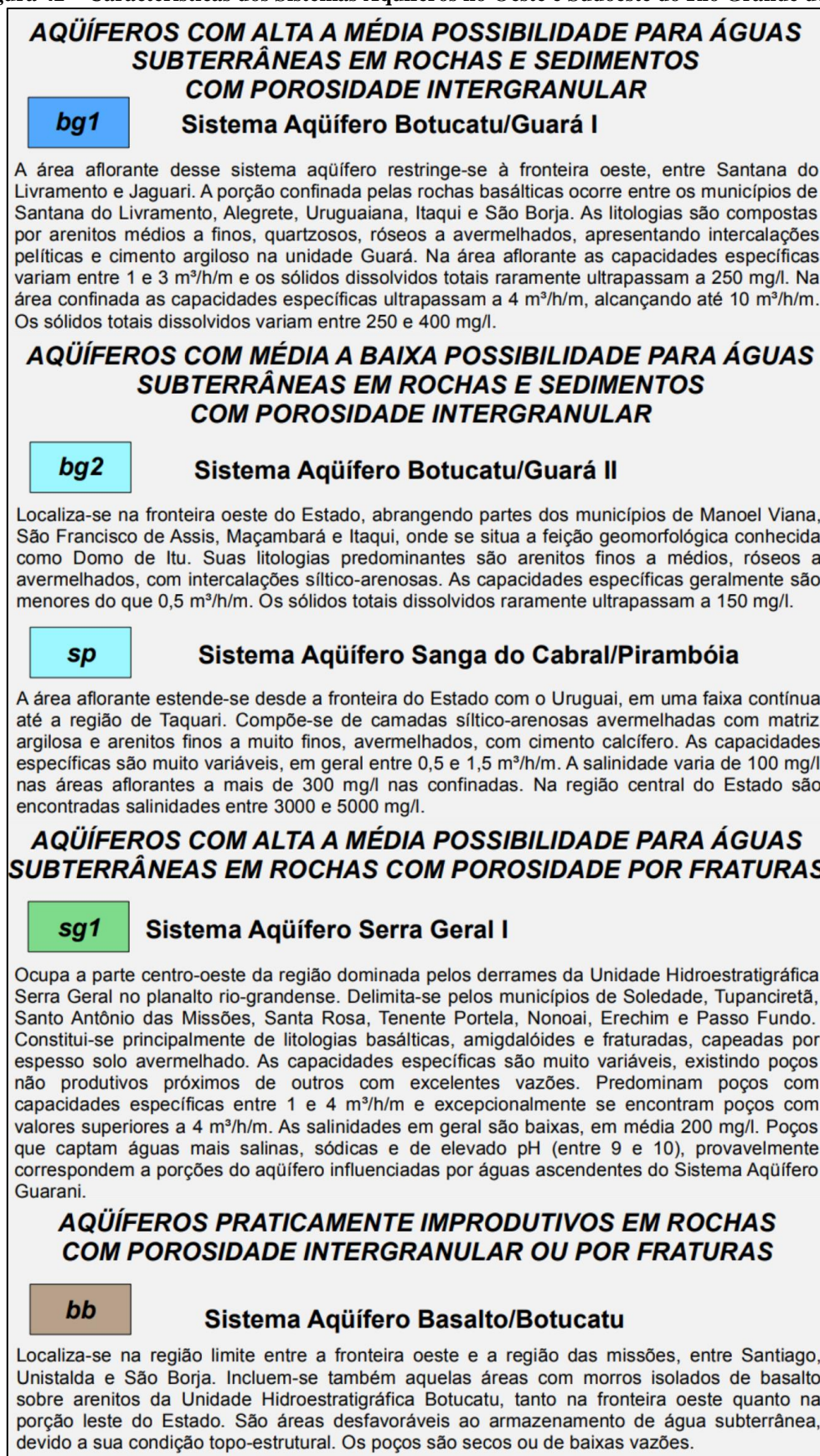




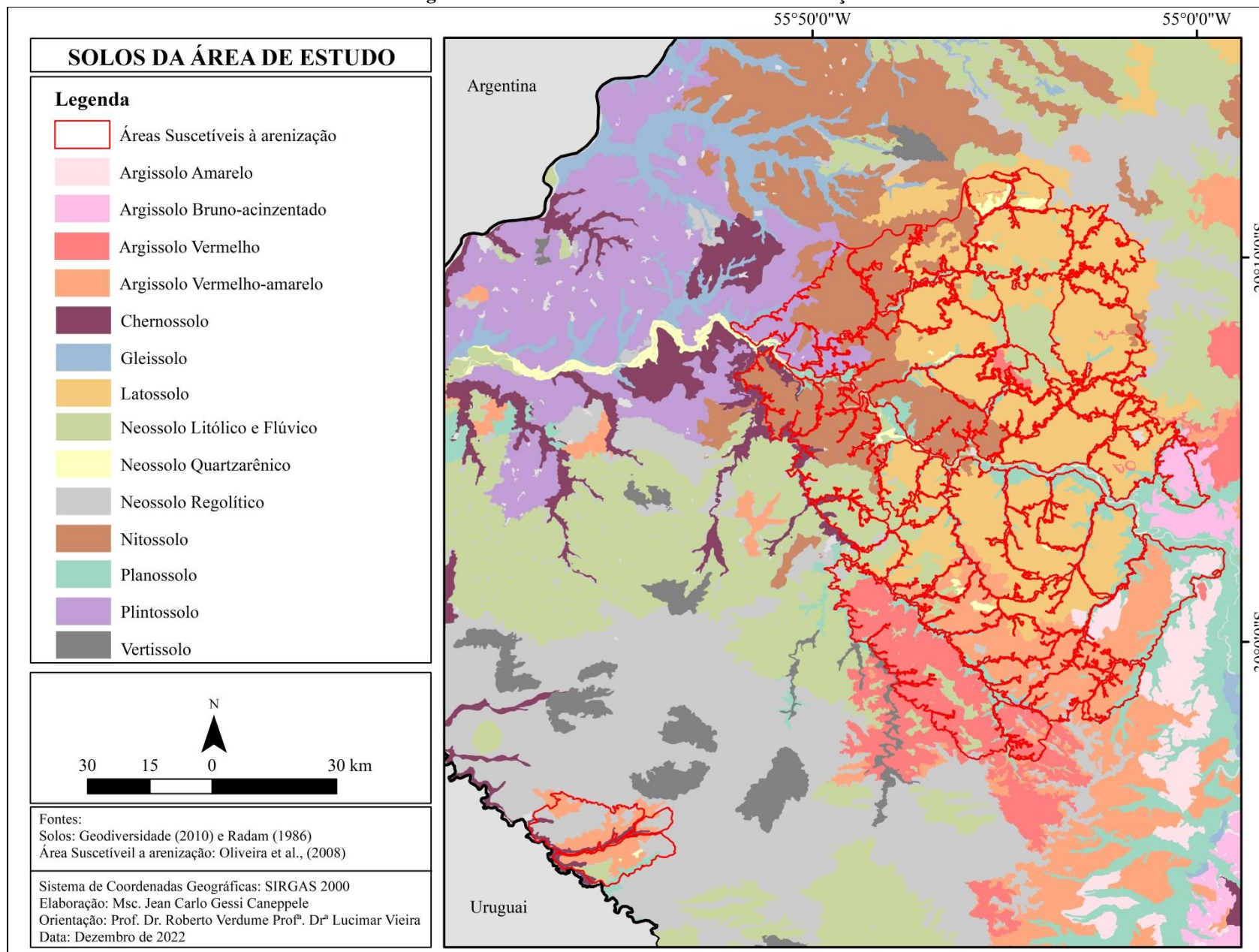
Figura 42 – Características dos Sistemas Aquíferos no Oeste e Sudoeste do Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado de CPRM (2005).

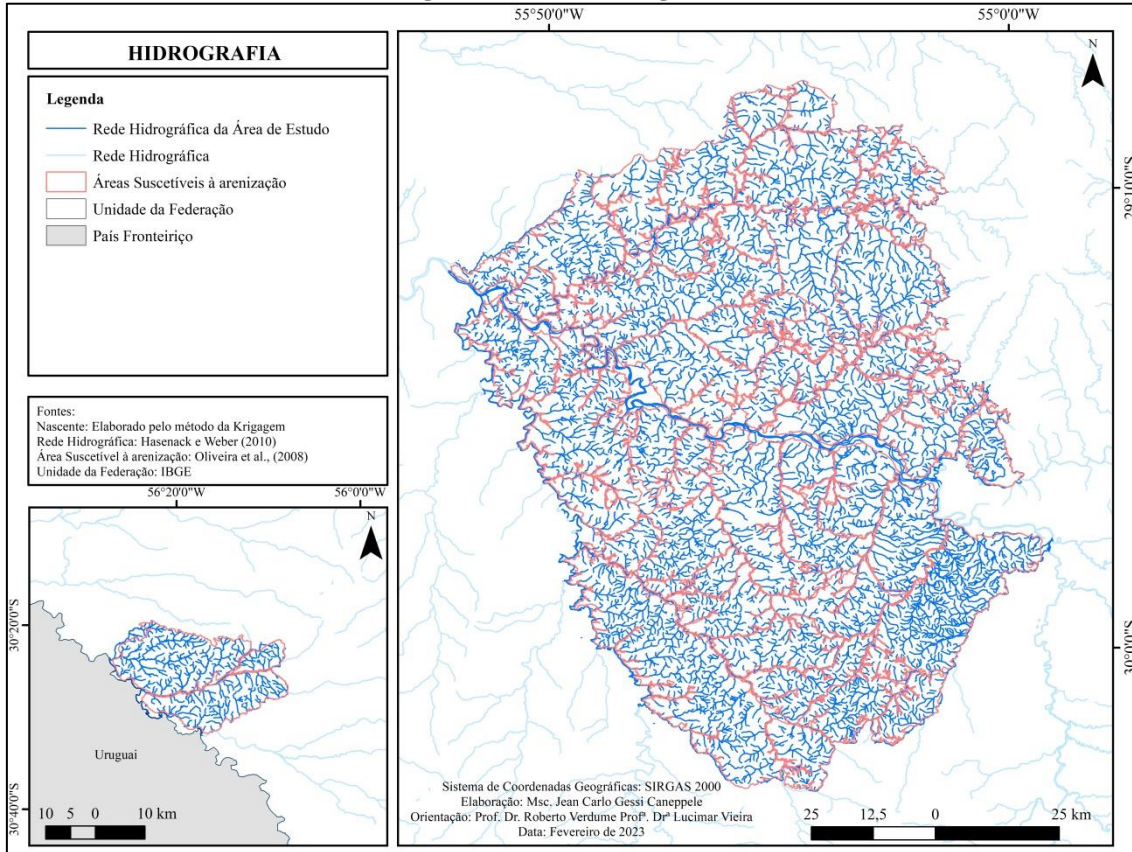
Para Gomes *et al.*, (2006) os principais solos associados as áreas de recarga do SAG no Rio Grande do Sul são os Argissolos vermelhos de textura média e os Neossolos Quartzarênicos, contudo, destaca-se que os primeiros têm como característica um aumento de argila do horizonte A para o horizonte B com baixas taxas de infiltração (SARTORI *et al.*, 2005). Dentro deste contexto, no mapa da Figura 43 se encontram os solos da área de ocorrência da arenização, com destaque aos Neossolos Quartzarênicos órticos, uma vez que estes são característicos da arenização, porém, não aparecem no mapa em função da escala de mapeamento realizada.

Figura 43 - Solos na área de ocorrência da arenização.



Quanto a rede hidrográfica, foram encontradas 3.954 nascentes, em altitudes que variam de 62 m a 330 m, como mostra o mapa da Figura 44, com a rede hidrográfica inserida nas áreas de arenização.

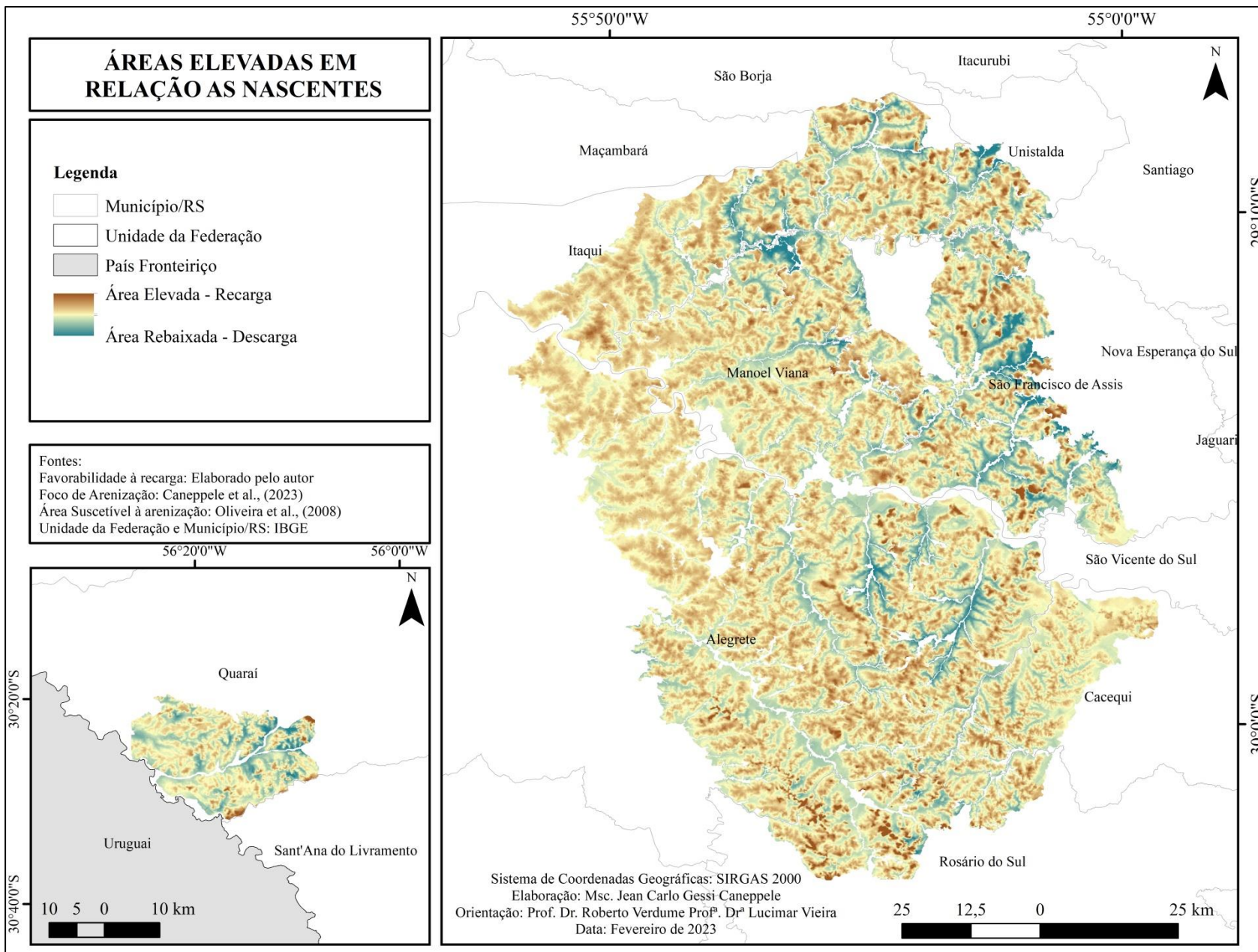
**Figura 44 - Rede hidrográfica.**



**Fonte: Elaborado por Caneppele, J.**

Com a altimetria das nascentes, foi realizado o procedimento de *krigagem* e subtração do MDE, gerando o mapa da Figura 45, que delimita as áreas elevadas em relação às nascentes, destacando nestas áreas uma maior probabilidade de recarga.

Figura 45 - Áreas elevadas em relação às nascentes.



Quanto aos atributos do meio, destaca-se que estes foram cruzados apenas nas áreas suscetíveis à arenização, delimitadas por Oliveira *et al.*, (2008), estando vinculadas às bacias hidrográficas dos rios Ibicuí e Quaraí. Na Figura 46 é possível visualizar as áreas quanto à sua favorabilidade de recarga, considerando apenas as características do meio, destacando-se que as áreas com muito alta favorabilidade concentram 40,1 % da área total das áreas suscetíveis e associadas às formações Botucatu e Guará; ao relevo com declividade plana e suave ondulada, das coxilhas e topos de morros e principalmente aos Latossolos, Argissolos vermelhos e Neossolos Quartzarênicos órticos.

Quanto às áreas com alta favorabilidade, ressalta-se que elas estão associadas também às formações Botucatu e Guará, aos Latossolos e Argissolos Vermelhos. Porém, em relação ao relevo, destacam-se as áreas com maior declividade relacionadas sobretudo nas encostas dos relevos testemunhos e nos relevos dissecados, no sul das áreas suscetíveis da bacia rio do Ibicuí e na bacia do rio Quaraí. A classe de alta favorabilidade de recarga corresponde a 24,1 % das áreas suscetíveis à arenização.

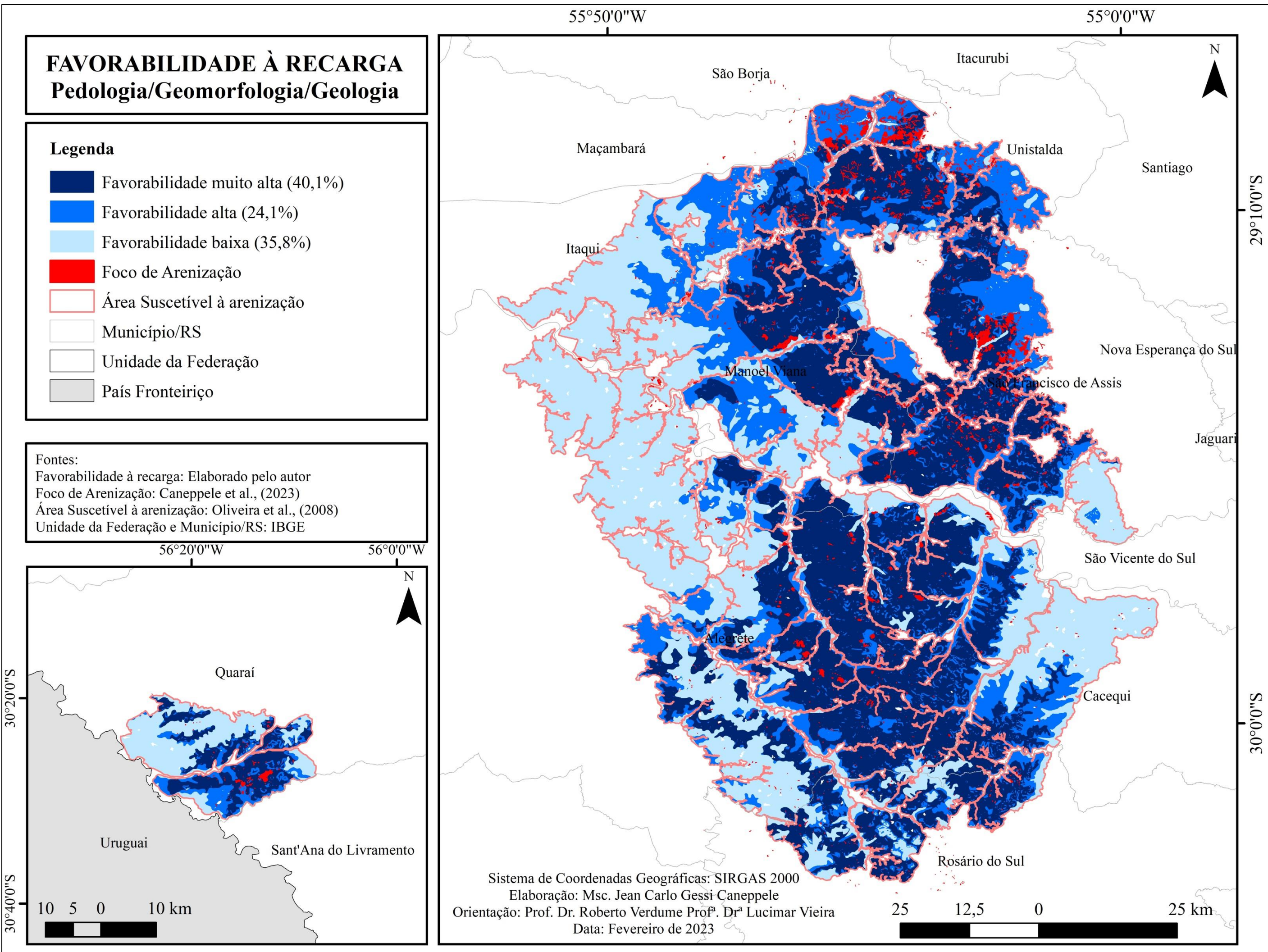
Por fim, as áreas com baixa favorabilidade, são associadas às formações Sanga do Cabral e Serra Geral, na porção leste e oeste das áreas suscetíveis na bacia do Ibicuí. Além disso, vinculam-se aos demais tipos de solos identificados como de baixa infiltração, bem como ao relevo próximo as calhas fluviais dos principais cursos d'água. A classe de baixa favorabilidade de recarga corresponde a 35,8 % das áreas suscetíveis à arenização.

Além disso, destaca-se que cerca de 64,8 % das feições erosivas encontram-se na área de muito alta favorabilidade de recarga, ressaltando ainda mais a relação da arenização com as áreas de recarga do SAG e o serviço ambiental de filtragem prestado pelos areais, conforme pode ser visualizado no Quadro 28.

**Quadro 29 – Área em hectares de acordo com a feição erosiva, sua porcentagem em relação ao total e sua localização frente às classes de favorabilidade de recarga.**

<b>Classe</b>	<b>Voçoroca (ha/%)</b>	<b>Ravina (ha/%)</b>	<b>Areal (ha/%)</b>	<b>Total (ha)</b>	<b>% de Área</b>
Muito Alta	146,64/44	613,48/46	3.483,96/71	4.244,08	64,8
Alta	136,02/41	697,28/52	1.254,42/26	2.087,72	31,90
Baixa	50,79/15	20,19/02	145,90/03	216,88	3,3
Total	333,45/100	1.330,95/100	4.884,28/100	6.548,68	100

Figura 46 - Favorabilidade a recarga nas áreas suscetíveis a arenização, a partir das variáveis do meio pedológico, geomorfológico e geológico.



Após o cruzamento das variáveis do meio, que estão associadas à recarga do aquífero, culminando com a Figura 46 anterior, foi realizada a subtração das áreas topograficamente mais baixas em relação às nascentes, definidas como áreas de descarga, restando às áreas topograficamente elevadas, associadas às nascentes, e a sua classificação em relação às classes de Muito Alta, Alta e Baixa favorabilidade.

No mapa da Figura 47 podem ser visualizadas as classes mapeadas nas áreas suscetíveis à arenização, ressaltando o fato de que as áreas associadas às planícies e aos vales fluviais dos principais cursos d'água, como Ibirapuitã, Santa Maria e Ibicuí, são considerados como áreas de descarga e já se encontram removidas por Oliveira *et al.*, (2008), enquanto aqueles relacionados aos cursos menores foram retirados com esse procedimento. Com esta subtração, as áreas favoráveis à recarga correspondem a 92,8% das áreas suscetíveis à arenização, sendo que 40,06 % são definidas como muito alta, 23,44 % como alta e 36,6 % como baixa favorabilidade.

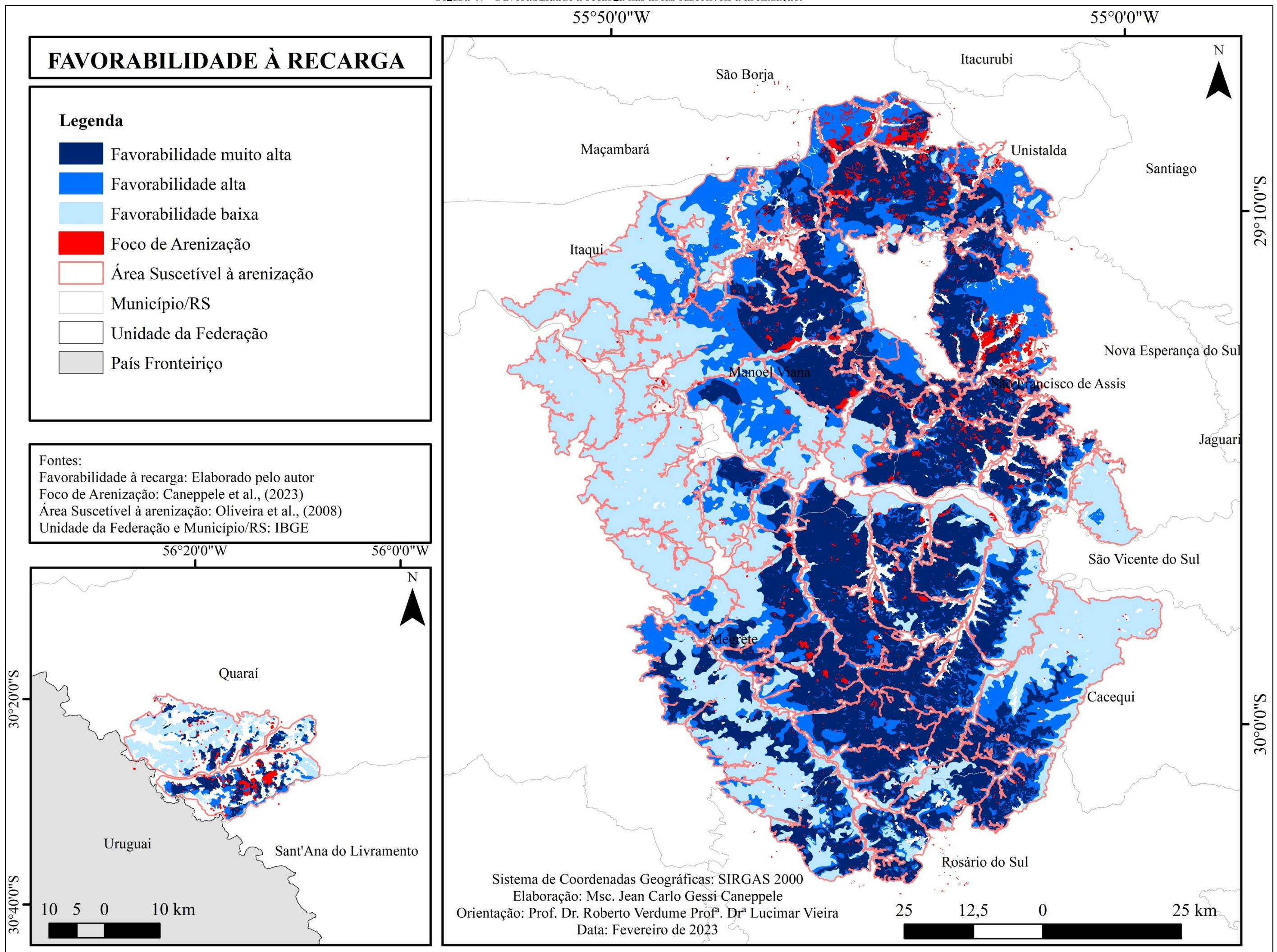
As feições erosivas encontram-se, principalmente, na área de muito alta favorabilidade de recarga (54,7%), entretanto, estão localizadas no contato entre as áreas de muito alta favorabilidade e de áreas definidas como descarga. No Quadro 29 podem ser visualizadas a localização das feições erosivas em relação às classes de favorabilidade e as áreas de descarga.

**Quadro 30 - Área em hectares de acordo com a feição erosiva, sua porcentagem em relação ao total e sua localização frente às classes de favorabilidade de recarga e descarga.**

<b>Classe</b>	<b>Voçoroca (ha/%)</b>	<b>Ravina (ha/%)</b>	<b>Areal (ha/%)</b>	<b>Total (ha)</b>	<b>% de Área</b>
Muito Alta	116,09/35	532,67/40	2.934,57/60	3.583,33	54,7
Alta	107,73/32	490,80/36	902,87/18	1.501,40	22,9
Baixa	49,95/15	15,89/02	125,13/03	190,97	2,9
Descarga	59,68/18	291,59/22	921,71/19	1.272,98	19,5
Total	333,45/100	1330,95/100	4884,28/100	6.548,68	100



Figura 47 - Favorabilidade a recarga nas áreas suscetíveis a arenização.



#### **4.5 Valoração dos Serviços Ambientais Hídricos da arenização.**

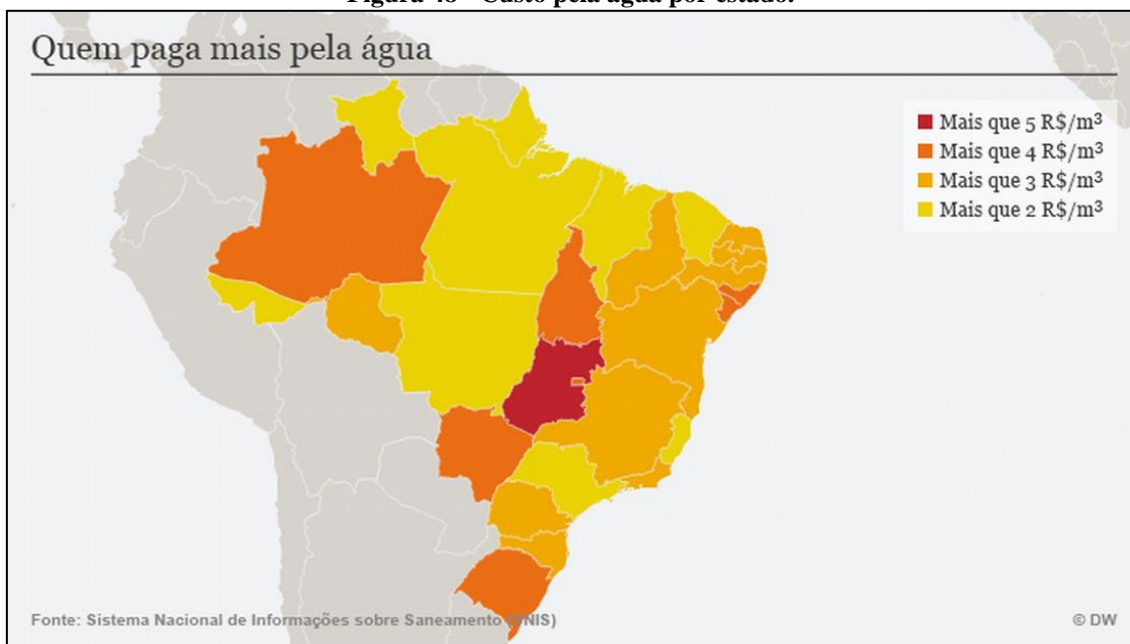
Considerando as taxas de condutividade hidráulica do areal, levantadas no subcapítulo 4.2, classificadas como Muito Rápida, interpreta-se que a arenização presta o serviço ambiental de favorecimento da infiltração, bem como a partir do mapeamento da favorabilidade de recarga, que aponta que 54,7 % das feições erosivas encontram-se nas áreas de muito alta favorabilidade, interpreta-se que eles prestem o serviço ambiental de favorecimento da recarga do aquífero.

Quanto à filtragem de água, ressalta-se que, em função do pacote sedimentar quaternário, associado à arenização, interpreta-se que a água que infiltra e recarrega o aquífero acaba sendo filtrada pela arenização, uma vez que os areais não possuem utilização intensiva, sendo manchas de areais expostas e pouco exploradas para fins comerciais.

Sendo assim, considerando os serviços apontados por Benett *et al.*, (2013) e Fidalgo *et al.*, (2017), os areais prestam os serviços de purificação da água; recarga de aquíferos; controle da poluição hídrica; melhoramento da qualidade da água; favorecimento da infiltração de água no solo e da recarga dos aquíferos; e regulação do fluxo hídrico.

De acordo com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) o custo pela água varia de acordo com os estados brasileiros. No ano de 2018, o estado de Goiás possuía o valor mais alto (5,19/m<sup>3</sup>) e o Pará o valor mais baixo (2,09/m<sup>3</sup>). No mapa da Figura 48, podem ser visualizados os custos por estado.

**Figura 48 - Custo pela água por estado.**



Quanto ao custo por região, destaca-se que a região Centro-Oeste é a que possui os maiores custos, seguida pela região Sul, enquanto no Norte os custos são menores. Além disso, os custos aumentaram 49 %, na região Sul, ao longo dos cinco anos do estudo realizado pelo IBGE (2017), conforme pode ser visualizado na Figura 49.

**Figura 49 – Custos com água nas regiões brasileiras entre 2013 e 2017**

**Tabela 7294 - Custo com água de distribuição e serviços de esgoto, por atividades econômicas e famílias**

**Variável - Custo com água de distribuição e serviços de esgoto (Reais por metro cúbico)**

Atividades econômicas e famílias - Total					
Grande Região	Ano				
	2013	2014	2015	2016	2017
Norte	1,48	1,50	1,44	1,67	1,92
Nordeste	1,43	1,58	1,62	1,85	2,13
Sudeste	2,38	2,44	2,56	2,94	3,17
<b>Sul</b>	<b>2,55</b>	<b>2,76</b>	<b>2,94</b>	<b>3,37</b>	<b>3,80</b>
Centro-Oeste	3,03	3,23	3,57	4,23	4,71

Fonte: IBGE - Contas Econômicas Ambientais da Água

Destaca-se, que a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), no ano de 2016, informava um custo de R\$ 0,002238/litro e o Serviço de Água e Esgoto Municipal (SEMAE), em São Leopoldo/RS, o custo era de 3,07/m<sup>3</sup> em 2020. Sendo assim, no Quadro 30 podem ser visualizados os valores identificados variando de 2,238/m<sup>3</sup> a 4/m<sup>3</sup>.

**Quadro 31 - Custos com água por litro e por m<sup>3</sup>.**

<b>Autor</b>	<b>Custo por litro</b>	<b>Custo por m<sup>3</sup></b>
Sabesp (2016)	R\$ 0,002238	2,238
IBGE (2017)	R\$ 0,003800	3,8
SNIS (2018)	R\$ 0,004000	4
SEMAE (2020)	R\$ 0,003070	3,07
Custo Médio	R\$ 0,003277	3,277

Por fim, cabe ressaltar que os custos levantados não especificam se o tratamento é realizado em água superficial ou subterrânea, pois os custos para estes tratamentos diferem, sendo o segundo mais caro. Além disso, não foi levado em consideração a localização das captações e a qualidade da água captada, pois os custos de tratamento são geralmente divulgados como custo médio global.

Considerando que os areias prestam o serviço de filtração da água que recarrega o aquífero, conforme o valor demonstrado deve-se levar em consideração o custo potencial de substituição dessa filtração, em termos monetários (TEEB 2010). Ao identificar os serviços de favorecimento da infiltração e de recarga, com a filtração da água em função do pacote sedimentar, valoraram-se estes serviços, utilizando o volume anual de água que recarrega identificado no subcapítulo 4.3, e a área mapeada com areais no subcapítulo 4.1 e a área de areais e ravinhas localizadas em área de recarga levantada no subcapítulo 4.4.

Os custos com a água foram identificados pelo levantamento expresso no Quadro 28, acima, sendo encontrado o custo médio de R\$ 3,277. Contudo, destaca-se que o valor se refere ao custo total que engloba todas as etapas (captação, tratamento completo e distribuição), enquanto para a tese faz-se necessária a identificação do custo com o tratamento completo<sup>19</sup> da água, sendo esta etapa responsável por 26% dos custos

<sup>19</sup> O tratamento convencional é acompanhado de filtração direta, o processo mais utilizado para tratamento de água no Brasil. Esse processo tem um custo considerável, pois consiste em todas as fases de

em uma Estação de Tratamento de Água (SILVA *et al.*, 2012; FRANCISCO e ARICA, 2018).

Sendo assim, foi aplicada a fórmula estipulada nos procedimentos metodológicos, utilizando o valor estimado de recarga anual de 14% da precipitação, transformando cada 1 mm em 1l/m<sup>2</sup> e a área de areais e ravinas localizadas nas classes de favorabilidade de recarga de 5.001,93 ha ou 50.019.300 m<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned} \text{VSA} &= \{[(1400 \times 14\%) \times 50.019.300] \times (0,003277 \times 26\%)\} \\ &\quad \{[196 \times 50.019.300] \times 0,00085202\} \\ \text{VSA} &= [9.803.782.800 \times 0,00085202] \\ \text{VSA} &= 8.353.019,021 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VSA} &= \{[(1900 \times 14\%) \times 50.019.300] \times (0,003277 \times 26\%)\} \\ &\quad \{[266 \times 50.019.300] \times 0,00085202\} \\ \text{VSA} &= [13.305.133.800 \times 0,85202] \\ \text{VSA} &= 11.336.240,10 \end{aligned}$$

Sendo assim, os areais foram valorados em R\$ 8.353.019,021/ano, considerando a precipitação de 1.400 mm e R\$ 11.336.240,10/ano com a precipitação de 1.900 mm, uma vez que a recarga estimada é anual, reiterando que os valores estão vinculados apenas aos serviços ambientais hídricos identificados na presente tese.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo da tese, expõem-se e valoriza-se a arenização, entendida e conceituada como um processo natural que pode ser gerado ou intensificado pelo inadequado manejo do uso e ocupação da terra. O debate acerca do processo de arenização inicia na década de 1980, sendo também caracterizada como “deserto” e “desertificação”, contudo, não pode ser assim caracterizado em função das dinâmicas pluviométricas do oeste e sudoeste do Rio Grande do Sul, que não são características de deserto, nem de regiões semiáridas ou subúmidas secas.

Destaca-se que a arenização consiste em um processo atuante nos sedimentos não consolidados quaternários, subprodutos das formações Guará e Botucatu, e que são retrabalhados pelas dinâmicas climáticas atuais, sobretudo pelas chuvas torrenciais e o agente eólico que expõem, transportam e depositam areia.

As feições erosivas podem ser encontradas em dez municípios do oeste e sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, possuindo um padrão de localização, associadas às cabeceiras de drenagem e as rampas arenosas, no contato entre os morros testemunhos e as coxilhas. Entretanto, não se expandem, mas sim, pulsam, ora se expandindo, ora se retraindo, de acordo com a ação dos agentes eólico e hídrico. Nesse sentido, como a área com arenização se mantém praticamente estável, afirma-se que elas prestam serviços ambientais contínuos, nas condições do clima atual.

Mesmo em se tratando de um processo natural, a arenização vem sendo concebida por alguns, como um processo de “degradação ambiental”, inclusive com a criação de políticas públicas pautadas em um discurso de “combate ou luta”, sobretudo pela inserção de monocultivos, especialmente, os arbóreos de eucalipto *sp.* Dentro deste contexto, em contraponto a esta maneira de se conceber a existência dos areais, considera-se que estes devem ser valorizados pelos serviços ambientais que eles prestam, sobretudo, nos principais eixos da temática, tais como: Sequestro de Carbono, Biodiversidade, Beleza Cênica e Água.

Dentro da presente tese, no eixo da água, foram pesquisados os Serviços Ambientais Hídricos, como aqueles relacionados à garantia, manutenção ou recuperação que protejam e conservem os processos hidrológicos. Contudo, os demais eixos podem ser estudados dentro da temática, contribuindo ainda mais para o conhecimento acerca do processo da arenização, destacando que diversos trabalhos científicos já foram

realizados na área de ocorrência da arenização, porém, não associados aos serviços ambientais/ecossistêmicos de forma direta, com a sua identificação e valoração.

No que tange aos Serviços Ambientais Hídricos, ressalta-se a relação locacional entre os focos de arenização e as áreas de recarga do SAG, destacando-se os serviços de infiltração, de filtragem e de recarga prestados pelos focos de arenização, sobretudo as ravinas e os areais, enquanto as voçorocas funcionam como áreas de descarga.

Quanto à atualização das feições erosivas-deposicionais, ressalta-se que pela primeira vez foram vetorizadas as feições de ravinas e voçorocas, sendo encontrada uma área de 1330,95 ha e 333,45 ha respectivamente, além da atualização dos areais, com área de 4.884,28 ha, sendo uma área menor (63,91 ha) em relação ao último mapeamento realizado no ano de 2011, corroborando a tese de que estes não se expandem, mas sim pulsam, com a área identificada de arenização não variando. Além disso, a localização das feições erosivas-deposicionais permitiu o cruzamento com as áreas favoráveis à recarga estipuladas pelos condicionantes do meio e cruzadas pelas técnicas de geoprocessamento.

No referencial teórico, foram identificados condicionantes do meio que favorecem a recarga, tais como a topografia plana e a baixa declividade; as áreas elevadas em relação às nascentes; das formações Guará e Botucatu, em função de se constituírem em formações arenosas delimitadas como áreas de recarga; os Neossolos Quartzarênicos órticos; Argissolos vermelhos e Latossolos. Estes condicionantes também estão associados à arenização, auxiliando na formulação da hipótese de que os areais favorecem a infiltração e recarga no SAG, prestando serviços ambientais à sociedade e, especificamente, aos produtores rurais localizados na área de estudo.

A metodologia de favorabilidade de recarga se mostrou compatível com a pesquisa. Destaca-se que existem outras técnicas que podem ser aplicadas, entretanto, as bases cartográficas não se mostram de fácil acesso e com bom detalhamento, limitando-se a mapeamentos com escalas menores de 1:250.000 a 1:750.000. Porém, entende-se que para sub-bacias as informações do meio podem ser produzidas, melhorando a acurácia dos mapeamentos.

Com o mapeamento realizado de favorabilidade de recarga, foi possível identificar que as feições erosivas se encontram vinculadas, sobretudo, à classe de muito alta favorabilidade de recarga (54,7%), corroborando o fato de que a arenização está associada à recarga do SAG.

A classe de muito alta favorabilidade foi definida a partir do cruzamento das informações do meio, tais como: geológicas, geomorfológicas e pedológicas, sendo as formações Guará e Botucatu, os relevos planos e as áreas elevadas em relação às nascentes determinantes para esta definição. Esta classe abrange 40,06 % das áreas suscetíveis à arenização.

As demais classes, alta e baixa favorabilidade, estão vinculadas às formações Botucatu e Guará, aos Latossolos e Argissolos Vermelhos, diferenciando-se da muita alta favorabilidade, em função das áreas com maior declividade das encostas dos relevos testemunhos e nos relevos dissecados no sul das áreas suscetíveis das bacias do rio Ibicuí e rio Quaraí. Além daquelas vinculadas às Formações Sanga do Cabral e Serra Geral, aos demais tipos de solos identificados como de baixa infiltração e recarga, bem como ao relevo próximo as calhas fluviais dos principais cursos d'água da área pesquisada. A classe de alta favorabilidade de recarga corresponde a 23,44% das áreas suscetíveis à arenização, sendo que a classe de baixa favorabilidade de recarga corresponde a 36,60%.

Para identificar e validar os serviços ambientais foi estimada a recarga nas áreas suscetíveis à arenização, através do método da Variação do Nível D'água, chegando ao valor de 14,37% da precipitação, que na área de ocorrência da arenização varia de 1.400 mm a 1.900 mm, conforme o período estudado. Destaca-se que este método se mostrou de fácil aplicação, considerando que o trabalho está vinculado a ciência geográfica, porém, existem outros métodos estimativos de recarga que também podem ser aplicados em pesquisas futuras, realizando comparações com os valores aqui encontrados, bem como podem ser testados outros métodos sobretudo nos poços em que o Nível Estático encontra-se mais profundo e cuja resposta é mais demorada em função da profundidade.

Além disso, os valores de recarga poderiam ser calculados por poço, sendo a valoração realizada de forma locacional e que contribuiria para uma primeira proposta metodológica de valoração por propriedade rural, até mesmo utilizando poços inseridos dentro das propriedades como parâmetros.

A condutividade hidráulica dos Neossolos Quartzarênicos órticos calculadas em um local com pastagem, variou de Moderadamente Rápida a Muito Rápida, e em um areal sem uso ou cobertura vegetal, foi Muito Rápida. Estes valores expressam o expressivo potencial de recarga dos aquíferos e o quanto estes sustentam a rede de drenagem regional.



Considerando que o cálculo foi realizado para obtenção de subsídios para a valoração dos serviços ambientais abre-se a hipótese de expansão e de aplicação desta metodologia em outros areais. A mesma pode ser aplicada em diferentes compartimentos da vertente geomorfológica dos areais, assim como nos leques de dejecção das ravinas, uma vez que durante a tese os testes foram aplicados nas áreas depressivas onde a água acumula naturalmente.

Considerando, que os areais e as ravinas se encontram nas áreas delimitadas como favoráveis a recarga e que estão associados às áreas de recarga do SAG e possuem altas taxas de infiltração. Além disso, em função do pacote sedimentar arenoso com pouco uso e ocupação da terra, a não ser pelo trânsito esporádico de gado, afirma-se que a arenização presta, conjuntamente, o serviço ambiental de favorecimento da recarga, da infiltração e da filtragem da água.

Considerando a metodologia utilizada para a valoração dos serviços ambientais, demonstrou-se o seu valor também pelo custo potencial de substituição em termos monetários, identificando e avaliando as suas implicações para a sociedade em geral e aos produtores rurais, sobretudo pela valorização dos Serviços Ambientais Hídricos, fundamentais para a vida, cuja provisão deve ser garantida para o presente e futuro nas mais variadas demandas hídricas.

Além disso, estimou-se o valor da arenização, considerando-a como um ecossistema, ao analisar a sua evolução espacial, quanto a sua localização, e temporal, frente à prestação de serviços de forma contínua, pois é um processo natural que possui um padrão locacional que não tem se modificado ao longo do tempo histórico, mas sim geológico.

Valorou-se que a arenização presta Serviços Ambientais Hídricos que variam de R\$ 8,3 e 11,3 milhões/ano, de acordo com as médias anuais de precipitação, criando assim subsídios que contribuem para a valorização da arenização e que poderão ser utilizadas para a formulação de políticas públicas vinculadas ao Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) aos produtores rurais.

O PSA se constitui em um instrumento onde poderá ser proposta uma transferência de renda aos produtores rurais, principalmente aos pequenos proprietários, que auxiliarem na recuperação e/ou manutenção da arenização, uma vez que a mesma foi valorada e se constitui em uma área sensível ambientalmente.

Para isto poderão ser criados programas de PSA, tanto no âmbito municipal, quanto estadual e federal que concatenem a preservação/conservação dos areais e a

manutenção da população local com incremento de renda, em uma lógica conservacionista que valorize a arenização e garanta a permanência da população no espaço rural.

Além disso, entendendo a arenização a partir dos serviços ambientais por ela prestados, vislumbra-se a possibilidade de demarcação das mesmas como áreas de reserva legal (RL), sobretudo pela funcionalidade ambiental que ela possui, vinculando-as aos programas de PSA.

Reitera-se, por fim, que a arenização possui sua gênese reconhecida como vinculada às dinâmicas da natureza, numa escala de tempo geológico, e também funciona como espaço geográfico de prestação de serviços ambientais diversificados, portanto, altera-se a genérica e errônea visão de que ela se trata meramente de uma “degradação ambiental”, provocada essencialmente pelos modelos de produção agrícola, desenvolvidos ao longo dos séculos. Ao contrário, é um processo natural, valorado na presente tese, e que deve ser valorizado, no contexto das atuais perdas hídricas crescentes, em termos de quantidade e qualidade, assim como àquelas que se projetam, como ainda mais drásticas, ao serem relacionadas às mudanças climáticas em marcha.

## 6. REFERÊNCIAS

AVALIAÇÃO ECOSISTÊMICA DO MILÊNIO. 2005. **Ecosystems and Human Well-being A Framework for Assessment**. Disponível em: <http://www.millenniumassessment.org/en/Framework.aspx>.

ANA (Agência Nacional das Águas). **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Agência Nacional das águas, Brasília - DF, 2005. 134 p.

ANA (Agência Nacional das Águas). **Curso EAD de Pagamento por Serviços Ambientais**. Núcleo de Educação à Distância, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2019.

ALMEIDA, R. B. G. **Análise de áreas mais propícias à recarga do sistema aquífero guarani na região hidrográfica do planalto de Lajes (SC)**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, DF, 2015.

ARAUJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. **Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai**. Mapas hidrogeológicos das formações Botucatu, Piramboia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. UFPR/PETROBRÁS, Curitiba, 16 pp. e anexos. 1995.

ARAUJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. **Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system**. USA. Hydrogeology Journal, 7(3): 317-336. 1999.

AUZANI, G.M. **Uso da terra e caracterização hidropedológica na Região da Vila Kramer, São Francisco de Assis – RS**. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais. Programa de Pós Graduação em Ciências do Solo, Santa Maria, 2010.

AZEVEDO, A. C.; PEDRON, F. de A.; DALMOLIN, R. S. D. A evolução da vida e as funções do solo no ambiente. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. v. 5. Viçosa: SBCS, 2007. p. 1 - 48.

BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; ELRICK, D. **A simplified Falling-Head Technique for Rapid Determination of Field-Saturated Hydraulic Conductivity**. Soil Science Society of America, Madison, p. 66-73, 2004.

BARRETO, C.E.A. G. **Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. 2006. 271 f. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BAUM, C.A.; MANCUSO, M.A.; FRITZEN, R.R. **Aplicação do método WTF no estudo da variabilidade da recarga em Aquífero Urbano**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 37, n.1, p.85-95, 2018.

BELLANCA, E. T. **Uma contribuição para a explicação da gênese dos areais do sudoeste do Rio Grande do Sul**. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geografia. Porto Alegre, 2002. 100 p.

BELLANCA, E. T.; SUERTEGARAY, D. M. A. **Sítios Arqueológicos e Areais na Sudoeste do Rio Grande do Sul**. Mercator, Fortaleza, v. 4, p. 99-114, 2003.

BENCKE, G. A. Biodiversidade. In: CHOMENCO, L.; BENCKE, G. A. (Org.). **Nosso Pampa desconhecido**. Porto Alegre: Fundação Zoobotânica do Rio Grande do Sul, 2016. p. 6375.

BENNETT, G.; CARROLL, N.; HAMILTON, K. **Charting new waters: state of watershed payments 2012**. Washington, DC: Forest Trends, 2013.

BENSUSAN, N. **Seria melhor ladrilhar?** Biodiversidade como, para quê, 2. Ed. Brasília, DF: Ed. UnB: Instituto Internacional de Educação do Brasil, 2008. 439 p.

BINDA, A.L. **Eventos hidrológicos extremos e morfodinâmica fluvial em área afetada por processos de arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul – Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu**. 293 f. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, 2016.

BORN, R. H., TALOCCHI, S. **Proteção do capital social e ecológico: Por meio de Compensações por Serviços Ambientais (CSA)**. São Paulo: Petrópolis; São Lourenço da Serra, SP: Vitae Civilis, 2002.

BRAUMAN, K. A.; *et al.* **The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services**. Annual Review of Environment and Resources, v. 32, p. 67-98, 2007.

BORTOLIN, T.A. **Estudo da recarga do Sistema Aquífero Serra Geral na bacia hidrográfica Taquari-Antas**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

BRINK, P. *et al.*, **La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad relativa al agua y los humedales**. Resumen ejecutivo, 2013.

BRACK, C.L. **Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest.** Environmental Pollution, 116: 195-200, 2002.

CAMPANHA, M.M. *et al.*, Serviços ecossistêmicos: histórico e evolução. In: FERRAZ, *et al.*, **Marco referencial em serviços ecossistêmicos.** Brasília, DF: Embrapa, 2019. 160p.

CAMPONOGARA, I. **Vulnerabilidade natural no sistema Aquífero Guarani e análise de parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas em Quaraí, BR e Artigas, UY.** 2006, 110f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2006.

CANEPPELE, J.C.G. **Pagamento de Serviços Ambientais aos produtores rurais de Esperança do Sul/RS.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia). Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CANEPPELE, J.C.G. **Especialização da arenização a partir da Ecodinâmica e da Cartografia Ambiental.** 129 f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, 2017.

CESAR, H.S.J.; VAN BEUKERING, P.J.H. **Economic valuation of the coral reefs of Hawaii,** Pacific Science, 58 (2): 231-242. 2004.

CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **II Plano de Desenvolvimento Integrado do Noroeste Mineiro: Recursos Naturais.** Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. 1981.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial.** São Paulo: Edgard Blücher, 1981. 313p.

COELHO, V.H.R.; ALMEIDA, C. das N.; SILANS, A.M.B.P. **Análise da flutuação do nível d'água para estimativa de recarga subterrânea da bacia representativa do Rio Grande do Norte no nordeste brasileiro.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos Vol. 17 n.2 Abr./Jun., p. 241 – 252, 2012

COELHO NETTO, A.L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (Orgs.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** 10.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. p.93-148.

CONSEMA, Conselho Estadual do Meio Ambiente Rio Grande do Sul, **Zoneamento Ambiental para a atividade de silvicultura no RS.** Porto Alegre, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Hoessler, 2010. Disponível em: [http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/zoneam\\_silvic.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/zoneam_silvic.asp).

COSTANZA, R., D'ARGE, R., DE GROOT, R., FARBER, S., GRASSO, M., HANNON, B., *et al.*, **The value of the world's ecosystem services and natural capital**. *Nature* 15 (387), 253–260, 1997.

CORBONNOIS, J. *et al.*, **L'intensification des pratiques agricoles et la mobilisation des ressources naturelles dans La Pampa du Sud du Brésil**. *VertigO: la revue électronique en sciences de l'environnement*, v. 14, p. 1, 2014.

CPRM. Serviço Geológico Brasileiro. **Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul**. 2006. Escala: 1:750.000. Disponível em: Acesso em: 27 junho de 2019.

CPRM. Serviço Geológico Brasileiro. **Relatório Diagnóstico Sistema Aquífero Guarani no estado do Rio Grande do Sul** – Bacia Sedimentar do Paraná. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Volume 16, 32 p, 2012.

CRAVE, A. & GASCUEL-ODOUX, C. **The Influence of Topography on Time and Space Distribution of Soil Surface Water Content**. *Hydrological Processes*, 11: 203-210, 1997.

DAILY GC. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island, 1997.

DE NARDIN, D. **Zoneamento Geoambiental no Oeste do Rio Grande do Sul: Um estudo em bacias hidrográficas**. 2009. 230 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Geografia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2009.

DUARTE, S. J. **Variabilidade espacial do solo em sistema plantio direto estabilizado**, 2015. 73 f. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.

DUMMER, Juliana. **Aspectos litológicos, pedológicos e tectônicos, associados aos processos erosivos, na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu**. 2019. 123 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Geografia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS – BR, 2019

ERLICK, D.E.; REYNOLDS, W.D. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. **Ground Water Monitoring Remediation**, Amsterdam, p. 194-196. Jun. 1989.

ELRICK, D.E.; REYNOLDS, W.D. Methods for analyzing constant-head well permeameter data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 320-323 Feb, 1992.

EMERTON, L. *et al.*, **The present economic value of Navikubo urban wetland, Uganda**. IUCN, Eastern África Regional Office, Nairobi and National Wetlands Programme, Wetlands Inspectorate Division, Ministry of Water, Land and Environment, Kampala, 1999.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2 ed. 2000. 404 p.

FIDALGO, E.C.C *et al.*, **Manual para pagamentos de serviços ambientais hídricos: seleção de áreas e monitoramento**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The State of Food and Agriculture - Paying Farmers for Environmental Services**. FAO Agriculture Series, n. 38. Rome: FAO, 2007.

FRANCISCO, L.E.S.; ARICA, G.M. **Contribuição para análise dos custos no tratamento da água utilizando programação linear fuzzy: um modelo para o gerenciamento do abastecimento do município de Campos (RJ)**. Eng. Sanit Ambient | v.23 n.4 | jul./ago. 2018 | 655-664.

FREITAS, E.M. **Arenização e fitossociologia da vegetação de campo no município de São Francisco de Assis, RS**. 142 f. Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS – BR, 2006.

\_\_\_\_\_ **Campos de solos arenosos do sudoeste do Rio Grande do Sul: Aspectos florísticos e adaptativos**. 171f. Tese (doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Botânica. Instituto de Biociências. Porto Alegre, RS – BR, 2010.

GALLAI, *et al.*, **Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline**. Ecological Economics. Vol. 68(3): 810-821. 2009.

GASS, S. L. B. *et al.*, **Os areais do sudoeste do Rio Grande do Sul, Brasil, como patrimônio geomorfológico**. In: III Encontro Luso-Brasileiro de Patrimônio Geomorfológico e Geoconservação, 2019, Guimarães. A geoconservação no contexto do antropoceno: desafio e oportunidades. Guimarães: CEGOT, 2019. p. 83-83., 2019.

GOMES, Marco Antônio Ferreira *et al.*, **Caracterização das Áreas de Afloramento do Aquífero Guarani – Base para uma proposta sustentável**. Jaguariúna-SP 2006.

GOMES, L. H. **Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do ribeirão da onça em zona de afloramento do sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). São Carlos, 2008.

GUASSELLI, L. A.; ANDRADES FILHO, C. O.; SUERTEGARAY, D. M. A. **Atualização do mapeamento dos areais do sudoeste do RS, através de imagens Landsat TM.** In: SIG-SUL 2005 Simpósio Integrado de geotecnologias do Cone Sul, 2005, Canoas. Anais do SIG-SUL 2005 Simpósio Integrado de geotecnologias do Cone Sul, 2005.

GUASSELLI, L. A. *et al.*, **Macrozoneamento do estado do Rio Grande do Sul.** In: Pesquisa em Geociências. Porto Alegre, RS, v. 33, n. 1, p. 3-11, 2006.

GUASSELLI, L.A.; SUERTEGARAY, D.M.A.; OLIVEIRA, M.G.; SIRANGELO, F.; EVERS, H. **Relação entre a ocorrência de areais e os arenitos da Formação Botucatu e Guará, no sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil.** VII Simpósio Nacional de Geomorfologia. Recife: UFPE/PPGEO, 2010. 13p

GUASSELLI, L.A. **O mapeamento dos areais a partir de sensoriamento remoto.** In: SUERTEGARAY, D.M.A.; SILVA, L.A.P. da; GUASSELLI, L. A. Arenização: natureza socializada. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2012. p. 97-123.

GREHS, S.A.; MENDES, C.A.B. **Aquífero Guarani: Uma concepção simplista e enganadora.** In: Conselho em Revista –CREA. n° 40, p.29. Porto Alegre, 2005.

HASENACK et. al. 2010. **Mapa de sistemas ecológicos da ecorregião das savanas uruguaias.** Porto Alegre: Centro de Ecologia UFRGS e TNC.

HEALY, R.W. **Estimating groundwater recharge.** Cambridge , 2010

HEALY, R. W.; COOK, P. G. **Using groundwater levels to estimate recharge.** Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p 91-109. Springer-Verlag, Berlin. 2002.

HELLIWELL D. R. (1969) **Valuation of wildlife resources,** Reg. Studies 3, 1–7.

HERMANN, A.; SCHLEIFER, S.; WRBKA, T. **The concept of ecosystem services regarding landscape research: a review.** Living Reviews in Landscape Research, v. 5, p. 1-37, 2011. DOI: 10.12942/lrlr-2011.

JABUR, I.C. **O Grupo São Bento no Rio Grande do Sul.** Boletim de Geografia, Maringá, Ano 3, n.3, p.109-152, 1985.

JOHNSON, A.L. **Specific yield – compilation of specific yields for various models.** US Geological Survey Water Supply, Paper, 1662-D, 74p, 1969.



JORGENSEN, D.G. *et al.*, **Aquifer Systems underlying Kansas, Nebraska and parts of Arkansas, Colorado, Missouri, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas and Wyoming-Geohydrologic framework**: U.S Geological Survey, Professional Paper, 238 p. 1993.

KAUFFMANN, C.; PACHECO, L. A. *et al.*, **Avaliação da atividade leishmanicida in vitro de espécies da família Myrtaceae, nativas do sul do Brasil**. Revista Destaques Acadêmicos, Lajeado, v. 9, n. 3, p. 246258, 2017a.

KAUFFMANN, C.; ETHUR, E. M. *et al.*, **Chemical Composition and Evaluation Preliminary of Antileishmanial Activity in vitro of Essential Oil from Leaves of Eugenia pitanga**, A Native Species of Southern of Brazil. Journal of Essential OilBearing Plants, v. 20, n. 2, p. 559569, 2017b.

KAUFFMANN, C.; SOARES, A. P. V. *et al.*, **Potencial antimicrobiano e antibiofilme in vitro de espécies do gênero Eugenia**, Myrtaceae, nativas do sul do Brasil. Revista Caderno Pedagógico, Lajeado, v. 14, n. 2, p. 110127, 2017c.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. 431 p.

KING, F. H. **Principles and conditions of movements of ground water**. USGS 19th Annual Report, Part 2, 1899.

KLAMT, E.; SCHENEIDER, J.A.A. **Solos suscetíveis à erosão eólica e hídrica na região da Campanha do Rio Grande do Sul**. Ciência & Ambiente, Santa Maria, n. 11, p. 71-80, jul./dez. 1995.

KUHN, D. *et al.*, **Antibiofilm activity of the essential oil of Campomanesia aurea O. Berg** against microorganisms causing food borne diseases. LWT Food Science and Technology, v. 108, p. 247-252, 2019.

KRUSEMAN, G. P. & RIDDER, N. A. **Analysis and Evaluation of Pumping Test Data**. 2<sup>a</sup> ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement - ILRI. Amsterdam, Holanda, 2000. 372p.

LANDELL-MILLS, N. e PORRAS, I.T. **Silver bullet or fools' gold?** A global review of markets for forest environmental services and their impact on the poor. International Institute for Environment and Development (IIED), London, 2002.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2000.

LEOPOLD, L.B. **Rivers**. American Scientist, v.50, n.4, p. 511-537, 1960.

LERNER, D. N. **Groundwater recharge in urban areas**. Atmos. Environment, 24 B(1), p. 29-33, 1990.

MACHADO, J.L.F. **Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigrafico do Sistema de Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 237p. Tese (doutorado), Programa de Pós-graduação em Geologia, Unisinos, 2005.

MACHADO, J.L.F.; FREITAS, M.A. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul – CPRM**. Porto Alegre, 2005.

MACIEL FILHO. **Introdução à Geologia de Engenharia**. 3 ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2008.

MAINGUET, M. **Desertification natural background and Human mismanagement**. 2 nd edition. Springer-Verlag. Berlin, 1994.

MARTELLI, G. V. **Monitoramento da flutuação e recarga dos níveis da água subterrânea em áreas com exploração das águas superficiais e subterrâneas**. Santa Maria, Dissertação (mestrado), PPGEC, UFSM. 2012.

MATTOS, L.; ROMEIRO, A.R.; HERCOWITZ, M. Capital Social e controle social na gestão de políticas públicas. In: NOVION, H.; VALLE, R. do, **É pagando que se preserva? Subsídios para políticas de compensação por serviços ambientais**. São Paulo, Instituto Socioambiental, 2009, p. 103 a 117.

MAZIERO, T. A. **Monitoramento de água subterrânea em área urbana: aspectos quantitativos**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2005.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. **Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP**. In: XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. 2005.

MERICO, L. F. K. **Economia e sustentabilidade**, o que é, como se faz. São Paulo: Edições Loyola. 2ª Edição, 2009.

MILANI, E.J. *et al.*, **Bacia do Paraná**. Boletim de Geociências, Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 15, n.2, p. 265-287, 2007.

MOORE, I.D., *et al.*, **Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications**. Hydrological Processes, Vol.5, No.1. 1991.

MORELLI, L.A.S. **A monocultura do eucalipto e a monopolização do território na metade sul do Rio Grande do Sul**. 2011. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós Graduação em Geografia, Porto Alegre, 2011

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, n.11, p. 49-83, 1961.

MÓSENA, M. **Agricultura em áreas frágeis: as transformações decorrentes do processo de arenização em São Francisco de Assis/RS**. 2006. 143 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural) – Programa de pós-graduação em Desenvolvimento Rural, Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MÜLLER FILHO, I. L. **Notas para o estudo da geomorfologia do estado do Rio Grande do Sul**, Brasil. Departamento de Geociências, UFSM, Publicação Especial n. 1, Santa Maria, 1970.

MULLER, J. **Funções e serviços ecossistêmicos no Parque Nacional da Lagoa do Peixe: repensando conceitos e indicadores para conservação da biodiversidade em sítio Ramsar do sul do Brasil**. Ponta Grossa – PR: Atena, 2022

MUÑOZ-PIÑA, C. *et. al.* **Paying for the Hydrological Services of Mexico's Forests: Analysis, Negotiation, and Results**, Ecological Economics, 65 (4): 725-736, 2008.

NARDY, A.J.R. **Geologia e petrologia do vulcanismo mesozoico da Região Central da Bacia do Paraná**. Tese (Doutorado em Geologia). Rio Claro: IGCE-UNESP, 1996. 316p.

NARDY, A.J.R.; *et al.*, **Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral**. Geociências, São Paulo, v.21, n. 1/2, p.15-32, 2002.

NARDY, A.J.R.; MACHADO, F.B.; OLIVEIRA, M.A.F. **As rochas vulcânicas mesozoicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas**. Revista Brasileira de Geociências, v.38, n.1, p.178-195, mar. 2008.

OKIDO, R. **Paisagens em transformação: da técnica à percepção. Estudo sobre o avanço da lavoura de grãos dos municípios de São Francisco de Assis e Manoel Viana**. 2016. 162f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Geografia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS-BR, 2016.

OLIVEIRA, D.B.C; SOARES, W.A; HOLANDA, M.A.C.R. **Análise de Desempenho de Modelos de Infiltração Unidimensional de Água no Solo**. Revista de Águas subterrâneas, v. 32, n.2, p 35-42, 2018.

OLIVEIRA, M.G.; *et al.*. **Áreas suscetíveis à dinâmica da arenização**: bacia hidrográfica do rio Ibicuí RS/Brasil. In: XVI Jornadas de Jóvenes Investigadores de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo. Montevideo. Anais, 2008.

OLIVEIRA, M.G. **Análise morfopedológica da Bacia Hidrográfica do Arroio Inhacundá (RS)**. 2015. 211f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Geografia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

PILLAR, V. P.; ANDRADE, B. O.; DADALT, L. Serviços ecossistêmicos. In: PILLAR, V. P.; LANGE, O. (Eds.). **Os Campos do Sul**. Porto Alegre: UFRGS Rede Campos Sulinos, 2015. p. 115-119.

PINTO, E. J. *et al.*, **Estimativa da recarga natural do aquífero livre de uma sub-bacia da bacia representativa de Juatuba (MG) aplicado o método da variação dos níveis d'água (VNA)**. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. São Luís – MA, 2010

PIRES DA SILVA, L.A. **Narrativas das percepções e conectividades de caminhantes nas paisagens dos areais pampeanos**: perspectivas ambientais para a geração de ambiências, 2008, 154f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, 2008.

PÓLIS I. 2008. **Atlas do Meio Ambiente**. In. Le Monde Diplomatique Brasil São Paulo, pp. 80-81

PRESS, F. *et al.*, **Para entender a Terra**. 4. Ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2006

REBOUÇAS, A.C. 1974. **Recursos hídricos da Bacia do Paraná**. São Paulo, SP. Tese de Livre Docência. IGC/USP, 143 p.

RENNÓ, C. D. SOARES, J. V. **Uso do Índice Topográfico como Estimador da Profundidade do Lençol Freático**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, 2003, Belo Horizonte. Anais: 2579-2588. INPE, São José dos Campos. 2003.

REYNOLDS, W.D. Measuring soil hydraulic properties using a cased borehole permeameter: steady flow analyses. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 9, p. 637-652, Aug, 2010.

RIBEIRO, J. C. C., & Verdum, R. (2013). **Arenização, silvicultura e políticas ambientais no sudoeste do Rio Grande do Sul.** *GEOgraphia*, 15(29), 77-98.

RIBEIRO, J.C.C. **Discurso e construção do imaginário acerca dos areais nas políticas voltadas à arenização no sudoeste gaúcho.** 2015. 223 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

RIBEIRO, J.C.C.; VERDUM, R. Políticas públicas e construção de um imaginário favorável à instalação da silvicultura sobre os areais do sudoeste gaúcho. In: REGO, N.; AZEVEDO, A.F. **Geografia e (in) visibilidades: paisagens, corpos e memórias.** Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2017. P. 244-272.

ROBAINA, L.E.S. *et al.*, **Zoneamento morfolitológico da bacia hidrográfica do rio Ibicuí e sua relação com processos superficiais e o uso do solo.** Revista Brasileira de Geomorfologia, São Paulo, v.16, n.1, p.63-77, jan./mar. 2015.

ROCHA, G.A. **O Grande Manancial do Cone Sul.** Estudos Avançados, São Paulo, v. 11, n° 30, p. 191-212, 1997.

RODRIGUES, A.M. Problemática Ambiental - **Agenda política: espaço, território, classes sociais.** São Paulo: Boletim Paulista de Geografia – “Perspectiva Crítica” - n° 83. Associação dos Geógrafos Brasileiros (AGB-SP). 2005, p. 91 a 110.

ROSA DO CARMO, J.A. **Recarga subterrânea direta e sua influencia sobre a temperatura e a condutividade elétrica em microbacias do rio Vacacaí-mirim, RS/** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, 2014.

ROSSATO, M.S. **Os climas do Rio Grande do Sul:** variabilidade, tendências e tipologia. 240 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, 2011.

ROSSATO, M.S. O clima no sudoeste do Rio Grande do Sul In: SUERTEGARAY, D.M.A.; SILVA, L.A.P. da; GUASSELLI, L.A. **Arenização: natureza socializada.** Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2012. p. 385-411.

ROVEDDER, A.P.M. **Potencial do *Lupinus albescens* Hook. & Arn. Para a recuperação de solos arenizados do Bioma Pampa.** 145 p. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Santa Maria, BR-SP, 2007.

RUDOLF S. de G., MATTHEW A. W., ROELOF M.J. B. **A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services** - Ecological Economics 41(2002) 393-408.

SARTORI, A.; NETO, F.L.; GENOVEZ, A.M. **Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos** - Parte 1: Classificação. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, p. 5-18, out./dez. 2005

SANCHES, F. de O. **Os areais do sudoeste do Rio Grande do Sul: estudo sobre as chuvas no Século XX e um possível cenário para o Século XXI**. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS, 2013. 205 p.

SCHERER, C.M.S.; FACCINI, U.F.; LAVINA, E.L. **Arcabouço estratigráfico do Mesozoico da Bacia do Paraná**. In: HOLZ, M.; DE ROS, L.F. (Eds.). Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: CIGO/UFRGS, 2000. p.335-354

SCOPEL, I. *et al.*, Neossolos Quartzarênicos órticos das áreas de areais do Sudoeste do Rio Grande do Sul: Características físicas e morfológicas. In: SUERTEGARAY, D.M.A.; SILVA, 125 L.A.P. da; GUASSELLI, L. A. **Arenização: natureza socializada**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2012. p. 503-540.

SCOPEL, I. **Comparação entre solos sob arenização no sudoeste de Goiás e no sudoeste do Rio Grande do Sul**. Relatório de Pós Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

SIRANGELO, F. **Shapefiles dos areais**. (não publicado).

SIRANGELO, F. **Análise da atividade de silvicultura em relação aos areais, com base nas restrições estabelecidas no Zoneamento Ambiental para a UPN PC3**, no sudoeste do RS. Porto Alegre. 53p. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SILVA, D.L.M. **Microclima e bioindicadores paleoclimáticos em paisagens com ocorrência de areais em São Francisco de Assis, RS, Brasil.**, 2009. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, 2009.

SILVA, L.; LUCAS, H.; TEIXEIRA, M.R. **Avaliação econômica preliminar da nanofiltração na remoção de cianotoxinas em água naturais**. *Sapientia*, 2012.

SILVA, L. A. P.; CANEPPELE, J. C. G.; GASS, S. L. B.; VERDUM, R. Arenização e a valorização como patrimônio geomorfológico, paleontológico e ambiental. In: Souza, B. CUNHA, L.; JACINTO, R.; SUERTEGARAY, D. M. A. (Org.). **Diálogos Temáticos e (Trans)territoriais**. 1ed. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2021, v. 1, p. 153-17

SILVA, L. L. *et al.*, **Anesthetic activity of Brazilian native plants in silver catfish** (*Rhamdia quelen*). *Neotropical Ichthyology*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 443-451, 2013.

SIMON, F.W. **Estimativa de recarga do Aquífero Guarani na bacia do Rio Ibicuí (RS), com base na aplicação do método de variação dos níveis de água**. 2014. 68p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SIMON, F.W.; REGINATO, A.R.; KIRCHEIM, R.E.; TROIAN, G.C. **Estimativa de recarga do Sistema Aquífero-Guarani por meio da aplicação do método da variação da superfície livre na bacia do Rio Ibicuí/RS**. *Água subterrâneas* (2017) 31 (2). 12-29.

SOARES, A.P. **Variabilidade espacial no sistema Aquífero Guarani: Controles estratigráficos e estruturais**. 2008. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2008.

SOARES, A.P.; SOARES, P.C.; HOLZ, M. **Correlações conflitantes no limite Permo-Triássico no o contato entre duas superseqüências e implicações na configuração espacial do Aquífero Guarani**. *Pesquisas em Geociências (UFRGS)*, v. 35, p. 115-133, 2009.

SOUTO, J. J. P. **Deserto, uma ameaça?** Estudos dos núcleos de desertificação na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura - Diretoria Geral, 1985.

SOUZA, E.R., FERNANDES, M.R. **Sub-bacias hidrográficas: unidades básicas para o planejamento e a gestão sustentáveis das atividades rurais**. *Informe Agropecuário. Manejo de Microbacias*. v. 21, n. 207, p. 15-20, nov/dez. 2000.

SOUZA, F. A.; RODRIGUES, S. C. **Estimativa de recarga do lençol freático em solos sobre granito e gabros alcalinos na alta bacia do rio dos Boies m Iporá – GO**. *Ambiência*, v.10, n.2, 2014

SOUSA, L.R.; MONTEIRO, S.J.; SILVA, W.O. **Tratamento de água para abastecimento** Universidade Regional do Cariri. CCT. Juazeiro do Norte, Ceará. 2012.

STRECK, V.; *et al.*, **Solos do Rio Grande do Sul**. 2ª ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222p

STÜRMER, S.L.K. **Infiltração de água em Neossolos Regolíticos do rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul**. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

SUERTEGARAY, D.M.A. **A trajetória da natureza: um estudo geomorfológico sobre os areais de Quaraí - RS.** 1987. 243 f. Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, São Paulo, BR-SP, 1987.

SUERTEGARAY, D.M.A.; MOURA, N.S.V.; NUNES, J.O.R. **São Francisco de Assis e Alegrete: Uma análise geomorfológica da ocorrência de Areais.** In: Simpósio de geografia física aplicada, 1989. Nova Friburgo: Nova Friburgo, 1989.

SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A.; MARTINS, G. **Mapeamento e Cálculo de Área dos Areais (SW do RS) através de imagens Landsat TM5, para fins de monitoramento.** In: VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1993, Curitiba, 1993. v. 3. p. 323-331.

SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A. **Land Use And Expansion/Retraction Of Desertified Areas In The Southwest of Rio Grande do Sul.** Brazil. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, INPE. São Paulo, v. 30, p. 159-163, 1994.

SUERTEGARAY, D.M.A. **Desertificação no Brasil.** Causa Antrópica ou Natural? 5º Congresso Brasileiro de Geógrafos, Anais. UFPR, Curitiba, 1994.

SUERTEGARAY, D.M.A.; VERDUM, R.; GUASSELLI, L.A. (orgs.). **Atlas da Arenização, Sudoeste do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Secretaria da Coordenação e Planejamento e Secretaria de Ciência e Tecnologia, Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 85p. 2001.

SUERTEGARAY, D.M.A.; VERDUM, R. **Desertification in the tropics.** In: UNESCO. (Org.). Encyclopedia of life support systems (EOLSS). Paris: UNESCO Publishing, 2008.

SUERTEGARAY, D.M.A. Areais e a Arenização no contexto geográfico. In: SUERTEGARAY, D.M.A.; SILVA, L.A.P. da; GUASSELLI, L.A. **Arenização: natureza socializada.** Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2012. p. 41-72.

SUERTEGARAY, D.M.A. Arenização: análise morfogenética. In: SUERTEGARAY, D.M.A.; SILVA, L.A.P. da; GUASSELLI, L.A. **Arenização: natureza socializada.** Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2012. p. 127-172.

SUERTEGARAY, D.M.A.; SILVA, L.A.P. da; GUASSELLI, L.A. **Arenização: natureza socializada.** Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2012. 597 p.

SUERTEGARAY, D.M.A. **Arenização: esboço interpretativo.** William Moris Davis: Revista de Geomorfologia, v.1 n.1, Sobral, 2020. p.188-144.



SUGUIO, K.; BIGARELLA, J.J. **Ambientes fluviais**. 2.ed. Florianópolis, Editora da UFSC/UFPR, 1990. 183p.

TEEB. **A economia dos Ecossistemas e da Biodiversidade**: Integrando a Economia da Natureza. Uma síntese da abordagem, conclusões e recomendações do TEEB. 2010.

TEEB, 2010. In: Pushpam, K. (Ed.), **The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations**. Earthscan, London and Washington. <http://www.teebweb.org/our-publications/teeb-study-reports/ecological-and-economic-foundations/>.

TEIXEIRA FILHO, A.; WINCKLER, L.T. **Anais do I Congresso sobre o Bioma Pampa**: Reunindo saberes. Editora: UFPel, Pelotas, 2020.

TEIXEIRA, W. TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R. *et al.*, (orgs). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000.

TEJEIRO, G.. STANTON. M.; LAVRATTI, P. **Sistemas Estaduais de Pagamento por Serviços Ambientais**: Diagnóstico, lições aprendidas e desafios para a futura legislação. São Paulo: Instituto O Direito por um Planeta Verde, 2014; 157 p.

TRAININI, D.R. **A influência da Neotectônica no assoreamento de Bacias**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa, ABRH, CD-ROM. 2005.

TRINDADE, J.P. **Processos de Degradação e Regeneração da Vegetação Campestre do Entorno dos Areais do Sudoeste do Rio Grande do Sul**. 161 f. Tese (doutorado), (2003). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós Graduação em Zootecnia, Porto Alegre, 2003.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L.E.S.; SCCOTI, A.A.V. **Determinação dos litótipos aflorantes na bacia hidrográfica do rio Ibicuí/RS**. Geografia Ensino & Pesquisa, Santa Maria, v.19, n.2, p.75-90, maio/ago. 2015.

TÓTH, J. 1963. **A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins**. J Geophys Res 68:4795–4812

TORNQUIST, C.G.; BAYER, C. Serviços ambientais: oportunidades para a conservação dos campos sulinos. In: PILLAR *et al.*, **Campos sulinos**: conservação e uso sustentável da biodiversidade. Brasília: MMA, 2009.

VASCONCELOS, V.V.; JUNIOR, P.P.M.; HADAD, R.M. **Cartographic methodology for assessing aquifer recharge potential**: a case study of the Paracatu river basin Brazil. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais 8(2): 153-176, 2013.

VASCONCELOS, V.V. Recarga de aquíferos: subsídios à gestão hídrica e ambiental – Bacia do Rio Paracatu - SF7. (Tese de Doutorado). Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais. 2014.

VERDUM, R. **L'approche géographique des deserts dans les communes de São Francisco de Assis et Manuel Viana - RS - Brésil.** (Tese de Doutorado). Toulouse: Université de Toulouse Le Mirail, 1997.

VERDUM, R. Técnicas de avaliação e controle de processos erosivos. In: SUERTEGARAY, D.M.A.; VERDUM, R.; GUASSELLI, L.A. (orgs.). **Atlas da Arenização, Sudoeste do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Secretaria da Coordenação e Planejamento e Secretaria de Ciência e Tecnologia, Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2001, p. 78-80.

VERDUM, R. Descoberta permanente: das areias aos areais. In: SUERTEGARAY, D.M.A.; SILVA, L.A.P. da; GUASSELLI, L. A. **Arenização: natureza socializada.** Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2012. p. 73-83.

VERDUM, R. Repercussões na paisagem: da arenização à monocultura arbórea na depressão periférica/RS. In: SUERTEGARAY, D.M.A.; SILVA, L.A.P. da; GUASSELLI, L. A. **Arenização: natureza socializada.** Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2012. p. 451-464.

VERDUM, R.; VIEIRA, C.L.; DAL PIVA, F.; CANEPPELE, J.C.G. **Estruturas superficiais no entorno dos areais de Quaraí/RS** – identificação dos agentes morfogênicos e sua relação com as variações climáticas no quaternário. Revista GEONORTE, Edição Especial 4, V.10, N.4, p. 54-59, 2014.

VERDUM, R. *et al.*, Os Mitos e as Realidades dos Areais no Pampa Gaúcho. In: SUERTEGARAY, D.M.A.; SOUZA, I.A.S. (Org.). **Brasil: Feições arenosas.** 1ed. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2020, v. 1, p. 13-27.

VIEIRA, C.L. **Emprego de técnicas mecânico-vegetativas em ravinamento no areal em São Francisco de Assis – sudoeste do Rio Grande do Sul.** Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geografia. Porto Alegre, 2012. 164 p.

VIEIRA, C.L.; GOULART, A.G.; SILVA, T.M.; VERDUM, R. **Emprego do capim Vetiver para o controle da erosão e cobertura do solo nos areais do sudoeste do estado do RS, Brasil.** In: Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade, 2016, Três Rios, RJ. Anais do 5º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade. Três Rios: UFRRJ - ITR, 2016. v. 1. p. 1-701.

VIEIRA, C.L, **Caracterização Geomorfológica, análise ambiental integrada e avaliação do potencial de resiliência em solos arenosos do sudoeste do RS.** Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências da Matemática e da Natureza, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia. 2018. 291 p.

VIEIRA, L.F.S. **A valorização da Beleza Cênica da Paisagem do Bioma Pampa do Rio Grande do Sul: proposição conceitual e metodológica.** Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre: UFRGS, 2014.

VIEIRA, L. F. S.; VERDUM, R. A paisagem como leitura da beleza cênica, organização e o uso do espaço rural do Pampa. In.: MEDEIROS, R. V.; LINDNER, M. (org.) **Dinâmicas do espaço agrário: velhos e novos territórios:** NEAG 10 anos. Porto Alegre: Evangraf, 2017, 368 p. il.

VIEIRA, L. F. S.; VERDUM, R. **A Proteção da Natureza e do Patrimônio da Humanidade pela Beleza Cênica da Paisagem.** CONFINS (PARIS), v. 2019, p. 1-18, 2019.

VIEIRA, L.F.S. *et al.*, **Os areais como patrimônio geomorfológico:** um ensaio para os caminhos da geodiversidade no sudoeste do estado do Rio Grande do Sul. In: XIII SINAGEO Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2021, Juiz de Fora. 2021. v. único. p. 355-369.

VIERO, A.C.; ANDRADE DA SILVA, D.R. **Geodiversidade do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: CPRM, 2010.

VOGEL, M. M. **Avaliação da Vulnerabilidade Natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos na Região Cultural da Quarta Colônia de Imigração Italiana, RS.** Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008. 138 p.

VÖRÖSMARTY *et al.*, **Global threats to human water security.** Nature 467: 555-56, 2010

WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. **Comparação de Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos em uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo).** IN: RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 10 n.2 Abr/Jun 2005, 15-2.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. 2004. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação.** Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia. ISBN 978-85-63843-02-9. Disponível em <http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>.

WEILL, M.A.M.; PIRES NETO, A.G. Erosão e Assoreamento. 2018. In: SANTOS, R.F. (Org). **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: MMA, 2007. p. 40-58.

WESTMAN, W. **How much are nature's services worth?** Science, v. 197, n. 4307, p. 960-964, Sept. 1977. DOI: 10.1126/science.197.4307.960.

WHATELY, M.; HERCOWITZ, M. **Serviços Ambientais: conhecer, valorizar e cuidar:** subsídios para a proteção dos mananciais de São Paulo. São Paulo. Instituto Socioambiental, 2008.

WINTER, T. C. 2001. **The concept of hydrologic landscapes:** Journal of the American Water Resources Association, 37: 335-349.

**APENDICE A – Dados coletados em Neossolo Quartzarênico órtico com pastagem**

<b>Lata</b>	<b>Tara</b>	<b>Amostra</b>	<b>Tara + Su</b>	<b>Tara + Ss</b>
7992	79,30	P1	484,62	472,14
7618	81,42	P2	447,66	426,87
7826	79,54	P3	416,45	399,14
6917	83,47	P4	508,30	467,47
3036	79,48	P5	441,92	420,56
2015	78,00	P6	415,80	399,75
90	71,02	P7	473,89	452,74
239	78,02	P8	446,08	427,20
7959	77,36	P9	468,78	444,88
7582	79,53	P10	437,25	413,00
7584	79,79	P11	423,57	402,20
7003	81,31	P12	411,83	398,29
3021	77,37	P13	425,77	407,59
7865	88,77	P14	496,09	464,38
7656	81,33	P15	423,25	399,54
6999	84,06	P16	457,85	430,37
7775	86,68	P17	473,89	447,00
7922	79,25	P18	448,57	425,52
3034	79,59	P19	434,41	413,02
7575	74,50	P20	401,57	384,37

**APENDICE B – Dados coletados em Neossolo Quartzarênico órtico sem uso e ocupação da terra ou cobertura vegetal.**

<b>Lata</b>	<b>Tara</b>	<b>Amostra</b>	<b>Tara + Su</b>	<b>Tara + Ss</b>
256	73,86	A1	501,53	489,28
6831	86,28	A2	539,72	527,63
3031	69,80	A3	489,09	483,73
6618	68,55	A4	533,66	520,29
8417	65,11	A5	490,23	478,05
7825	79,34	A6	517,09	504,96
7916	75,05	A7	554,52	550,25
6957	77,15	A8	515,84	501,49
6514	63,08	A9	486,79	480,64
383	84,26	A10	471,70	467,75
464	76,66	A11	501,63	498,33
6537	64,28	A12	508,38	503,68
2017	76,37	A13	470,58	468,05
6845	75,63	A14	487,70	485,42
7633	77,87	A15	554,60	546,65
7631	73,79	A16	521,88	515,75
8140	81,39	A17	493,70	488,29
6764	75,38	A18	517,55	510,91
47	78,31	A19	487,78	483,81
6794	77,16	A20	452,75	449,97

**APENDICE C – Dados de Umidade Gravimétrica, Densidade do Solo e Unidade Volumétrica**

<b>Amostra</b>	<b>Unidade Gravimétrica</b>	<b>Densidade do Solo</b>	<b>Unidade Volumétrica</b>
P1	0,031769	1,295104	0,041143709
P2	0,060182	1,13887	0,06853988
P3	0,054161	1,053648	0,057067115
P4	0,106328	1,26596	0,134607182
P5	0,062625	1,124463	0,07041904
P6	0,049883	1,060736	0,052913183
P7	0,055407	1,258444	0,069726718
P8	0,05407	1,151167	0,062243047
P9	0,06503	1,211629	0,07879284
P10	0,07272	1,099374	0,07994671
P11	0,066282	1,062912	0,070452008
P12	0,042716	1,045011	0,044638287
P13	0,055054	1,08866	0,059935307
P14	0,084423	1,2383	0,104540626
P15	0,074511	1,049066	0,078166453
P16	0,079351	1,141705	0,090595282
P17	0,074628	1,187893	0,088650187
P18	0,066567	1,141573	0,075990584
P19	0,064151	1,099243	0,070517943
P20	0,055507	1,021571	0,056704471

<b>Amostra</b>	<b>Unidade Gravimétrica</b>	<b>Densidade do Solo</b>	<b>Unidade Volumétrica</b>
A1	0,029488	1,189474	0,03507547
A2	0,027393	1,263719	0,034617341
A3	0,012949	1,185207	0,015347307
A4	0,029597	1,293469	0,03828237
A5	0,029496	1,182373	0,034875038
A6	0,0285	1,218679	0,034731873
A7	0,008986	1,360642	0,012226307
A8	0,033817	1,215014	0,041088407
A9	0,014728	1,195601	0,017609317
A10	0,0103	1,098048	0,011310049
A11	0,007826	1,207369	0,009448902
A12	0,010696	1,258136	0,013457527
A13	0,006459	1,121499	0,007244158
A14	0,005564	1,173353	0,006528332
A15	0,016959	1,342259	0,022763264
A16	0,01387	1,265466	0,017552051
A17	0,013296	1,165078	0,015490473
A18	0,015246	1,247055	0,019012336
A19	0,00979	1,16107	0,011367315
A20	0,007457	1,067468	0,007959984